



Получено: 3.11.2023 г. | Принято: 8.11.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.434.442>

Научная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА СИЛЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАНОТВЕРДОМЕРА

И.В.Красногоров¹, ген. директор, ORCID: 0000-0003-3669-9434 / ivkrasnogorov@mail.ru

А.А.Русаков¹, науч. сотр., ORCID: 0000-0001-5702-1353

В.Н.Решетов¹, д.ф.-м.н., вед. науч. сотр., ORCID: 0000-0002-8426-5991

Аннотация. Оборудование для инструментального наноиндентирования традиционно представляет собой изделие, содержащее датчик перемещения и силозадающий элемент, работающие в нанодиапазоне смещений и сил. При этом все рабочие элементы нанотвердомера имеют систему упругого крепления к жесткому корпусу. Однако часть генерируемого актюатором усилия тратится на деформацию системы подвеса подвижных элементов. В данной статье рассматривается конструкция нанотвердомера, в который введена силовая ячейка, позволяющая измерять реальное значение усилия индентирования без необходимости учета потерь на деформацию упругих элементов нанотвердомера. Такая модификация изделия, по мнению авторов, позволяет существенно повысить точность измерения механических свойств мягких материалов и тонких покрытий.

Ключевые слова: инструментальное индентирование, наноиндентор, твердость, модуль упругости, система нагружения, актюатор, емкостной датчик, силовая ячейка, трансформатор силы

Для цитирования: И.В. Красногоров, А.А. Русаков, В.Н. Решетов. Использование трансформатора силы для улучшения метрологических характеристик инструментального нанотвердомера. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 7–8. С. 434–442. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.434.442>

Received: 3.11.2023 | Accepted: 8.11.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.434.442>

Original paper

USE OF A FORCE TRANSFORMER TO IMPROVE THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF NANOHARDNESS TESTER

I.V.Krasnogorov¹, Director General, / ivkrasnogorov@mail.ru

A.A.Rusakov¹, Researcher, ORCID: 0000-0001-5702-1353

V.N.Reshetov¹, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, ORCID: 0000-0002-8426-5991

Abstract. The equipment for instrumental nanoindentation traditionally represents a product containing a displacement sensor and a force-generating element operating in the nanoscale range of displacements and forces. At the same time, all working elements of the nanoindenter have a system of elastic attachment to a rigid body. However, part of the force generated by the actuator is spent on the deformation of the suspension system of the movable elements. This paper considers the design of a nanohardness tester, in which a force

¹ ООО "НаучСпецПрибор", Троицк, Россия / Advanced Scientific Devices LLC, Russian Federation, Troitsk, Russia



cell is introduced that allows measuring the real value of the indentation force without the need to take into account the deformation losses of the elastic elements of the nanohardometer. Such modification of the product, according to the authors, allows to significantly increase the accuracy of measuring the mechanical properties of soft materials and thin coatings.

Keywords: instrumental indentation, nanoindenter, hardness, modulus of elasticity, loading system, actuator, capacitive sensor, power cell, force transformer

For citation: I.V. Krasnogorov, A.A. Rusakov, V.N. Reshetov. Use of a force transformer to improve the metrological characteristics of nanohardness tester. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 7–8. PP. 434–442. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.434.442>.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании силозадающих узлов в приборах для прецизионного измерения механических свойств, называемых нанотвердомерами или наноиндентометрами, одним из наиболее распространенных способов контроля нагрузки на индентор является электромагнитный актуатор [1]. При этом для измерения перемещения подвижной части, связанной с индентором, часто используется емкостной дифференциальный датчик. Применяемые совместно, данные решения позволяют с некоторыми ограничениями регистрировать диаграмму зависимости приложенной нагрузки от смещения индентора в процессе его вдавливания в поверхность образца и измерять механические свойства методом инструментального индентирования [2, 3].

Техническая новизна предлагаемого решения заключается в использовании комбинированного измерительного модуля, позволяющего минимизировать массу подвижной части прибора и осуществлять регистрацию с помощью емкостных датчиков не только перемещения индентора, но и силу его взаимодействия с исследуемым материалом. Введение в конструкцию прибора силоизмерительной ячейки, включенной между электромагнитным актуатором и алмазным индентором, позволило существенно повысить разрешающую способность нанотвердомера по каналу силы прижима при сохранении диапазона доступных глубин индентирования на уровне не менее 100 мкм. Диапазон максимальных нагрузок при индентировании при этом составляет порядка 100 мН, что не критично при использовании такого рода прибора в реальном нанодиапазоне глубин внедрения и микродиапазоне усилий прижима.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО НАНОТВЕРДОМЕРА

Твердость и модуль упругости являются ключевыми характеристиками практически любого

INTRODUCTION

When designing force-loading assemblies in instruments for precision measurement of mechanical properties, called nanohardness testers or nanoindentors, one of the most common ways to control the load on the indenter is an electromagnetic actuator [1]. A capacitive differential sensor is often used to measure displacement of the movable part associated with the indenter. Used together, these solutions allow, with some limitations, to record the diagram of the dependence of the applied load on the indenter displacement during indentation into the sample surface and to measure mechanical properties by the tool indentation method [2, 3].

