

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ



(19) BG

(11) 66958 B1

(51) Int.Cl.

G 01 Q 20/00 (2006.01)

G 01 Q 10/04 (2006.01)

ОПИСАНИЕ КЪМ ПАТЕНТ

ЗА

ИЗОБРЕТЕНИЕ

ПАТЕНТНО ВЕДОМСТВО

(21) Заявителски № 112337

(22) Заявено на 21.07.2016

(24) Начало на действие
на патента от: 21.07.2016

Приоритетни данни

(31) (32) (33)

(41) Публикувана заявка в
бюлетин № 1.2 на 31.01.2018

(45) Отпечатване на 16.09.2019

(46) Публикувано в бюлетин № 9.1
на 16.09.2019

(56) Информационни източници:

(62) Разделена заявка от рег. №:

(73) Патентоприитежател(и):

"АМГ ТЕХНОЛОДЖИ" ООД,
2140 БОТЕВГРАД, ИНДУСТРИАЛНА ЗОНА,
МИКРОЕЛЕКТРОНИКА;
ВЛАДИМИР ТРИФОНОВ СТАВРОВ,
2140 БОТЕВГРАД, БУЛ. "3-ТИ МАРТ" 47,
ВХ. Б, ЕТ. 5, АП. 9

(72) Изобретател(и):

Владимир Трифонов Ставров

(74) Представител по индустриална
собственост:

Светла Стоянова Йорданова, 1220 София,
к-с "Толстой" бл. 44, ет. 16, ап. 76

(86) № и дата на РСТ заявка:

(87) № и дата на РСТ публикация:

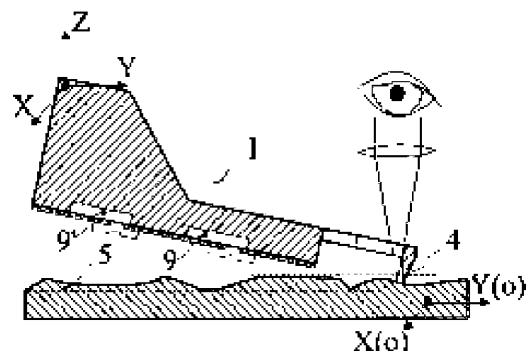
(54) МИКРОКОНЗОЛНИ СЕНЗОРИ ЗА
КОМБИНИРАНА МИКРОСКОПИЯ

(57) Изобретението се отнася до микроконзолни сензори за атомно силова микроскопия, които са особено подходящи за използване в комбинирани системи, използващи едновременно както атомно силов микроскоп, така и оптическа, електронна или друг вид микроскопия, или метод за локална микро/нанообработка. За целта микроконзолният сензор от изобретението, състоящ се от тяло с разпростираща се от него микроконзола, съставена от еластични основна и сондова част, съдържа в сондовата си част отвор със симетрични околни свързващи еластични елементи. За осигуряване на видимост през отвора към областта на взаимодействие на сондата с образеца и към нейния връх, основата на сондата завършва в отвора и размерите на радиуса r на основата и височината h на сондата удовлетворяват отношението:

$$\arctg(r/h) < \alpha,$$

където α е апаратно зададен ъгъл на наклон на равнината на сензора спрямо равнината на изследвания образец. Сензорите от изобретението могат да бъдат снабдени допълнително и със сензорни елементи за детекция на огъването на микроконзолата, чувствителни към механичните напрежения, елементи за биморфно актюиране на микроконзолата и др.

14 претенции, 7 фигури



(54) МИКРОКОНЗОЛНИ СЕНЗОРИ ЗА КОМБИНИРАНА МИКРОСКОПИЯ**Област на техниката**

Това изобретение се отнася до микроконзолни сензори за атомно силова микроскопия. В частност, то се отнася до микроконзолни сензори, особено подходящи за използване в комбинирани системи, при които се използват едновременно както атомно силов микроскоп, така и оптическа, електронна или друг вид микроскопия, или метод за локална микро/нанообработка. В допълнение, сензори от настоящото изобретение могат да намерят приложение във всички варианти на изпълнение на метода на сканиращата сондова микроскопия.

Предшестващо състояние на техниката

Методът на сканиращата сондова микроскопия (ССМ), в частност, сканиращата атомно силова микроскопия (АСМ), е основен за изследването на морфологията на повърхността на разнообразни образци с много висока точност и разделителна способност по оста Z , която е перпендикулярна на изследваната повърхност. Другите известни на специалистите в областта микроскопски методи, като оптическа и електронна микроскопии, притежават висока точност и разделителна способност в равнината XY , но имат незадоволителни параметри по оста Z . Затова, комбинирани системи, включващи, както атомно-силов, така и друг микроскоп, са особено полезни и желани от изследователите.

За АСМ се използва специализиран консуматив - микроконзолни сензори 1, които обичайно се състоят от тяло 2 и разпростираща се от тялото микроконзола 3, както е показано на примерите от фиг. 1a-1e. От практиката са известни две предпочитани форми на микроконзолата - правоъгълна (известна също като single beam) и триъгълна (известна също като V-shape). В свободния край на еластичната микроконзола 3 е разположена сонда 4, чиито връх е с минимален радиус на кривината. Когато микроконзолата 3 е от правоъгълния тип, за осигуряване на достъп на сондата 4 до образеца 5, свободния край на микроконзолата около сондата е стеснен. При изпълнението на анализ с АСМ, микроконзолата е наклонена на специфичен, апаратно зададен от производителя ъгъл α спрямо повърхността на образеца 5, която повърхност се обхожда по зададена мрежа от точки. Във всяка точка се записва реакцията (промяната на огъването) на еластичната микроконзола 3 в резултат от локалното взаимодействие на атомите на сондата 4 с атомите на образеца 5. При детектиране на това взаимодействие, микроконзолите с по-малка стойност на пружинната константа k осигуряват по-голяма амплитуда на огъване и, съответно, по-висока чувствителност. В практиката, огъването на микроконзолата 3 се регистрира по два предпочитани начина - оптически (лазерен) и пиезорезистивен. С оглед конструкцията на микроконзолата 3, съществува важна разлика между двата начина за детекция на огъването - за лазерната детекция трябва да има плътен участък в близост до сондата 4, от който да се отразява лазерния сноп, докато пиезорезистивната детекция се осъществява в участъка на свързване на микроконзолата 3 с тялото 2, който е максимално отдалечен от сондата.

Начинът на извършване на измерване с АСМ с лазерен метод на детекция е показан схематично на фиг. 1a. При него, сноп светлина от неподвижен източник 6 се отразява от задната повърхност на микроконзолата 3 и попада в неподвижен позиционно-чувствителен фотодетектор 7. При това, повърхността на образеца 5 се обхожда по осите X и Y чрез движение на образеца, а посредством контролирано движение на целия сензор 1 само по оста Z , се осигурява постоянен сигнал от отразения сноп светлина от задната страна на микроконзолата 3, както е илюстрирано на фигурата.

На фиг. 1б е показан един широко разпространен вариант на реализация на сензор за АСМ с обща дължина L , дебелина t и ширина w на микроконзолата, която е постоянна с изключение на участъка на сондата 4, който е стеснен. Въпреки наличието на стеснен участък, е прието такива микроконзоли да бъдат наричани „правоъгълни”. Надлъжен разрез на такъв сензор по оста на симетрия е показан на фиг. 1в. Коравото тяло 2 на сензора 1 е с дебелина в диапазона от около 50 μm до около 500 μm , а микроконзолата 3 е с дебелина в диапазона от около 0.5 μm до около 10 μm . Височината h на сондата 4 се избира в съответствие със спецификата на повърхността на изследвания образец, като обичайно сондите на сензорите са пирамидални, с върхове с триъгълна или четириъгълна форма на сечението.

Малка част от сензорите за АСМ са с конична форма на сондата и кръгло сечение на върха.

Тъй като споменатото отражение на снопа светлина е от обратната страна на микроконзолата в областта на сондата 4 и микроконзолата 3 е плътна, през нея нито може да се наблюдава директно областта, в която сондата взаимодейства с образеца, нито има видимост към върха на сондата. Липсата на директна видимост е показана схематично на фиг. 1а, като това обстоятелство създава неудобства, напр. при изследване на образци с периодични повърхности. Когато няма директна видимост към върха на сондата, точността, с която е известна предварително позицията на върха, ограничава точността, с която може да бъде измервана позицията на елементите на образеца. Така, обичайно при извършване на измервания с АСМ, се получава информация за разстоянието между елементите, но не може да бъде определена тяхната позиция. За такова определяне, е необходимо извършване на допълнително калибриращо измерване със същия сензор, което е затрудняващо и ограничаващо.

Друг основен, присъщ проблем на АСМ е свързан с голямото време за получаване на изображение на анализираната повърхност. За намаляване на това време е необходимо създаването на бързи микроскопи, които използват бързи микроконзолни сензори с висока резонансна честота f_c . Тъй като обичайно сензорите за АСМ са с хомогенна дебелина t , бързите сензори притежават и висока стойност на параметъра пружинна константа k . Това прави подобни сензори неподходящи за изследване на особено важната група на меките материали, каквито са напр. биологичните. Така, при микроконзоли с хомогенна дебелина, за постигане едновременно на висока резонансна честота f_c и малка стойност на пружинната константа k , е наложително използването на микроконзоли с малки стойности на размерите L , w и t . Това от своя страна създава нови затруднения и неудобства, известни на специалистите в областта.