The technical novelty of the proposed solution is in the use of a combined measuring module, which allows to minimise the moving part mass of the device and to register with the help of capacitive sensors not only indenter movement, but also the force of interaction with the material under study. The introduction of a force-measuring cell included between the electromagnetic actuator and the diamond indenter in the device design allowed to significantly increase the resolving power of the nanohardness tester in the channel of pressure force while maintaining the range of available indentation depths at the level of at least 100 μm . The range of maximum indentation loads is about 100 mN, which is not critical for the use of such a device in the real nanoscale range of indentation depths and the microrange of pressing forces.

PECULIARITIES OF THE DYNAMIC NANOHARDNESS TESTER DESIGN

Hardness and modulus of elasticity are key characteristics of almost any structural material. The most common method of hardness measurement today is the Vickers hardness method. In this method, indentation with a given load is applied to the surface of a specimen, and after that, the geometric dimensions of this indentation (namely, the lengths of the diagonals) are measured using visualisation tools and the area is calculated [4]. The hardness of the material is calculated as the ratio of the applied load to the area

конструкционного материала. Наиболее распространенным способом измерения твердости сегодня является метод измерения твердости по Виккерсу. В рамках данного метода на поверхность образца наносится отпечаток с заданной нагрузкой, после чего геометрические размеры этого отпечатка (а именно длины диагоналей) измеряются с использованием средств визуализации и вычисляется его площадь [4]. Твердость материала рассчитывается как отношение приложенной нагрузки к площади остаточного отпечатка. Модуль Юнга обычно определяют акустическими методами, исходя из скорости звука в цилиндрическом образце и плотности материала [5].

Метод инструментального индентирования [2] изначально разрабатывался для измерения твердости и модуля Юнга материалов при тех уровнях нагрузки, когда измерение площади отпечатка невозможно в силу дифракционных ограничений оптической микроскопии. Однако постепенно он распространился не только на область микроскопических нагрузок, но и в диапазон нагрузок индентирования вплоть до 10 Н, что заметно превышает минимальные нагрузки микротвердомеров по методу Виккерса, находящиеся в диапазоне сотых и десятых долей ньютона.

Используемые сегодня глубины индентирования в нанотвердомерах опустились ниже 10 нм, а размеры отпечатков стали меньше 100 нм, при стабильном радиусе кривизны острия вершины пирамиды индентора менее 30 нм. Разрешение измерительных систем таких приборов по перемещению и силе составляет доли нм и мкН, максимальные глубины погружения и силы прижима индентора – десятки мкм и доли ньютона. При работе в нанодиапазоне с усилиями прижима менее 50 мН и глубинами индентирования до 10 мкм чаще всего используются электростатические актюаторы, конструктивно совмещенные с емкостным датчиком перемещения [6]. В микродиапазоне популярной является схема с электромагнитным актюатором и дифференциальным конденсаторным датчиком перемещения [7]. Использование силоизмерительной ячейки, выполняющей роль трансформатора силы, позволяет совместить достоинства чисто емкостной конструкции с комбинированной и, в приборах с электромагнитным актюатором, достичь разрешения по силе характерного для чисто емкостных схем.

Приборы для инструментального индентирования часто называют наноинденторами или нанотвердомерами. Наноинденторы

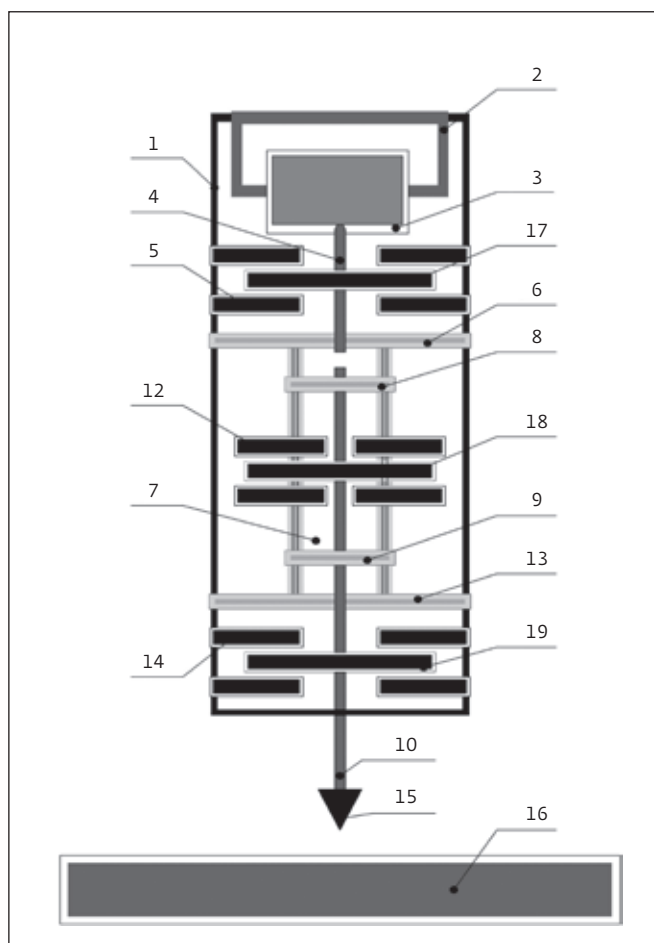


Рис.1. Схематическое изображение индентирующего модуля высокоточного наноиндентора

Fig.1. Schematic diagram of the high-precision nanoindenter indentation module

of the residual indentation. Young's modulus is usually determined by acoustic methods, based on the sound speed in a cylindrical specimen and density of the material [5].

The tool indentation method [2] was originally developed to measure hardness and Young's modulus of materials at those load levels when measurement of the indentation area is impossible due to diffraction limitations of optical microscopy. However, it gradually spread not only to the area of microscopic loads, but also to the range of indentation loads up to 10 N, which noticeably exceeds the minimum loads of Vickers microhardness testers in the range of hundredths and tenths of Newton.

The indentation depths used today in nanohardness testers have fallen below 10 nm, and indentation sizes have become less than 100 nm, with a stable radius of curvature of the tip of the indenter pyramid tip less than 30 nm. Resolution of measuring systems of such devices



размещают на виброизолирующих платформах и помещают внутрь термоизолирующих боксов. Обычно именно уровень сейсмического шума и температурные вариации в помещении являются факторами, ограничивающими точность измерений и доступный уровень усилий при индентировании. Для снижения влияния вибрационных помех уменьшают массу подвижных элементов, связанных с алмазным индентором, что позволяет повысить резонансную частоту системы подвеса при неизменной жесткости удерживающих индентор мембран. Обсуждаемое техническое решение с силовой ячейкой, минимизируя массу подвижной системы индентора, решает в том числе и данную задачу.

Отличительными особенностями разработанной конструкции высокоточного нанотвердомера является использование единственного электромагнитного актюатора и двух независимых емкостных датчиков, измеряющих перемещение актюатора и алмазного индентора, а также наличие силовой ячейки с третьим дифференциальным емкостным датчиком перемещения, позволяющим измерять силу прижима.

Предлагаемая конструкция нанотвердомера состоит из жесткого корпуса 1 с закрепленным на нем актюатором 2 с подвижной катушкой 3, связанной со штоком 4, емкостного датчика 5 и индентора 15, смонтированного на свободном конце штока 10. Измерительный индентационный модуль нанотвердомера снабжен силовой ячейкой 7, закрепленной внутри корпуса 1 прибора на упругих подвесах мембранного типа 6 и 13, к верхней части которой прикреплен промежуточный подвижный шток 4, связанный с подвижной катушкой 3 актюатора 2 и с емкостным датчиком 5 актюатора 2, подвижная обкладка 17 которого закреплена на промежуточном подвижном штоке 4, для измерения перемещения корпуса силовой ячейки 7 по отношению к корпусу 1 прибора. Внутри корпуса силовой ячейки 7 смонтированы гибкие мембраны 8 и 9, на которых, соосно промежуточному штоку 4, закреплена рабочая шток 10 с алмазным индентором 15 на конце и емкостный датчик силы 12, осуществляющий измерение силы взаимодействия индентора и поверхности, контролируя перемещение рабочего штока 10 по отношению к корпусу силовой ячейки 7. Под нижним упругим подвесом 9 размещен емкостный датчик 14, для измерения величины перемещения рабочего штока 10 по отношению к корпусу 1 прибора и определения глубины

in terms of displacement and force is fractions of nm and μN , the maximum depths of indenter immersion and pressing force are tens of μm and fractions of Newton. When working in the nanoscale range with clamping forces less than 50 mN and indentation depths up to 10 μm , electrostatic actuators combined with a capacitive displacement sensor are most often used [6]. In the micro range, the scheme with an electromagnetic actuator and a differential capacitor displacement sensor is the most popular [7]. The use of a force-measuring cell acting as a force transformer makes it possible to combine the advantages of a purely capacitive design with a combined design and, in devices with an electromagnetic actuator, to achieve a force resolution characteristic of purely capacitive circuits.

Instrument indentation devices are often referred to as nanoindenters or nanohardness testers. Nanoindenters are fitted on vibration-isolated platforms and placed inside thermally insulated boxes. Typically, it is the seismic noise level and temperature variations in the room that limit measurement accuracy and available indentation force level. To reduce influence of vibration interference, the mass of the moving elements associated with the diamond indenter is reduced, which makes it possible to increase the resonance frequency of the suspension system with unchanged stiffness of the membranes holding an indenter. The discussed technical solution with a power cell, minimising the weight of the moving indenter system, solves this problem as well.

The distinctive features of the developed design of the high-precision nanohardness tester are the use of a single electromagnetic actuator and two independent capacitive sensors measuring displacement of the actuator and a diamond indenter, as well as the presence of a power cell with a third differential capacitive displacement sensor, which allows measuring the clamping force.