Друг разпространен вариант на реализация на сензор 1 за АСМ с лазерна детекция и триъгълна форма на микроконзолата 3 е показан на фиг. 1г. Обичайно, в такава микроконзола 3 е оформен трапецовиден отвор 8. Въпреки отвора, поради необходимостта от отражение на светлината, участъкът непосредствено до сондата 4 е плътен и няма видимост към областта на нейното взаимодействие с образеца 5.

Сензор с отвор е разкрит в Европейски патент № EP 0472342 B1, където е описано средство за обработка на информация, което включва и микроконзолен сензор за детекция на микропремествания. Сензорът се състои от тяло, първа еластична част, единият край на която е неподвижно свързан с тялото; и втора еластична част, единият край на която е неподвижно свързан с първата част. При това, резонансната честота на втората част е по-голяма от резонансната честота на първата, която е определяща за режима на работа на сензора. Въпреки, че в един вариант, показан на фиг. 7а от споменатия патент, е разкрит сензор за АСМ с отвор във втората част, функцията на отвора не е описана, нито е разкрито някакво негово предназначение.

Микроконзолен сензор с отвор е разкрит и в статията A. D. Slattey et al., Atomic force microscope cantilever calibration using a focused ion beam, Nanotechnology, Volume 23, Number 28. В статията е описан метод за калибриране на пружинната константа на микроконзола чрез точно контролирано отнемане на част от нейната маса с използването на фокусиран йонен сноп, при което се формира отвор, в област близо до сондата, но извън участъка за лазерна детекция. В тази статия не се разглежда възможността за друго използване на отвора, вкл. за наблюдение на образеца през него.

Другата група микроконзолни сензори за АСМ - тези с пиезорезистивна детекция, са разкрити първоначално в публикациите: M. Tortonese et al. „Atomic force Microscopy Using A Piezoresistive Cantilever“ by G. L. Report No. 4821; Transducers, 91 (Mar. 1991) и M. Tortonese et al., Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection, Appl. Phys. Lett. 62, 834 (1993), както и в патент на САЩ № US 5444244. В тях са описани сензори, включващи пиезорезистори за детекция на огъването на микроконзолата и сонда с малък радиус на кривината. В посочения патент, въпреки, че е даден вариант с формиран отвор в микроконзолата, не е разкрито използването на този отвор за наблюдение на образеца, нито се дискутира подходящо за целта модифициране на формите на отвора и сондата.

В патент на САЩ № US 5386720 е разкрит сензор за АСМ с пиезорезистивна детекция, състоящ се от две микроконзоли, разпростиращи се от тялото на сензора. Краищата на микроконзолите са свързани посредством формиран общ свободен край с триъгълна форма и в него е оформена сонда с остър връх.

Въпреки, че по същество е разкрит микроконзолен сензор с формиран отвор, в този патент нито се предполага използването на този отвор за наблюдение на областта на взаимодействие, нито формата на сондата и отвора са подбрани така, че да позволява такова наблюдение.

При използване на микроконзолни сензори с пиезорезисторна детекция на огъването, може да няма неподвижни външни елементи, като източник на светлина 6 и фото-детектор 7. Затова, с такива сензори могат да се анализират както подвижни, така и неподвижни образци. Ето защо, пиезорезистивните микроконзолни сензори са предпочитани в системи за комбинирано едновременно прилагане с други методи, както сканиращ електронен микроскоп (СЕМ), трансмисионен електронен микроскоп (ТЕМ), работа във вакуум и мътни течности, при ниски температури и др., известни на специалистите в областта.

На фиг. 1д е показан един известен от нивото на техниката сензор 1 за АСМ с правоъгълна форма и пиезорезистивна детекция на огъването на микроконзолата, която има дължина L , ширина w и дебелина t . Обичайно, детектиращите резистори 9 са два, ориентирани по оста на микроконзолата 3 и са разположени в нейната основа, а с помощта на метални връзки, непоказани на фигурата, те са свързани в пълна мостова схема с два други, допълнителни пасивни резистора 9'. Надлъжен разрез на такъв сензор 1 по линията АА' е показан на фиг. 1е. Аналогично на примера за микроконзолен сензор с оптична детекция, параметрите на тялото и микроконзолата с пиезорезистивна детекция, са подобни. Допълнително, за осигуряване на висока чувствителност на сензорите, за дебелините: x_j на детектиращите пиезорезистори 9 и t на микроконзолата 3, е необходимо да е в сила отношението:

$$x_j \leq 1/3 \cdot t \quad (1)$$

Така, наличието на пиезорезистори с дебелина x_j за детекция на огъването, ограничава намаляването на дебелината t на микроконзолите, защото при нарушаване на отношението (1) се намалява чувствителността на сензорния сигнал. Това затруднява получаването на сензори за АСМ с пиезорезистивна детекция, притежаващи малка пружинна константа k , необходими за анализ на меки материали.

Ето защо, има необходимост от създаването на микроконзолни сензори за АСМ с директна видимост към областта на взаимодействие на сондата с образеца, тъй като такава видимост ще даде възможност както за непосредствено определяне на позицията на върха на сондата, което понастоящем съвременните сензори не позволяват, така и за едновременното извършване на допълващ локален микроскопски анализ или обработка. Такива допълващи методи за анализ са оптическа, електронна, или конфокална микроскопия, локален елементен анализ и др. подобни. Към групата на методите за обработка, които ще могат да се прилагат едновременно с АСМ, са напр. микрообработки с фокусирани електронни, йонни и лазерни снопове, вкл. локално отлагане, израстване или извършване на фазов преход, прилагане на микродиспенсери, микропринтери и др. способи за локално въздействие.

За целта, микроконзолните сензори за АСМ трябва да са снабдени с подходящ отвор в микроконзолата, осигуряващ необходимата пряка видимост към върха и областта на взаимодействие на сондата с образеца. Тази микроконзола трябва да е с обичайни размери и да отговаря същевременно и на съвременните изисквания за висока чувствителност и разделителна способност при детекция на нейното огъване, висока резонансна честота f_c и малък пружинен коефициент k на елементите, носещи сондата.

Техническа същност на изобретението

Изобретението се отнася до микроконзолен сензор за използване в сканираща сондова микроскопия с наклон на равнината на сензора спрямо равнината на образеца, който е апаратно зададен под ъгъл α , и който сензор се състои от тяло, от което се разпростира микроконзола с дължина L и ширина w , съставена от основна и сондова части. Единият край на основната част е неподвижно свързан с тялото, а другият край е свързан със сондовата част, като основната част на микроконзолата и сондовата част са еластични и имат различни резонансни честоти, при което резонансната честота на сондовата част е по-голяма от резонансната честота на основната част. Също така, в сондовата част е оформен отвор със симетрични околни свързващи еластични елементи, а за осигуряване на видимост към областта на взаимодействие на сондата с образеца и към нейния връх, основата на сондата завършва в отвора и размерите на радиуса r на основата и височината h на сондата удовлетворяват отношението:

$$\arctg(r/h) < \alpha.$$

Пружинните константи на основната и сондовата части на микроконзолата варират по желание и са постигнати чрез избор на параметрите на споменатите части: дължина l и дебелина d на основната част, проектирани дължини a и b , ширини g_1 и g_2 , и дебелина t на еластичните елементи на сондовата част.

В един вариант на изобретението, за осигуряване на висока разделителна способност на сензора, върхът на сондата е със симетрична конична форма.

В друг вариант на изобретението, основата на сондата е със симетрична конична форма с височина h_b и плосък горен участък, а върхът ѝ е с височина h_a , като за височините h_a и h_b и радиуса r на основата на сондата са в сила отношенията:

$$h_a + h_b \geq h_0 = r / \operatorname{tg} a.$$

В следващ вариант на изобретението, височината h_b на основата, дебелината d на основната част и дебелината t на сондовата част, удовлетворяват отношението:

$$h_b = d - t.$$

Във вариант на изобретението, абсолютната стойност на височината h_a на върха е в диапазона от 0 до 0.5 мкм, за предпочитане от 20 нм до 100 нм.

В друг вариант на изобретението, върхът е разположен по, или на контролирано отстояние δ от оста на симетрия на основата, а материалът на върха на сондата е хомогенен или различен от материала на нейната основа.

Във вариант на изобретението, сондата съдържа елемент с цилиндрична форма и коничен връх, формиращ върха, който елемент е поместен във вдлъбнатата част в основата на сондата.

В друг вариант на изобретението, в основната част на микроконзолата за увеличаване на чувствителността на сензора е формиран поне един допълнителен отвор.

В още един друг вариант на изобретението, допълнителните отвори са два или три.

В следващ вариант на изобретението, върху повърхността на микроконзолата допълнително са формирани елементи за галванично свързване на сондата с външни средства за измерване.

В още един вариант на изобретението, върху повърхността на основната част на микроконзолата допълнително са формирани елементи за биморфно актюиране на микроконзолата.

В един друг вариант на изобретението, сензорът допълнително съдържа сензорни елементи за детекция на огъването на микроконзолата, чувствителни към механичните напрежения в неподвижния край на основната част на микроконзолата. Споменатите сензорни елементи са пиезореzystори, пиезоелектрически, тънкослойни метални тензосензори, тънки метални слоеве с прекъсната структура, тънкослойни резистори от поливинилиденфлуорид, графен или молибденов дисулфид.

В още един друг вариант на изобретението, сондовата част съдържа допълнително плътен участък, способен да отразява сноп светлина с ширина w , равна на ширината на микроконзолата и дължина a , която превъзхожда 3η пъти максималния размер λ на сечението на светлинния сноп, използван за детекция на огъването на микроконзолата. В случая η е безразмерна апаратна функция в диапазона от 1.0 до 3.0, за предпочитане от 1.3 до 2.5.