The proposed design of the nanohardness tester consists of a rigid body 1 with an actuator 2 fixed on it with a moving coil 3 connected with a rod 4, a capacitive sensor 5 and an indenter 15 mounted on the free end of the rod 10. The measuring indentation module of the nanohardness tester is provided with a power cell 7 fixed inside the body 1 of the device on elastic hangers of membrane type 6 and 13, to the upper part of which is attached an intermediate movable rod 4 connected with the moving coil 3 of the actuator 2 and with the capacitive sensor 5 of the actuator 2, the movable lining 17 of which is fixed on the intermediate movable rod 4, for measuring the movement of the body of the power cell 7 in relation to the body 1 of the device. Inside the body of the power cell 7 are mounted flexible membranes 8 and 9, on which, coaxially with the intermediate rod 4, is fixed a working rod 10 with a diamond indenter 15 at the end and a capacitive force sensor 12, which measures interaction force between

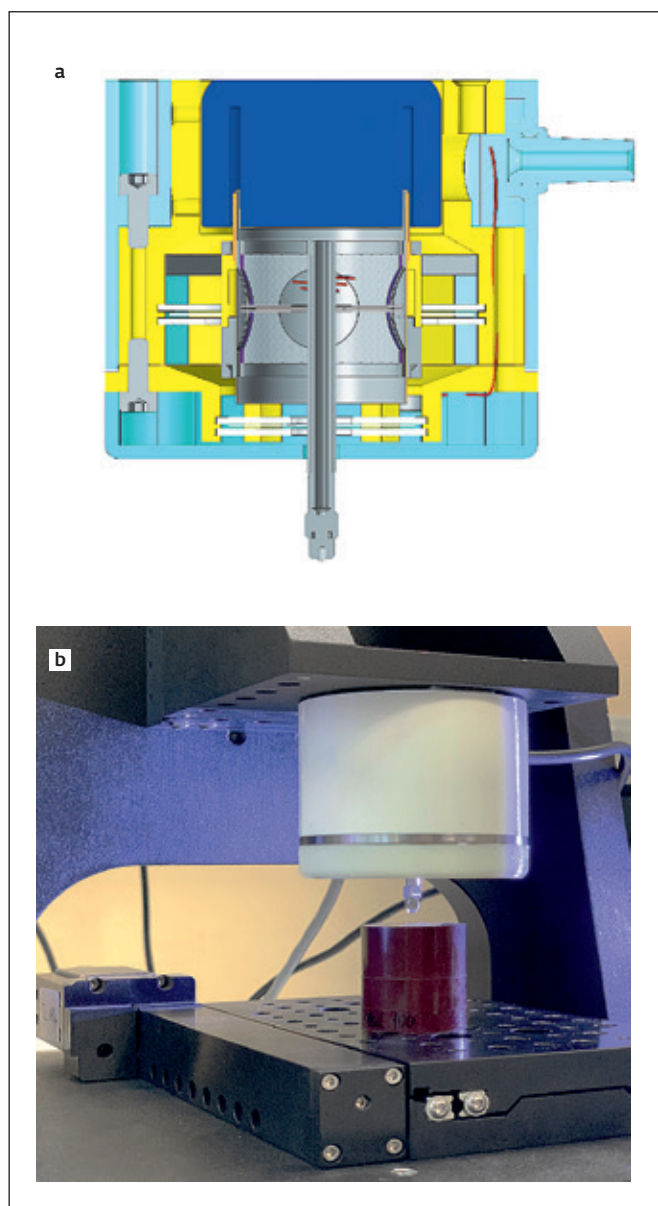


Рис. 2. а – разрез 3D-модели индентирующего модуля высокоточного наноиндентора; б – фотография в сборе с предметным столиком и образцом

Fig.2. a – 3D model section of the indentation module of the high-precision nanoindenter; b – image of assembly with slide and sample

погружения индентора 15 в тестируемый материал 16. Обкладки 18 и 19 емкостного датчика силы 12 и емкостного датчика 14 глубины перемещения закреплены на подвижном рабочем штоке 10.

Данная кинематическая схема позволяет уменьшить массу элементов, непосредственно связанных с алмазным индентором, и отделяет основной тепловыделяющий элемент

the indenter and the surface, controlling movement of the working rod 10 in relation to the body of the power cell 7. A capacitive sensor 14 is placed under the lower elastic suspension 9 to measure movement value of the working rod 10 in relation to the body 1 of the device and to determine the immersion depth of the indenter 15 in the material under test 16. The linings 18 and 19 of the capacitive force sensor 12 and the capacitive sensor 14 of the depth of movement are fixed on the moving working rod 10.

This kinematic scheme makes it possible to reduce the mass of the elements directly connected with the diamond indenter and separates the main heat-generating element of the nanoindenter (electromagnetic actuator coil) from the capacitive sensors measuring force and embedding depth. A three-dimensional model and a photograph of the indentation module built in accordance with the principles described above are shown in Fig.2.