Пояснение на приложените фигури

Фигура 1а показва страничен вид на микроконзолен сензор за АСМ с лазерна детекция в работно положение, известен от нивото на техниката.

Фигура 1б е поглед отгоре на обичаен правоъгълен микроконзолен сензор за АСМ.

На фигура 1в е показан надлъжен разрез на обичаен микроконзолен сензор за АСМ.

Фигура 1г показва обичаен за нивото на техниката микроконзолен сензор за АСМ с триъгълна форма.

Фигура 1д е поглед отгоре на микроконзолен сензор за АСМ с правоъгълна форма и вградени пиезореzystори, известен от нивото на техниката.

На фигура 1е е показан надлъжен разрез на микроконзолния MEMS прибор с вградени пиезореzystори за детекция на огъването, известен от нивото на техниката.

Фигура 2а показва поглед отгоре на хоризонтално разположен микроконзолен сензор за АСМ съгласно изобретението, с отвор за наблюдение на областта на взаимодействие на сондата и образца и вградени пиезореzystори.

На фигура 2б е показан надлъжен разрез на микроконзолен сензор по линията AA' от фиг. 2а, с различни дебелини на основната и на сондовата части.

На фигура 2в е показан надлъжен разрез на микроконзолен сензор по линията AA' от фиг. 2а, с еднаква дебелина на основната и на сондовата части.

Фигура 2г показва поглед отстрани в работно положение на пиезорезистивен микроконзолен сензор за АСМ с отвор за наблюдение на областта на взаимодействие на сондата и образца.

На фигура 3а е показан поглед отгоре на микроконзолен сензор за АСМ в работно положение, с петоъгълен отвор за наблюдение на образца и върха на сондата.

Фигура 3б показва поглед отстрани на надлъжен разрез на микроконзола в работно положение, с отвор за наблюдение на образца и хомогенна симетрична сонда.

На фигура 3в е показан поглед отстрани на надлъжен разрез на микроконзола с нехомогенна симетрична сонда и връх, разположен по оста на симетрия на основата.

На фигура 3г е показан поглед отстрани на надлъжен разрез на микроконзола с нехомогенна сонда и връх, разположен с отместване от оста на симетрия на основата.

Фигура 3д показва аксонометричен вид на сонда със сглобен връх.

Фигура 4а е схематичен поглед отстрани на сонда със симетричен връх и образец, притежаващ анализиран и смущаващ елемент.

Фигура 4б е схематично представяне на влиянието на смущаващо взаимодействие между връх на сонда с триъгълно сечение и периодично разположени симетрични смущаващи елементи.

На фигура 4в е представено схематично влиянието на смущаващо взаимодействие между връх на сонда с четириъгълно сечение и периодично разположени симетрични смущаващи елементи.

Фигура 4г е схематично представяне на влиянието на смущаващо взаимодействие между сонда с връх с кръгло сечение и периодично разположени симетрични смущаващи елементи.

Фигура 4д е схематично представяне на влиянието на смущаващо взаимодействие между сонда с връх с кръгло сечение и периодично разположени асиметрични смущаващи елементи.

Фигура 5а е поглед отгоре на вариант на хоризонтално разположен микроконзолен сензор за АСМ, снабден с отвор за наблюдение на образца и един допълнителен отвор в основната част.

Фигура 5б показва поглед отгоре на вариант на хоризонтално разположен микроконзолен сензор за АСМ, снабден с отвор в сондовата част и два допълнителни отвора в основната част.

Фигура 5в е поглед отгоре на вариант на хоризонтално разположен микроконзолен сензор за АСМ, с отвор в сондовата част за наблюдение на образца и три допълнителни отвора в основната част.

Фигура 6а е поглед отгоре на микроконзолен сензор за АСМ с вградени пиезорезистори, с триъгълен отвор за наблюдение на образца, три отвора в основната част и електропроводяща връзка между сондата и външен измерителен уред.

На фигура 6б е показан вид отгоре на микроконзолен сензор за АСМ с вградени детектори за огъването на микроконзолата, с триъгълен отвор за наблюдение на образца, три допълнителни отвора и биморфен термоактюатор.

Фигура 7а е поглед отгоре на хоризонтално разположен микроконзолен сензор за АСМ с лазерна детекция и триъгълен отвор за наблюдение.

На фигура 7б е показан надлъжен разрез на хоризонтално разположен микроконзолен сензор с лазерна детекция на огъването, с различни дебелини на основната и на сондовата част.

Фигура 7в показва поглед отстрани в работно положение на микроконзолен сензор за АСМ за лазерна детекция с отвор за наблюдение на областта на взаимодействие на сондата и образца.

Примери за изпълнение на изобретението

Пример 1.

Един вариант на изпълнение на микроконзолен сензор съгласно настоящото изобретение, е показан на фиг. 2а, и в разрез по линията AA', на фиг. 2б. Фигура 2а представлява поглед отгоре на хоризонтално разположен микроконзолен сензор 1, състоящ се от тяло 2 и симетрична спрямо надлъжната ос микроконзола 3 с дължина L и ширина w. За предпочитане, дължината L е в диапазона от около 20

мкм до около 500 мкм, по-предпочитано от 50 мкм до 425 мкм, а ширината w е в диапазона от около 5 мкм до около 150 мкм, по-предпочитано от 20 мкм до 120 мкм. Обичайно, параметрите L и w на микроконзолата се избират съобразно приложението ѝ, по начин известен на специалистите в областта. В този пример, дължината L е 100 мкм, а ширината w е 40 мкм. Микроконзолата 3 има две обособени еластични части - основна 10 и сондова 11. Единият край на основната част 10 е неподвижно свързан с тялото 2, а към другия е присъединена сондовата част 11. В свободния край на сондовата част 11 на микроконзолата 3 е разположена сонда 4 с конична форма, а непосредствено до сондата 4 е оформен отвор 12 с околни еластични свързващи елементи 13. Формата на отвора 12 е симетрична, представляваща логическа разлика на симетричен многоъгълник с нечетен брой върхове, в случая пет, и фигурата на основата 4' на сондата 4, при което основата 4' завършва в отвора 12. Така, през отвора 12 има пряка видимост към изследвания образец 5 и може да се наблюдава околността на областта, в която става взаимодействието между образца 5 и сондата 4. Когато сондата 4 е със симетрична конична форма, съответно сечението на основата 4' е с формата на кръг, координатите на върха 14 на сондата 4 в равнината XY се пресмятат, като средноаритметична стойност на координатите на произволно избрана двойка диаметрално разположени точки от периферията на основата 4', видими от задната страна на микроконзолата, за предпочитане, двойката точки са разположени по оста на симетрия на микроконзолата. Ето защо, видимостта на част от периферията на основата 4' е достатъчна чрез пресмятане точно да се определи позицията на върха 14 на сондата 4 и съответно, позицията на областта на взаимодействие на сондата 4 с образца 5, дори когато върхът 14 не се вижда директно от задната страна на сензора.

Така описаният сензор 1 може да бъде използван за АСМ чрез лазерна детекция на огъването на микроконзолата. По желание, той също така може да бъде снабден допълнително със сензорни елементи 9, разположени на горната повърхност в неподвижния край на основната част 10 на микроконзолата 3, в непосредствена близост до участъка ѝ на свързване с тялото 2. Сензорните елементи 9 са избрани от някои от известните на специалистите в областта типове: пиезорезистивни, тънкослойни метални елементи с прекъсната структура, нано-гранулатни тунелни резистори, пиезоелектрически, тънкослойни метални тензосензори, тънкослойни резистори от поливинилиденфлуорид (PVDF), двумерни материали като графен, молибденов дисулфид и др. подобни; в този пример сензорните елементи са пиезорезистори. Те са свързани в мостова схема с помощта на електропроводящи метални връзки, не показани на фигурата, със спомагателни елементи 9', които са еднотипни по конструкция и параметри със сензорните елементи 9, но са разположени на повърхността на недеформируемото тяло 2. Така свързаните сензорни елементи 9 генерират напрежителен сензорен сигнал, съответстващ на огъването на микроконзолите. Най-предпочитани са пиезорезисторите, които, както е показано в примера на фигура 2а, са с дължина l_p , която е по-малка от дължината l ($l_p < l$) на основната част 10.

Във варианта на изпълнение на изобретението, показан на фиг. 2а, фигурата петогълник на симетричния отвор 12, в която завършва основата 4', представлява логическата сума (обединението) на два участъка: правоъгълен с дължина a и участък, с формата на равнобедрен триъгълник с проектирана дължина b и ширини на участъците на околните еластични свързващи елементи 13 респективно g_1 и g_2 . Показаната на фиг. 2б дебелина на тялото 2 е обичайна за областта и е в диапазона от около 50 мкм до около 500 мкм, в този пример дебелината е 270 мкм. Дебелината на основната част d на микроконзолата 3 е в диапазона от 0.5 мкм до 10 мкм, като в този пример е 5 мкм и е различна от дебелината на сондовата част t , която в този пример е 1 мкм. В това изпълнение на изобретението е в сила отношението:

$$d > t \quad (2)$$

При фиксирани стойности на параметрите L и w , посредством избора на параметрите l , d , t , a , b , g_1 и g_2 на съответните части, могат да бъдат реализирани множество различни сензори, притежаващи желана резонансна честота и разлика в пружинните константи на двете части: основна 10 и сондова 11. Във всички случаи от това изобретение, резонансната честота на сондовата част 11 е по-голяма от резонансната честота на основната част 10, като работната честота на микроконзолния сензор се определя от по-ниската честота. При това, е възможно да бъде реализирана сондова част 11 с намалена стойност на пружинната константа, без това да е обвързано с намаляване на чувствителността на пиезорезисторните сензори 9 и на резонансната честота f_c , които се определят основно от дебелината

d на основната част 10.

На фиг. 2в е показан надлъжен разрез на друг вариант на изпълнение на микроконзолния сензор 1 по линията AA'. В това изпълнение на изобретението, за дебелината d на основната част 10 на микроконзолата 3 и дебелината t на сондовата част 11, е в сила отношението:

$$d = t \quad (3)$$

Така, пружинната константа на основната част 10 се определя от споменатите еднакви дебелини, както и от нейните дължина l и ширина w. Докато пружинната константа на сондовата част 11 се определя от проектираните дължини a и b на еластичните свързващи елементи 13, както и от техните ширини g₁ и g₂. Ето как, дори при еднакви дебелини d и t на двете части и фиксирани стойности на параметрите L и w, посредством подбор на параметрите l, a, b, g₁ и g₂, може да бъде постигнато избрано съотношение на резонансните честоти и пружинните константи на двете части на микроконзолата 3 - основна 10 и сондова 11. Това осигурява кумулативно свойствата: висока резонансна честота f₀, висока чувствителност и „мека“ сондова част 11, която не уврежда изследвания образец, без да е необходимо микроконзолите да са с малки геометрични размери L, w и t.

Сензорът съгласно примера от настоящото изобретение се използва по начина, показан на фиг. 2г. В работно положение микроконзолният сензор 1 е наклонен на апаратно зададен ъгъл α спрямо повърхността на образца 5, чието обхождане може да бъде, по избор, чрез движение на образца 5 по осите X и Y, условно обозначено на фигурата със символите X(o) и Y(o). При това, посредством контролирано движение на сензора 1 по оста Z, се осигурява постоянен сигнал от свързаните в мост пиезорезистори 9 и 9'.

Възможно е също така, образецът да е неподвижен, като неговата повърхност се обхожда чрез движение на микроконзолния сензор 1 с вградени пиезорезистори 9 и 9' по осите X и Y. Аналогично, чрез контролирано движение на сензора 1 и по оста Z, се осигурява постоянен сигнал от свързаните в мост пиезорезистори 9 и 9', при обхождането на образца 5. Известно е, че когато образецът 5 е неподвижен, позицията на неговите елементи е постоянна и може да бъде регистрирана предварително, напр. от допълващ инструмент.

При наличие на отвор 12, осигуряващ видимост към част от основата 4' на сондата 4, когато тя е със симетрична форма, чрез пресмятане както е посочено по-горе, може да бъде определена точно позицията на върха 14. Така, освен че може да бъде наблюдавана областта на взаимодействие на сондата 4 с образца 5, с АСМ може да се определят и координатите (позицията) на всеки от елементите на изследваната повърхност.

На фиг. 3а е показан вид отгоре в работно положение на микроконзолен сензор 1 с отвор 12, съгласно примерите от настоящото изобретение. По-специално, на фигурата е показан вариант, когато ширината g₂ на еластичния елемент 13 е по-малка от диаметъра (g₂ < 2r) на кръглата основа 4', чиито център се намира в пресечната точка на средните линии на елементите 13. Това е достатъчно условие точките на основата 4', които са по оста на симетрия на микроконзолата, да са видими при наблюдение от задната страна. При това, микроконзолата е наклонена на апаратно зададения ъгъл α спрямо равнината на образца 5 и върхът 14 на сондата 4 се вижда директно през отвора 12, както е показано на фиг. 3а. Така е възможно едновременно извършване на два микроскопски анализа в областта на взаимодействие на сондата с образца - АСМ и допълваща микроскопия, като например оптическа, сканираща електронна и др.

В показания на фиг. 3б детайлен страничен вид на надлъжен разрез на областта на сондата 4 в работно положение, сондата е с цилиндрично-симетрична форма, височина h, а радиусът на основата ѝ е r. Установено бе, че при фиксиран наклон α, в този пример α = 13°, върхът 14 на сондата 4 се вижда директно през отвора 12, само когато е изпълнено условието:

$$\arctg(r/h) < \alpha \quad (4)$$

За специалистите в областта е ясно, че при апаратно зададен ъгъл на наклона α и предварително избран размер на радиуса r на основата на сондата 4, отношението (4) може да бъде удовлетворено, когато височината h е по-голяма от праговата височина h₀, определена от условието:

$$h_0 = r/\tg \alpha \quad (5)$$

В този пример, условието (5) дава $h_0 \approx 4^{1/3}$.г. Подобни стойности на параметъра h се постигат чрез подбор на условията на процес на плазмено ецване, както е обичайно за областта.

В един вариант на изпълнение на изобретението сондата 4 е хомогенна, двата елемента - основата 4' и върхът 14, са изградени от еднороден материал, например силиций, а сеченията им са подобни фигури, напр. кръгове. За целта, обичайно споменатите елементи се формират едновременно.

Друг вариант на изпълнение на настоящото изобретение, в който елементите на сондата 4 са формирани последователно, е показан на фиг. 3в. В този вариант сондата 4 е с цилиндрична симетрия и се състои от основа 4' с височина h_b , която основа има горна повърхност с плосък участък, и връх 14 с височина h_a и възможно най-малък радиус на кривината, разположен в центъра на плоския участък. При това, височината h_b на основата 4' е в диапазона от 1 мкм до около 15 мкм, за предпочитане от 2 до 5 мкм, в този пример височината е 4 мкм. Размерът на плоската повърхност е от 10 до 100 нм, за предпочитане от 15 до 50 нм, в този пример е кръг с диаметър 25 нм. Освен това, височината h_a е в диапазона от 10 до 500 нм, за предпочитане от 20 до 100 нм, в примера е 60 нм, а височината h на сондата е равна на сумата на двете споменати височини h_b и h_a . За да има директна видимост в работно положение през отвора 12 към върха 14, сумата от споменатите височини е по-голяма или равна на праговата височина h_0 , съгласно отношението:

$$h_b + h_a \geq h_0 \quad (6).$$

В настоящото изобретение, абсолютната стойност на височината h_a също е в диапазона от 10 до 500 нм, за предпочитане от 20 до 100 нм.

В едно предпочитано изпълнение, когато материалът на върха 14 е хомогенен с материала на основата 4', върхът 14 е оформен от основата 4' на сондата с височина h_b , чрез контролирано локално отстраняване на част от материала от плоската повърхност, което за предпочитане е чрез анизотропен процес, до получаване на желания радиус на кривината, в този пример радиусът е 3 нм. Така за това изпълнение, относително спрямо първоначалната височина h_b , знакът на височината h_a е отрицателен ($h_a < 0$), като в този пример $h_a = -30$ нм. За специалистите в областта е ясно, че в това изпълнение върхът на сондата 14 може да бъде оформен, напр. чрез локално отнемане на материал с микро-/нанообработка, като локално анизотропно сухо ецване, йонно разпрашаване, високотемпературно окисление с последващо селективно ецване на силициев диоксид или друга обичайна обработка.

В друго предпочитано изпълнение на това изобретение, върху плоския участък, чрез добавяне на материал, обичайно различен от материала на основата 4', по оста на симетрия на основата 4', е оформен връх 14 с желаната височина h_a , форма и радиус на кривината, в този пример височината h_a е 60 нм, формата е на прав конус, а радиусът на кривината е 5 нм. Това може да стане, напр. чрез локално отлагане на материал от газова фаза чрез разлагане, стимулирано от електронен, йонен или лазерен сноп, локално израстване на евтектична сплав или извършване на фазов преход, микро-принтиране, по избор, с последващо локално отнемане с процес като йонно ецване и др. локални микро-/нанообработки, известни на специалистите в областта.

Когато от върха 14, получен в описаните по-горе изпълнения на изобретението, най-изпъкналата част на сондата, в случая основата с радиус r , се вижда под ъгъл β , удовлетворяващ условието:

$$\beta < 2\alpha, \quad (7)$$

в работно положение върхът 14 се вижда през описания отвор 12 в микроконзолата 3.

В едно друго предпочитано изпълнение, показано на фиг. 3г, отново чрез добавяне на материал, върхът 14 с желаната форма и височина h_a , е разположен този път на контролируемо отстояние δ от оста на симетрия на основата 4', в този пример отместването δ е 5 нм по оста на симетрия на микроконзолата, с отдалечаване от тялото 2. В този случай, върхът 14 се вижда през описания отвор 12 в микроконзолата 3, когато за ъгъла $\beta/2$, под който коригираният радиус $r^* = r - \delta$, се вижда от върха 14, е изпълнено условието (7). Освен това, известното отстояние δ и посока на отместване на върха 14 от оста на симетрия на основата 4', е достатъчно условие чрез пресмятане, за точно определяне позицията по осите X и Y на областта на взаимодействие на сондата 4 с образеца 5, дори когато върхът 14 не се вижда директно от задната страна на сензора.