During loading and unloading under the action of the actuator 2 through the intermediate rod 4 there is a movement of the force measuring cell 7 and indenter 15 in direction of the tested material 16. After mechanical contact of the indenter 15 fixed on the working rigid rod 10 with the surface of the sample 16 there is deformation of the force cell 7 and with the help of the capacitive sensor 18 there is control of the pressing force of the indenter 15 during the process of tool indentation. The signal from the lower capacitive sensor 19 is used to measure depth of the indenter into the material. The signal from the upper capacitive sensor 17 is used to control movement of the power cell body. This measuring channel is redundant and serves for verification of data received from the sensors of plunging depth and pressing force. It also allows you to control the amplitude and phase of the oscillatory motion of the power cell when the instrument is operating in the dynamic contact stiffness measurement mode (DMA).

Three differential capacitive sensors measuring the depth of the indenter immersion into the material under test, the level of deformation of the elastic elements of the force-loading cell and the movement of the electromagnetic actuator allow obtaining the values of mechanical properties not only in the quasi-static deformation mode, but also in the dynamic testing mode, when the mechanical properties are measured by superimposing sinusoidal deformation on the standard load-depth curve (DMA). As shown in laboratory tests, the proposed kinematic scheme achieves the following performance limits when performing mechanical property measurements:

- working range of forces applied during indentation – 100 mN;
- digital resolution of the force measurement channel – 0.01 μ N;



нанотвердомера (катушку электромагнитного актюатора) от емкостных датчиков, измеряющих усилие и глубину внедрения. Трехмерная модель и фотография индентационного модуля, построенного в соответствии с описанными выше принципами, приведены на рис.2.

При осуществлении нагружения и разгрузки под действием актюатора 2 через промежуточный шток 4 происходит перемещение силоизмерительной ячейки 7 и индентора 15 в направлении тестируемого материала 16. После механического контакта индентора 15, закрепленного на рабочем жестком штоке 10, с поверхностью образца 16 происходит деформация силовой ячейки 7 и с помощью емкостного датчика 18 осуществляют контроль силы прижима индентора 15 во время процесса инструментального индентирования. Сигнал с нижнего емкостного датчика 19 при этом используется для измерения глубины погружения индентора в материал. Сигнал с верхнего емкостного датчика 17 используется для контроля перемещения корпуса силовой ячейки. Данный измерительный канал является избыточным и служит для верификации данных, получаемых с датчиков глубины погружения и силы прижима. Также он позволяет контролировать амплитуду и фазу колебательного движения силовой ячейки при работе прибора в режиме динамического измерения контактной жесткости (DMA).

Три дифференциальных емкостных датчика, измеряющих глубину погружения индентора в тестируемый материал, уровень деформации упругих элементов силозадающей ячейки и перемещение электромагнитного актюатора, позволяют получать значения механических характеристик не только в режиме квазистатической деформации, но и в режиме динамического тестирования, когда механические свойства измеряются путем наложения синусоидальной деформации на стандартную кривую "нагрузка - глубина" (DMA). Как показали лабораторные испытания, предлагаемая кинематическая схема позволяет достичь следующих предельных характеристик при выполнении измерений механических свойств:

- рабочий диапазон усилий, прикладываемых при индентировании - 100 мН;
- цифровое разрешение канала измерения силы - 0,01 мкН;
- рабочий ход алмазного индентора в процессе индентирования - 100 мкм;

- working stroke of the diamond indenter during indentation - 100 μm ;
- digital resolution of the displacement measurement channel - 0.01 nm;
- dimensions of the indentation module - about one cubic decimetre;
- weight - less than one kilogram;
- electrical power consumed by the module - about one watt.

The minimum loads and indentation depths described for this type of instrument are generally consistent with natural seismic noise conditions in absence of industrial interference and the use of a good vibration isolation system. The actual noise level of the force and displacement channels is dependent on the specific operating conditions of the instrument and is labelled "lab dependent". The digital resolution of the force and displacement channels is usually an order of magnitude lower than the declared "lab dependent" noise level.

The proposed technical solution consists in a light-weight system of diamond indenter suspension, control of the clamping force and measurement of the nanohardness tester oscillating system parameters during both conventional and dynamic tool indentation. At the same time, measuring accuracy of load-depth curve is increased and the functional capabilities of the nanohardness tester are expanded in terms of measuring the mechanical properties of viscoelastic materials, including polymeric and biological ones. This is achieved by increasing sensitivity to the force occurring in the area of contact of the indenter with the sample and absence of influence of the free stroke of the rod on the force-measuring cell signal.

Analysis of the dynamic model shows that elasticity coefficient of the suspension of the power cell can be 100 times greater than elasticity coefficient of the working rod suspension in the power cell. The weight of the working rod with the indenter is 10 times less than the weight of the power cell and the actuator coil. Thus, the resonant frequency of the suspension system of the power cell is 3 times higher than the resonant frequency of the system consisting of the rod with the indenter, the centre lining of the differential capacitor and the flexible membranes of the power cell.