Следващ вариант за подходящо оформяне на основата 4' на сондата 4, е показан на фиг. 3д. Фи-

гурата е аксонометричен вид на сонда 4 с основа 4' с височина h_b и формирана вдлъбната част 4'', в случая канавка. Предварително изготвен елемент 14', състоящ се от участък с цилиндрична форма и коничен връх, който служи за връх на сондата 14, е така микропозициониран и фиксиран в канавката 4'', че върхът 14 е разположен на височина h_a над основата 4'. Когато ъгълът β , под който се вижда най-изпъкналата част на основата 4' от върха 14, удовлетворява условието (7), в работно положение през отвора 12 има пряка видимост към върха 14.

В най-предпочитаното изпълнение на вариантите на изобретението, каквито са примерите, показани на фиг. 3в - 3д, за височината h_b на основата 4' и дебелините d и t , е в сила отношението:

$$h_b = d - t \quad (8)$$

В този вариант на изпълнение на изобретението, основата 4' на сондата 4 може да бъде оформена, напр. със селективно отнемане на материал от горната повърхност на микроконзолата 3 с дебелина d , до достигане на желаната дебелина t на сондовата част 11. Тези варианти са особено подходящи, когато се изисква да бъде направен корелативен in-situ анализ с повече от един микроскопски метод на неподвижен образец. Те са особено подходящи и когато се изисква да бъде направен анализ с висока пространствена разделителна способност на деликатни образци, които в хода на анализа променят свойствата си, или при анализ на in-situ синтезирани структури.

Пример 2.

Установено бе от изобретателя на настоящата заявка, че формата на върха 14 на сондата 4 влияе върху разделителната способност и точността на анализа с АСМ. Както е показано на фиг. 4а, върху точността на измерването на взаимодействието между върха 14 на сондата 4 с елемента 15 от образца 5, оказват смущаващо въздействие намиращите се около елемента 15 други близко разположени елементи 15'. Такива смущения влошават разделителната способност и точността на анализа с АСМ, но те могат да бъдат намалени при правилен подбор на формата на върха 14 на сондата 4. Например, на фиг. 4б е показана мрежата за обхождане на неподвижен образец 5 от сензор със сонда 4 с връх 14, притежаващ хоризонтално сечение с отбелязаната на фигурата триъгълна форма, характерна за голяма част от използваните в практиката сензори. Сонда с такава форма на върха се получава, напр. при използване на анизотропно мокро ецване на монокристален силиций през маска с ръбове, които са ориентирани по избрани кристалографски направления. Когато атомите на върха 14 са в непосредствена близост до, и взаимодействат с, атомите на елемента 15 на образца 5, се регистрира също така и смущението от всеки от елементите 15ⁱ ($i = 1, \dots, k$, в примера $k = 4$), които в този пример са със симетрична форма. Дори при периодични образци, каквито са известни напр. от съвременните микроелектронни интегрални схеми, или образци с кристална структура, вкл. двумерни кристали и др. подобни, при които образци елементите 15ⁱ са със симетрично разположение спрямо елемента 15, положението на центъра 16 на общото резултатно смущаващо взаимодействие, отбелязан на фигурата с кръст, е отместено от положението на елемента 15, поради специфичната форма на върха 14. Така, при използването на сонда 4 с връх 14 с форма без цилиндрична симетрия, се променя амплитудата и позицията на центъра 16 на резултатното взаимодействие, което води до характерни неточности при измерването на елемента 15 на образца 5, по всяка от осите X, Y и Z.

Аналогично в примера, показан на фиг. 4в, върхът 14 на сондата 4 е с отбелязаната на фигурата четириъгълна форма, характерна за друга голяма част от използваните в практиката сензори. Както и при 4б, и в този случай са налице посочените по-горе неточности при измерването, дължащи се на формата на върха 14.

Следващ пример е показан на фиг. 4г, където образецът 5 се обхожда със сонда 4 с връх 14 с кръгло сечение, схематично обозначен със светъл кръг. Сонда с такава форма на върха се получава, напр. при използване на плазмено ецване през маска с кръгла форма и размер, определящ радиуса r на основата на сондата 4. В този пример, върхът 14 на сондата 4 се намира в непосредствена близост до елемента 15 на образца 5. Когато около елемента 15 са разположени периодично и симетрично смущаващи елементи 15ⁱ ($i = 1, \dots, k$, в примера $k = 4$), всеки от тях със симетрична форма, положението на центъра 16 на генерираното от тях общо смущение, съвпада с положението на елемента 15. Ето защо, въпреки че всеки от елементите 15ⁱ смущава и променя амплитудата на взаимодействието, което е регистрира-

но от върха 14 на микроконзолата 4, позицията на резултатното взаимодействие не се променя. Така, използването на сонда 4 с връх 14 с кръгло сечение осигурява запазване на точността и разделителната способност по осите X и Y , но не осигурява точност по оста Z .

По подобен начин, на фиг. 4д е показана мрежата за обхождане на образа 5, във възлите на която се регистрира взаимодействието на сонда 4 с връх 14 с кръгло сечение, схематично обозначен със светъл кръг. В този вариант, смущаващите елементи 15^i ($i = 1, \dots, k, k = 4$) на образа 5 са без цилиндрична симетрия. При периодично и симетрично разполагане на елементите 15^i спрямо елемента 15, положението на центъра 16 на сумарното смущение е с малко несъвпадение и е обозначено на фигурата с кръст. Така, при наличие на близки смущаващи елементи 15^i с форма без цилиндрична симетрия, използването на сонда 4 с връх 14 с кръгло сечение, осигурява малка загуба на точност и разделителна способност по осите X и Y .

Когато центърът 16 на резултатното въздействие на елементите 15^i , отстои от елемента 15 на разстояние, което е по-малко от разделителната способност на системата, която сканира по осите XY , споменатото отстояние не се регистрира. Когато резултатното влияние на околните смущаващи елементи 15^i върху магнитуда на огъване на микроконзолата 3 по оста Z , е по-малко от разделителната способност на системата, която регистрира това огъване, споменатото смущаващо влияние не се регистрира.

Ето защо, при анализ с АСМ на образец 5 с елемент 15 и при наличие на смущаващи елементи 15^i , кръглото сечение на върха 14 на сондата 4 е необходимо условие за постигане на висока разделителна способност. Затова, този вариант на изобретението е предпочитан, в сравнение с вариантите на използване на връх 14 с форма без цилиндрична симетрия. Това изискване е особено важно, когато разделителните способности на системите за АСМ, използващи споменатите сензори, не са известни предварително. В частност, това се отнася за сензорите предназначени да бъдат използвани като неспецифичен (за обща употреба) консуматив за АСМ.

Пример 3.

Едно предпочитано изпълнение съгласно настоящото изобретение, на хоризонтално разположен микроконзолен сензор с пиезорезистивна детекция, е показано на фиг. 5а. Фигурата показва поглед отгоре на микроконзолен сензор 1, състоящ се, подобно на сензора от фиг. 2а, от тяло 2 и симетрична спрямо надлъжната ос микроконзола 3 с дължина L и ширина w , и две обособени части - основна 10 и сондова 11, с оформен симетрично разположен отвор 12, в който завършва основата 4' на сондата 4.

Основната част 10 е с дължина l и ширина w , и е снабдена с пиезорезистивните сензорни елементи 9 с дължина l_p , разположени в горната повърхност на основната част 10, в непосредствена близост до участъка на свързване на микроконзолата 3 с тялото 2. Освен това, в основната част 10 е формиран допълнителен правоъгълен отвор 17 със съответни свързващи еластични елементи 18, като дължината l_1 на отвора 17 е избрана да бъде равна на дължината l_p на пиезорезисторите 9. При това, пиезорезисторите 9 са разположени периферно, от външните страни на отвора 17 в областта на свързващите елементи 18. В това изпълнение на изобретението се получава концентрация на механичните напрежения в областите на разполагане на пиезорезисторите 9, което води до получаване на сензор с много висока чувствителност. В този вариант, положението на свързващите еластични елементи 18 определя ширината w на микроконзолата 3 и тя има запазена стабилност срещу огъване в равнината на горната ѝ повърхност.

В този случай, дебелината d на основната част 10 на микроконзолата 3 и дебелината t на сондовата част 11, са различни и при това е изпълнено условието (2). Така, става възможно да се получат оптимални стойности на параметрите на микроконзолата - пружинна константа k и резонансната честота f_c , без това да води до намаляване на дебелината d на основната част 10 и зависещата от нея чувствителност на пиезорезисторите 9.

Друго предпочитано изпълнение на микроконзолен сензор с пиезорезистивна детекция съгласно настоящото изобретение, е показано на фиг. 5б. При него, в основната част 10 са формирани два допълнителни правоъгълни отвора 17, чиято дължина l_1 е избрана да е равна на дължината l_p на пиезорезисторите 9, които са разположени в областта 19, между споменатите допълнителни отвори 17. В това изпълнение на изобретението се получава възможност за особено голяма концентрация на механичните напрежения в областите на разполагане на пиезорезисторите 9, което води до особено висока чувстви-

телност на микроконзолния сензор 1.

Още едно предпочитано изпълнение на микроконзолен сензор с пиезореzystивна детекция съгласно настоящото изобретение, е показано на фиг. 5в. При него, в основната част 10 са формирани три допълнителни правоъгълни отвора: един централно разположен 17' и два симетрично разположени отвора 17, като пиезореzystорите 9 са поместени между споменатите допълнителни отвори 17 и 17'. В това изпълнение на изобретението се получава максимално голямо концентриране на механичните напрежения в областите на разполагане на пиезореzystорите 9, което води до максимално висока чувствителност на микроконзолния сензор 1, при запазена стабилност на микроконзолата срещу огъване в равнината на нейното разполагане. При това разполагане на пиезореzystорите е възможно постигането на максимално висока степен на еднаквост и възпроизводимост на параметрите им. Освен това, в конструкцията на микроконзолните сензори 1, ширините на трите отвора 17 и 17' могат да варират, което позволява реализирането на различни варианти с оптимизиране на специфични характеристики на сензорите.