The developed measuring module of the high-precision nanohardness tester has possibility to control dynamic behaviour of the indenter suspension system in the frequency band exceeding the frequency of the main resonance of the indenter. The control of the phase and amplitude of forced oscillations of the indenter is possible due to the joint processing of signals from three capacitive sensors measuring the movement of the main elements involved in the indentation process. The execution of the force-measuring cell in the form of

- цифровое разрешение канала измерения перемещения – 0,01 нм;
- габариты индентационного модуля – около одного кубического дециметра;
- вес – менее одного килограмма;
- потребляемая модулем электрическая мощность – около одного ватта.

Приводимые в описании такого рода приборов рабочие характеристики по части минимальных нагрузок и глубин индентирования обычно соответствуют условиям природного сейсмошума в отсутствие промышленных помех и использования хорошей системы виброизоляции. Реальный уровень шума по каналам силы и перемещения зависит от конкретных условий эксплуатации прибора, и его маркируют, как lab dependent. Цифровое разрешение по каналу силы и смещения при этом обычно на порядок меньше декларируемого lab dependent уровня шума.

Предлагаемое техническое решение состоит в облегченной системе подвеса алмазного индентора, контроле силы прижима и измерении параметров колебательной системы нанотвердомера как при обычном, так и при динамическом инструментальном индентировании. При этом повышается точность измерения кривой "нагрузка – глубина" и расширяются функциональные возможности нанотвердомера в части измерения механических свойств вязкоупругих материалов, в том числе полимерных и биологических. Это достигается за счет увеличения чувствительности к силе, возникающей в области контакта индентора с образцом, и отсутствия воздействия свободного хода штока на сигнал силоизмерительной ячейки.

Анализ динамической модели показывает, что коэффициент упругости подвеса силовой ячейки может быть в 100 раз больше коэффициента упругости подвеса рабочего штока в силовой ячейке. Масса рабочего штока с индентором в 10 раз меньше массы силовой ячейки и катушки актюатора. Таким образом, резонансная частота системы подвеса силовой ячейки оказывается в 3 раза больше резонансной частоты системы, состоящей из штока с индентором, центральной обкладки дифференциального конденсатора и гибких мембран силовой ячейки.

Разработанный измерительный модуль высокоточного нанотвердомера имеет возможность контроля динамического поведения системы подвеса индентора в полосе частот, превышающей частоту основного резонанса индентора. Контроль фазы и амплитуды

a rigid body with flexible membranes located inside, on which a carbon rod with an indenter is fixed, provides movement of the rod inside the force cell along its axis due to elasticity of the membranes and makes it possible to carry out instrumental indentation of both soft and hard materials.

Installation of three capacitive sensors with ability to measure the immersion depth, pressure force and displacement of the power cell provides full control of the oscillating system included in the nanohardness tester, with ability to measure the dynamic characteristics of the indenter suspension system and isolation of viscoelastic forces arising in the interaction area between the indenter and the tested material. This capability is particularly relevant for mechanical property mapping and dynamic indentation, when a sinusoidal alternating force is applied to the progressive motion of the indenter. The presence of three capacitive sensors makes it possible to control behaviour of the actuator by controlling movements of the force-measuring cell through measurements of the cell's displacement relative to the device body. Adding the capacitive sensor measuring the displacements of the force cell allows us to fully describe the behaviour of the paired resonant system of this nanohardness tester and to take into account changes in their behaviour during the indentation process due to the influence of contact stiffness on the resonant properties of the dynamic nanohardness tester. The movable system of a nanohardness tester for tool indentation consists of two coupled oscillating circuits – the suspension system of the power cell with its resonant frequency and the system consisting of the rod with the indenter and flexible membranes of the power cell with the other resonant frequency. Threefold separation of resonance frequencies facilitates measurements of dynamic characteristics of the materials under study. The use of different force-measuring cells as a mechanical transformer that transforms macroscopic displacement of the actuator into a microscopic force of the indenter pressing against the surface of the tested material, allows to produce devices adapted to the use when working with different materials according to a single design scheme. The use of a soft force cell is convenient when working with biological and polymeric materials that require measurement of small forces at large indenter displacements.

CONCLUSIONS

The new design of a highly sensitive nanohardness tester considered in this work demonstrates possibility of achieving working loads at indentation at the level of micronewtons. This range of the main operating characteristic of the device will allow to carry out studies of mechanical properties with spatial resolution in the sample plane better than 50 nm, and in depth about 10 nm, will allow to operate with heterogeneous



вынужденных колебаний индентора возможен благодаря совместной обработке сигналов с трех емкостных датчиков, измеряющих перемещение основных элементов, участвующих в процессе индентирования. Выполнение сило-измерительной ячейки в виде жесткого корпуса с расположенными внутри гибкими мембранами, на которых закреплен карбоновый шток с индентором, обеспечивает перемещение штока внутри силовой ячейки вдоль своей оси за счет упругости мембран и позволяет осуществлять инструментальное индентирование как мягких, так и твердых материалов.

Установка трех емкостных датчиков с возможностью измерения глубины погружения, силы прижима и перемещения силовой ячейки обеспечивает полный контроль колебательной системы, входящей в состав нанотвердомера, с возможностью измерения динамических характеристик системы подвеса индентора и выделения вязкоупругих сил, возникающих в области взаимодействия индентора с тестируемым материалом. Такая возможность особенно актуальна при проведении картографирования механических свойств и динамическом индентировании, когда

materials and thin functional coatings on both soft and hard substrates.

Instrumentation for tool indentation has reached the development level at it is relevant to use it both in scientific laboratories and in real production conditions for the control of machine-building products. The main technical difficulties of the instrumental implementation of the tool indentation method have been successfully overcome, the data obtained are well interpreted, the level of automation of the measurement process is high, and one operator can operate several instruments at once. Regular international comparisons and availability of a domestic standard in the field of tool indentation and standard samples with assigned characteristics make this method convenient for wide application.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Белоус А.И., Паньков А.А.

Корпусирование микроэлектронных приборов. Технологии, конструкции, оборудование

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 558 с. ISBN 978-5-94836-668-5

Цена 1960 руб.

Издано при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

В книге представлены систематизированные результаты детального анализа современного состояния и тенденций развития технологий корпусирования (сборки) микросхем, полупроводниковых приборов, силовых модулей и систем в корпусе. Книга ориентирована на достаточно широкую аудиторию – от студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов, специализирующихся в области микроэлектроники, до инженеров-разработчиков микросхем и электронных систем на их основе, инженеров-технологов сборочных производств, сотрудников исследовательских лабораторий и академических институтов, руководителей предприятий радиоэлектронной отрасли. В одиннадцати тематических главах последовательно, на конкретных примерах рассмотрены все основные этапы реализации технологического маршрута процесса корпусирования – от этапа формирования многоуровневой металлизации на кристалле до герметизации и тестирования микроэлектронных приборов. Кроме описания технологических режимов, конструктивных особенностей, использованных материалов, режимов проведения технологических операций представлено также описание базового состава и технических характеристик используемого на каждом этапе технологического и измерительного оборудования. Впервые в отечественной научно-технической печати подробно изложены теоретические основы методов прецизионного измерения одного из важнейших контролируемых параметров микросхем – теплового сопротивления, представлено описание основных экспериментальных методов его измерения, описаны концепции, методы, инструменты и оборудование для калибровки испытуемых устройств в диапазоне температур. Также впервые в отечественной научно-технической печати детально рассмотрены современные концепции, технологии, методы и инструменты тестирования собранных в корпус микросхем, систем в корпусе и систем на пластине.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru

на поступательное движение индентора накладывается знакопеременное синусоидальное воздействие. Наличие трех емкостных датчиков позволяет управлять поведением актюатора благодаря контролю за движениями силоизмерительной ячейки через измерения перемещения ячейки по отношению к корпусу устройства. Добавление емкостного датчика, измеряющего перемещения силоизмерительной ячейки, позволяет полноценно описать поведение парной резонансной системы данного нанотвердомера и учесть изменение их поведения в процессе индентирования из-за влияния контактной жесткости на резонансные свойства динамического нанотвердомера. Подвижная система нанотвердомера, осуществляющего инструментальное индентирование, представляет собой два связанных колебательных контура – системы подвеса силовой ячейки со своей резонансной частотой и системы, состоящей из штока с индентором и гибких мембран силовой ячейки, с другой резонансной частотой. Трехкратное разнесение резонансных частот облегчает измерения динамических характеристик исследуемых материалов. Использование различных силоизмерительных ячеек в качестве механического трансформатора, переводящего макроскопическое перемещение актюатора в микроскопическую силу прижима индентора к поверхности исследуемого материала, позволяет по единой конструктивной схеме изготавливать приборы, адаптированные к использованию при работе с различными материалами. Использование мягкой силовой ячейки удобно при работе с биологическими и полимерными материалами, требующими измерения малых сил при больших перемещениях индентора.

ВЫВОДЫ

Рассмотренная в данной работе новая конструкция высокочувствительного нанотвердомера демонстрирует возможность достижения рабочих нагрузок при индентировании на уровне единиц мкН. Данный диапазон основной рабочей характеристики прибора позволит проводить исследования механических свойств с пространственным разрешением в плоскости образца лучше 50 нм, а по глубине – порядка 10 нм, позволит работать с гетерогенными материалами и тонкими функциональными покрытиями, находящимися как на мягких, так и на твердых подложках.