За специалистите в областта е ясно, че така описаните допълнителни отвори 17 и 17' в основната част 10, са приложими и за постигане на желаните стойности на резонансните честоти и пружинните константи на микроконзолни сензори 1 с лазерна детекция, както е описано по-долу и ще стане ясно от следващите примери.

Пример 4.

Фиг. 6а показва следващо предпочитано изпълнение на микроконзолен сензор 1 с пиезореzystивна детекция и с отвор 12 за наблюдение на образеца 5 през микроконзолата 3, в който отвор завършва основата 4' на сондата 4, по подобие на Пример 1, като петоъгълникът е заменен с триъгълник. В допълнение, сензорът на фиг. 6а е снабден и с електропроводящи връзки 20, осигуряващи галваничен контакт на сондата с външни измерителни уреди. В това изпълнение, отворите 17 осигуряват намалена капацитивна връзка между проводящите връзки 20 и пиезореzystорите 9.

Аналогично, фиг. 6б показва друг вариант на микроконзолен сензор 1 с пиезореzystивна детекция и триъгълен отвор 12 за наблюдение на образеца 5 през микроконзолата 3, в който отвор завършва основата 4' на сондата 4. Основната част 10 на микроконзолата съдържа и проводящи връзки 21, които в този случай са от проводящ материал с такъв температурен коефициент на разширение, че осигуряват биморфно термоактюиране на микроконзолата 3, известно на специалистите в областта.

В този случай отворите 17 осигуряват термична изолация между учащите на термо-актюатора с повишена температура и областите на разполагане на пиезореzystорите 9, както и позволяват допълнително конвективно охлаждане на целия прибор.

Тези варианти са особено подходящи, когато се изисква да бъде направен корелативен анализ при използване на сигнали, алтернативни на породените от атомните сили на взаимодействие на между сондата и образеца като например електропроводимост, електростатични сили и др., известни на специалистите в областта, или при локално нагряване, както и когато се изисква интегриране на актюиращ елемент на микроконзолата в екстремно малък обем.

Пример 5.

Един друг вариант на изпълнение на микроконзолен сензор с лазерна детекция съгласно настоящото изобретение, е показан на фиг. 7а. Фигурата представлява поглед отгоре на хоризонтално разположен микроконзолен сензор 1, аналогичен на описания в Пример 1, с тази разлика, че в отвора 12, в който завършва основата 4' на сондата, петоъгълникът е заменен с триъгълник. Отворът 12 е с проектирана дължина b , а ширината на околните еластични свързващи елементи 13 е g , за предпочитане, тази ширина е по-малка от диаметъра $2g$ на основата 4' на сондата 4.

За постигане на висока чувствителност на сензора при детектиране на огъването на микроконзолата 3 в този вариант, лазерният сноп се отразява от плътния участък на сондовата част 11 с дължина a и ширина w . Тя е разположена непосредствено до отвора 12 към тялото 2 и е отбелязана на фигурата със заштриховане. За предпочитане е, отражението да става от най-близката до отвора част с дължина $1/3 a$, ограничена на фигурата от пунктираната линия. Споменатата дължина a се избира така, че да удовлетворява условието:

$$a = 3\eta \cdot \lambda \quad (9)$$

където λ е надлъжният размер на сечението на лазерен сноп, а η е безразмерна апаратна функция в диапазона от 1.0 до 3.0, за предпочитане от 1.3 до 2.5. Областта с правоъгълна форма с дължина $1/3 a$ и ширина w е най-отдалечена от тялото 2 и се отклонява с най-голям магнитуд от неутрално положение при огъването на микроконзолата 3. Това осигурява висока чувствителност на сензора.

На фиг. 7б е показан надлъжен разрез на микроконзолния сензор 1 по линията AA' от фиг. 7а. Аналогично на Пример 1, дебелината на тялото 2 е обичайна за областта и е в диапазона от около 50 мкм до около 500 мкм, в примера дебелината е 270 мкм. Дебелината на основната част d на микроконзолата 3 е в диапазона от 0.5 мкм до 10 мкм, в примера е 4 мкм, и е различна от дебелината на сондовата част t , която в примера е 1 мкм. В това изпълнение на изобретението е в сила отношението (2). Пружинната константа на основната част 10 се определя от споменатата дебелина d , както и от нейните дължина l и ширина w . Докато пружинната константа на сондовата част 11 се определя от дебелината t , от ширината g и проектираната дължина b на еластичните свързващи елементи 13. Така, при фиксирани стойности на параметрите L и w , които в примера са съответно 100 мкм и 40 мкм, и различни дебелини d и t на двете части, посредством подбор на параметрите b и g , може да се постигне избрано съотношение на пружинните константи и резонансните честоти на двете части на микроконзолата 3 - основна 10 и сондова 11.

Така, непланирано и неочаквано, освен възможността да бъде определена визуално областта на взаимодействие на сондата 4 с образеца, посредством избор на размерите b и g , се постига желаната ниска стойност на пружинната константа k на сондовата част 11, при висока стойност на резонансната честота f_c за основната част 10. При подходящ избор на параметрите d , t , b и g по начин, известен на специалистите в областта, микроконзолен сензор 1 със сонда 4 съгласно настоящото изобретение, притежава, едновременно свойствата: висока резонансна честота f_c , висока чувствителност и разделителна способност и „мека“ сондова част 11, която при измерване не уврежда образеца, дори при микроконзоли с обичайни стойности на геометричните размери L , w и d .

Сензорът съгласно примера от настоящото изобретение се използва по начина, показан на фигура 7в. Микроконзолният сензор 1 е наклонен на апаратно зададен ъгъл α спрямо повърхността на образеца 5, чието обхождане може да бъде само чрез движение на образеца 5 по осите X и Y . Посредством контролирано движение на сензора 1 само по оста Z , се осигурява постоянен сигнал от лазерния сноп, отразен от правоъгълната област с размери $a \times w$, по-специално от правоъгълната област с размери $1/3 a \times w$.

От друга страна, поради наличието на отвора 12, разположен непосредствено до сондата 4, се вижда част от периферията на нейната основа 4'. Затова, при използване на сонда 4 със симетрична форма, освен че може да бъде наблюдавана областта на взаимодействие на върха 14 с образеца 5, чрез пресмятането, описано в Пример 1, може и да бъде определена точно позицията на нейния връх 14. Когато при работа е в сила условието (4), през отвора 12 има видимост към върха 14.

Патентни претенции

1. Микроконзолен сензор за комбинирана микроскопия за използване в сканираща сондова микроскопия с наклон на равнината на сензора спрямо равнината на образеца, който е апаратно зададен под ъгъл α , като сензорът се състои от: тяло, от което се разпростира микроконзола с дължина L и ширина w , съставена от основна и сондова част, при което единият край на основната част е неподвижно свързан с тялото, а другият край е свързан със сондовата част, като основната част на микроконзолата и сондовата част са еластични и имат различни резонансни честоти, а резонансната честота на сондовата част е по-голяма от резонансната честота на основната част, и в сондовата част е оформен отвор със симетрични околни свързващи еластични елементи, характеризиращ се с това, че за осигуряване на видимост към областта на взаимодействие на сондата (4) с образеца и към върха (14), основата (4') на сондата (4) завършва в отвора (12) и размерите на радиуса r на основата (4') и височината h на сондата (4) удовлетворяват отношението:

$$\arctg(r/h) < \alpha,$$

а желаните пружинни константи на основната (10) и сондовата (11) части на микроконзолата (3), са постигнати чрез избор на параметрите на тези части: дължина l и дебелина d на основната част (10),

проектирани дължини a и b , ширини g_1 и g_2 и дебелина t на еластичните елементи (13) на сондовата част (11).

2. Микроконзолен сензор съгласно претенция 1, характеризиращ се с това, че за осигуряване на висока разделителна способност на сензора, върхът (14) на сондата (4) е със симетрична конична форма.

3. Микроконзолен сензор съгласно претенции 1 и 2, характеризиращ се с това, че основата (4') на сондата (4) е със симетрична конична форма с височина h_b и плосък горен участък, а върхът (14) е с височина h_a , като за височините h_a и h_b и радиуса r на основата (4') на сондата (4), са в сила отношенията:

$$h_a + h_b \geq h_0 = r / \operatorname{tg} \alpha.$$

4. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 3, характеризиращ се с това, че височината h_b на основата (4'), дебелината d на основната част (10) и дебелината t на сондовата част (11), удовлетворяват отношението:

$$h_b = d - t.$$

5. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 4, характеризиращ се с това, че абсолютната стойност на височината h_a на върха (14) е в диапазона от 0 до 0.5 мкм, за предпочитане от 20 нм до 100 нм.

6. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 5, характеризиращ се с това, че върхът (14) е разположен по, или на контролирано отстояние δ от оста на симетрия на основата (4'), а материалът на върха (14) на сондата (4) е хомогенен или различен от материала на нейната основа (4').

7. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 6, характеризиращ се с това, че сондата (4) съдържа елемент (14') с цилиндрична форма и коничен връх, формиращ върха (14), който елемент (14') е поместен във вдлъбнатата част (4'') в основата (4') на сондата (4).

8. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 7, характеризиращ се с това, че в основната част (10) на микроконзолата (3) за увеличаване на чувствителността на сензора, е формиран поне един допълнителен отвор (17).

9. Микроконзолен сензор съгласно претенция 8, характеризиращ се с това, че допълнителните отвори (17) са два или три (17, 17').

10. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 9, характеризиращ се с това, че върху повърхността на микроконзолата (3) допълнително са формирани елементи (20) за галванично свързване на сондата (4) с външни средства за измерване.

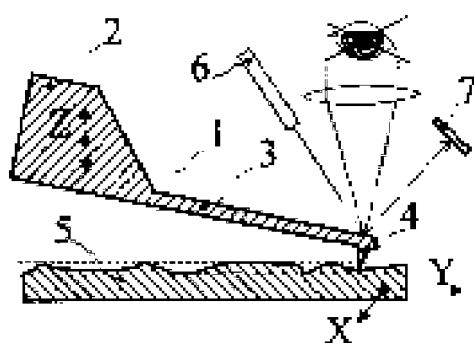
11. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 10, характеризиращ се с това, че върху повърхността на основната част на микроконзолата (3) допълнително са формирани елементи (21) за биморфно актюиране на микроконзолата (3).

12. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 11, характеризиращ се с това, че сензорът допълнително съдържа сензорни елементи (9) за детекция на огъването на микроконзолата (3), чувствителни към механичните напрежения в неподвижния край на основната част (10) на микроконзолата (3).

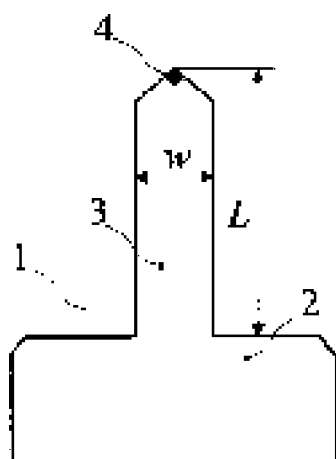
13. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 12, характеризиращ се с това, че сензорните елементи (9) са пиезореzystори, пиезоелектрически, тънкослойни метални тензосензори, тънки метални слоеве с прекъсната структура, тънкослойни резистори от поливинилиденфлуорид, графен или молибденов дисулфид.

14. Микроконзолен сензор съгласно претенции от 1 до 13, характеризиращ се с това, че сондовата част (11) съдържа допълнително плътен участък, способен да отразява сноп светлина с ширина w , равна на ширината на микроконзолата (3) и дължина a , която превъзхожда 3η пъти максималния размер λ на сечението на светлинния сноп, използван за детекция на огъването на микроконзолата (3), където η е безразмерна апаратна функция в диапазона от 1.0 до 3.0, за предпочитане от 1.3 до 2.5.

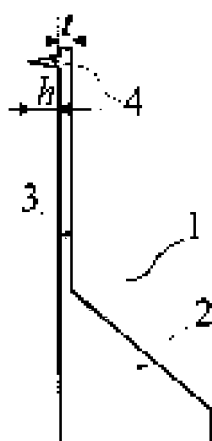
Приложение: 7 фигури



Фиг. 1а



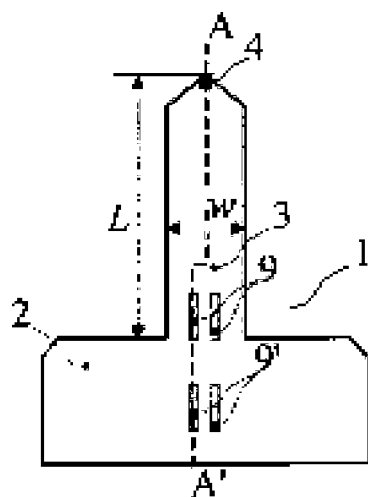
Фиг. 1б



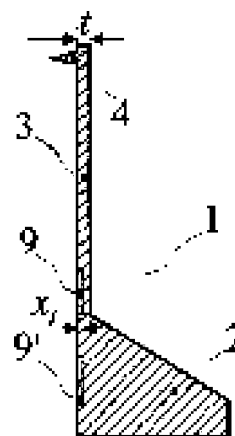
Фиг. 1в



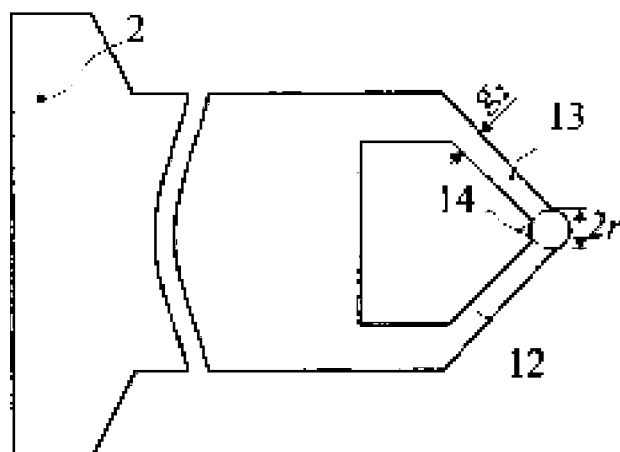
Фиг. 1г



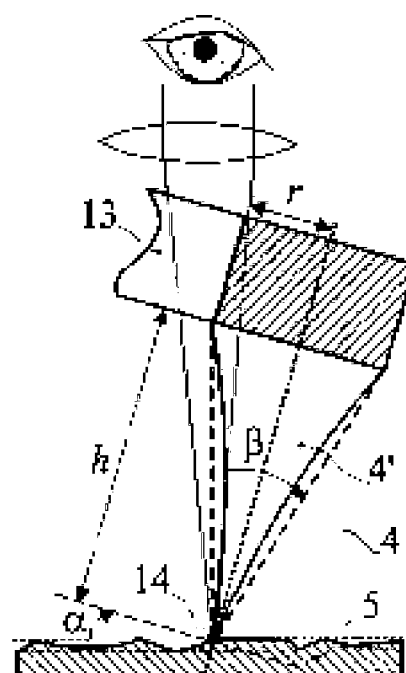
Фиг. 1д



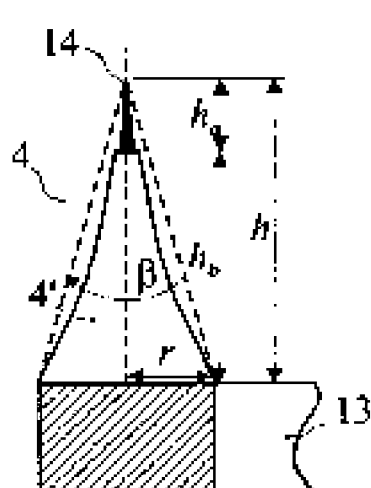
Фиг. 1е



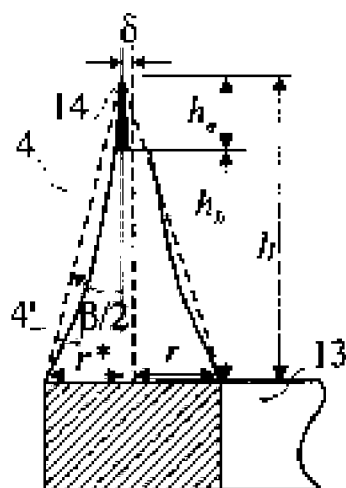
Фиг. 3а



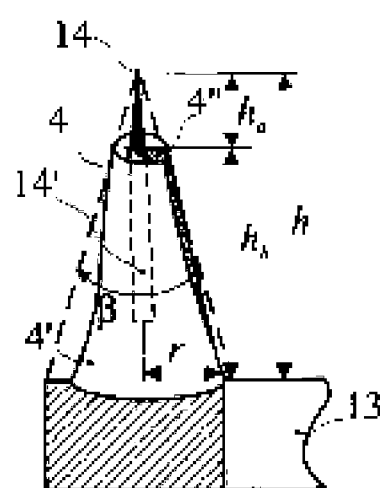
Фиг. 3б



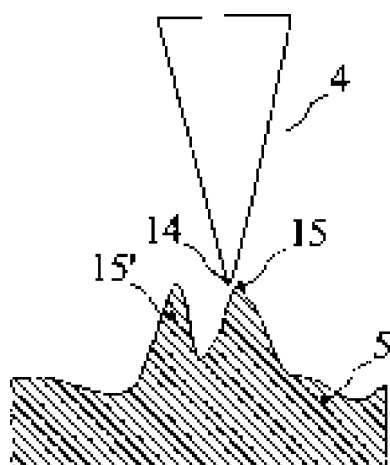
Фиг. 3в



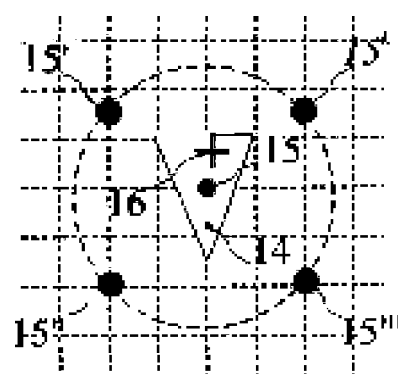
Фиг. 3г



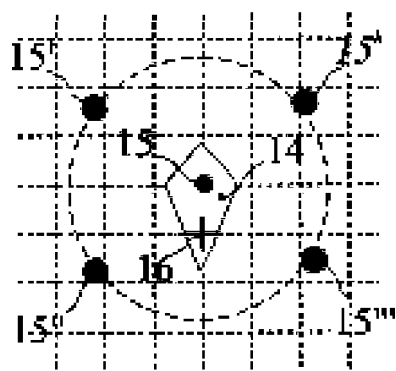
Фиг. 3д



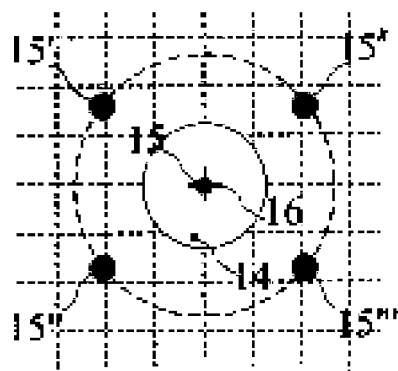
Фиг. 4а



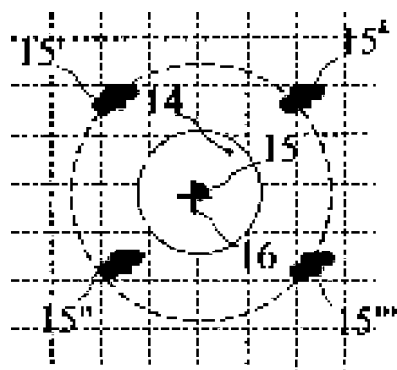
Фиг. 4б



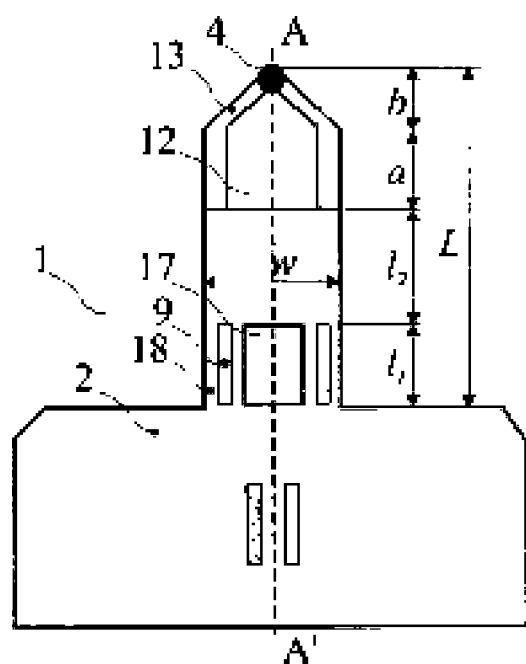
Фиг. 4в



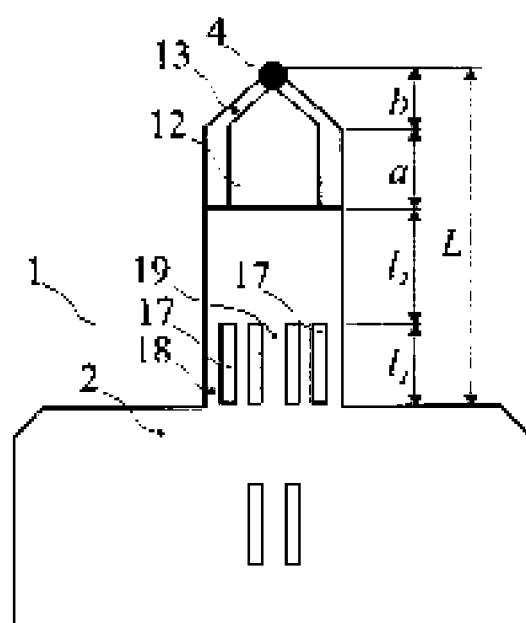
Фиг. 4г



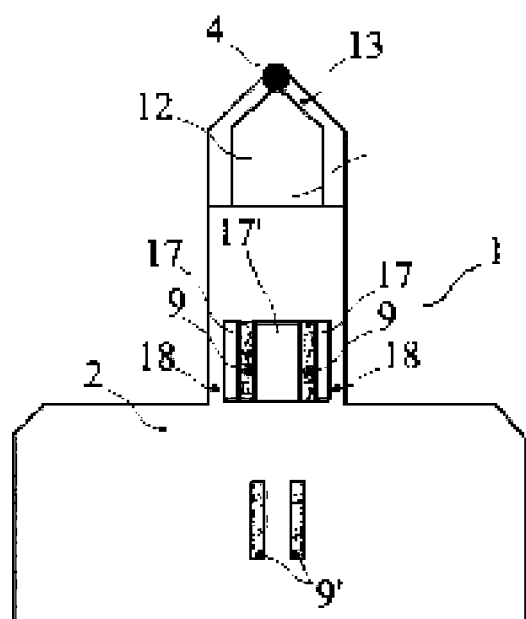
Фиг. 4д



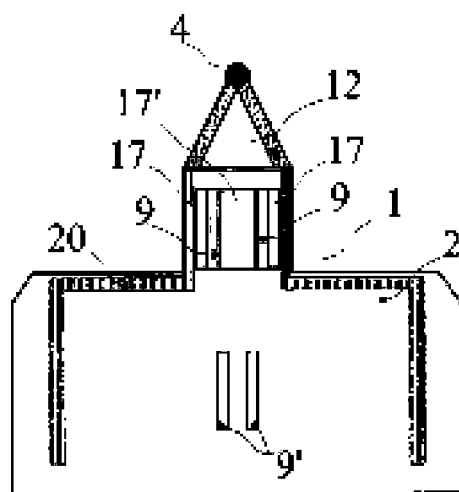
Фиг. 5а



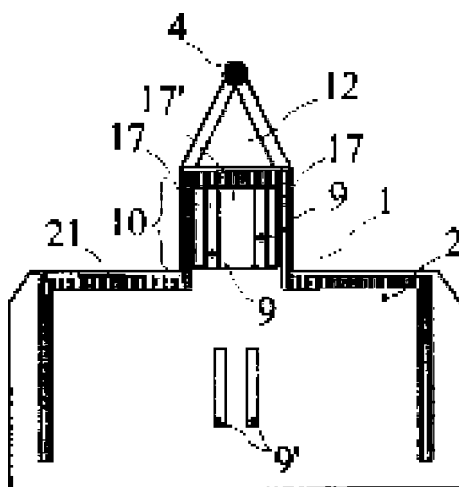
Фиг. 5б



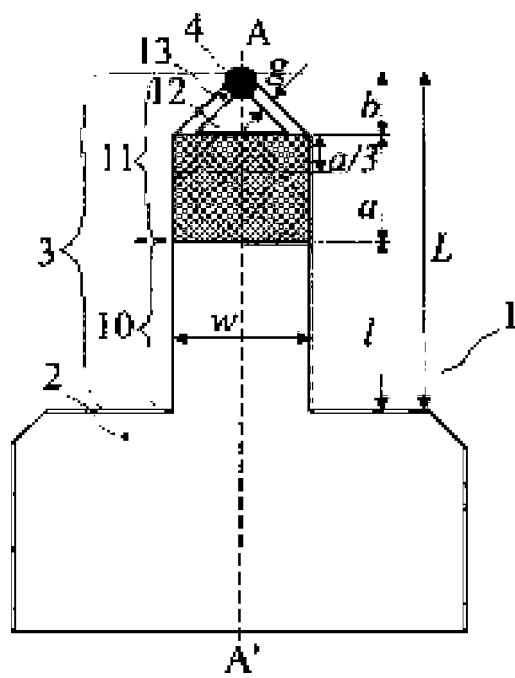
Фиг. 5в



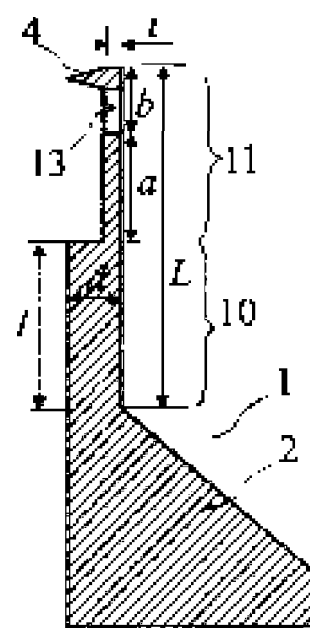
Фиг. 6а



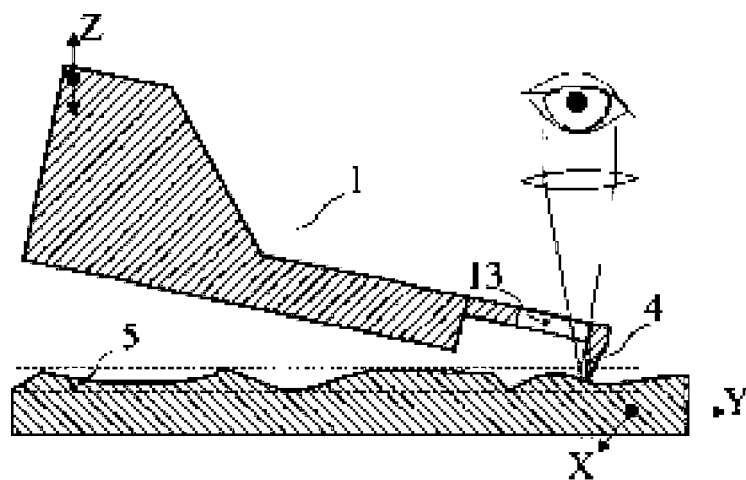
Фиг. 6б



Фиг. 7а



Фиг. 7б



Фиг. 7в