Приборы для инструментального индентирования достигли того уровня развития, при котором актуально использование их как в научных

лабораториях, так и в условиях реального производства для контроля машиностроительных изделий. Основные технические сложности приборной реализации метода инструментального индентирования сегодня успешно преодолены, получаемые данные хорошо интерпретируются, высок уровень автоматизации процесса измерения, и один оператор может обслуживать сразу несколько приборов. Проводимые регулярные международные сличения и наличие отечественного эталона в области инструментального индентирования и стандартных образцов с приспосабливаемыми характеристиками делает данный метод удобным для широкого применения.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Решетов В.Н., Красногоров И.В., Соловьев В.В., Гладких Е.В., Усейнов А.С. Оборудование для инструментального индентирования принципы работы и особенности конструирования. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15. № 7-8. С. 466-476. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.466.476>
2. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) ГСИ. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.
3. BS EN ISO 14577: 2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
4. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения.
5. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. Обозначение: ГОСТ Р 52731-2007.
6. Fischer-Cripps A.C. Nanoindentation. Springer New York, 2011. 287 p.
7. Электронный источник: <http://nanovea.com/wp-content/themes/wp-nanovea/brochures/mechanicaltesters.pdf>



КОМПАНИЯ ТИСЧУМ ПРЕДСТАВИЛА СВОИ РАЗРАБОТКИ НА ВЫСТАВКЕ NDT RUSSIA



24 октября в МВЦ "Крокус Экспо" прошло ключевое событие в России и странах ближнего зарубежья в области неразрушающего контроля – выставка NDT Russia. Ежегодно выставка собирает ведущих производителей, представляющих широкий ассортимент оборудования для осуществления неразрушающего контроля различными методами. Как всегда, выставку посетило более 6 000 специалистов 59 регионов России, а также стран ближнего зарубежья, из которых 1 353 человека интересовались оборудованием для неразрушающего контроля.

Выставка NDT Russia проходила в одном зале с выставкой испытательного и контрольно-измерительного оборудования Testing&Control.

В этом году в выставке приняли участие более 50 компаний и были представлены стенды как постоянных участников, так и новых компаний. Помимо этого, на выставке представили свою продукцию компании из Китая и Ирана. Выставку посетили специалисты из 59 регионов России и стран ближнего зарубежья. Была проведена насыщенная деловая программа выставки: в течение двух дней проходит конференция по вопросам неразрушающего контроля и семинары специалистов компаний-участников: ООО "Ньюком-НДТ", ФГБНУ ТИСЧУМ, ООО "Энергодиагностика".

Активное участие в выставке приняла компания ГНЦ РФ ТИСЧУМ, которая представила образцы измерительных приборов серии "НаноСкан":

Сканирующий зондовый микроскоп "НаноСкан-3D"

Поддерживает четыре режима работы:

- динамический режим сканирования с шагом по горизонтали 1,5 мкм и по вертикали 0,15 нм;
- режим идентификации/склерометрии с максимальной нагрузкой до 5 г;
- силовая спектроскопия.

Диапазоны измеряемых значений:

- поле сканирования: до 100 мкм в горизонтальной плоскости, до 10 мкм – по вертикали;
- индентор: пирамида Берковича.

Нанотвердомер "НаноСкан-4D"

"НаноСкан-4D" – базовая модель нанотвердомера реализует основные методики измерения твердости, модуля упругости (Юнга) и другие

механические параметры. В этой модели реализованы методы статического индентирования, динамического индентирования и царапания. Нанотвердомер позволяет измерять рельеф поверхности в режиме контактного или полуконтактного профилометра. Встроенный оптический микроскоп обеспечивает высокую точность взаимного позиционирования индентора и объекта исследований. Для данной модели существуют дополнительные узлы и датчики, расширяющие возможности базовой модели.

Представлены новые разработки:

Автоматизированный твердомер Виккерса "НаноСкан-HV"

NANOSCAN-HV – первый отечественный автоматизированный микро-твердомер, позволяющий проводить измерения микротвердости по Виккерсу. Сертифицирован и допущен к применению в сфере обеспечения единства измерений. В приборе реализованы алгоритмы автоматического нанесения массивов индентов и измерения границ отпечатков, позволяющие проводить различные измерения согласно требованиям пользователя, а также определять глубины поверхностной закалки (SHD, Surface Hardening Depth), цементации (CHD, Case Hardening Depth) и другие характеристики.

Важной частью представленных разработок является программное обеспечение измерительных комплексов. Оно включает в себя:

- автоматизированное проведение измерений методами инструментального наноиндентирования, склерометрии, силовой спектроскопии, сканирующей зондовой и атомно-силовой микроскопии;
- возможность задания параметров тестов с помощью оптического микроскопа или по изображению рельефа поверхности, полученного методами СЗМ/АСМ;
- высокопроизводительная пакетная обработка экспериментальных данных наноиндентирования с применением новейших методов параллельных вычислений;
- возможность гибкой настройки протокола индентирования;
- язык макрокоманд, позволяющий реализовывать произвольную последовательность измерений в автоматическом режиме;
- широкий набор математических функций, позволяющих проводить различные преобразования, построение спектров, фильтрацию полученных двух- и трехмерных данных, а также аппроксимацию кривых, построение двумерных (топографических) и трехмерных (объемных) карт распределения твердости и модуля упругости в зависимости от пространственных координат;
- расчет измеряемых значений механических свойств и параметров шероховатости в полном соответствии с действующими стандартами (ГОСТ и ISO).

Представленное оборудование и программное обеспечение вызвали живой интерес посетителей выставки NDT Russia. Ждем встреч с компаниями ТИСЧУМ в следующем году с новыми разработками, идеями и приборами.