



# ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

## ENSURING OF METROLOGICAL RESPONSIBILITY OF DISPLACEMENT MEASUREMENTS IN NANOMETER RANGE

УДК 681.2.08, ВАК 05.11.15

А.Потемкин\*  
A.Potemkin\*

**Измерительный метрологический набор на основе динамической меры, разработанный ООО "НАНО-АТТО Метрия", – технологически сложный и наукоемкий продукт, многократно превосходящий решения на основе пьезокерамики. Динамические калибры позволяют обеспечить опережающее развитие метрологии по сравнению с разрабатываемыми нанотехнологиями.**

The metrological measuring set with the dynamic gauge developed by NANO-ATTO Metria is a technically complex and knowledge-intensive product, which is many times superior to metrological devices based on piezoceramics. Dynamic gauges provide the advanced development of metrology in comparison with the nanotechnology.

**П**о мере развития техники зондовой микроскопии и наноэлектроники возникла необходимость разработки эталонов для начала нанометрового диапазона, которые нельзя было изготовить даже с помощью самых передовых нанотехнологий (1-10 нм). Решение данной проблемы стало возможно лишь при создании эталонов принципиально нового типа – не статических как было в предыдущих столетиях, а динамических (управляемо перемещающихся).

В США было изготовлено устройство Hector 100 из магнитострикционного материала, управляемое внешним магнитным полем (прототип динамического калибра). После калибровки данного устройства в одной точке нанометрового диапазона его можно было использовать для калибровки других измерительных приборов. Из-за не гарантируемой времененной стабильности магнитных характеристик, Hector 100 было необходимо регулярно калибровать более высокоточным и стабильным устройством. Эта разработка не получила дальнейшего развития и применения по следующим причинам:

- тепловой нагрев устройства, создающий магнитное поле, и последующий термический дрейф конструкции такого динамического калибра;
- гистерезис и нелинейность;
- отсутствие долговременной стабильности магнитных свойств;
- чувствительность к внешним магнитным полям, экранировка которых особенно в инфра- и низкочастотном диапазонах затруднена;
- возможность передачи размера только в одной точке нанометрового диапазона.

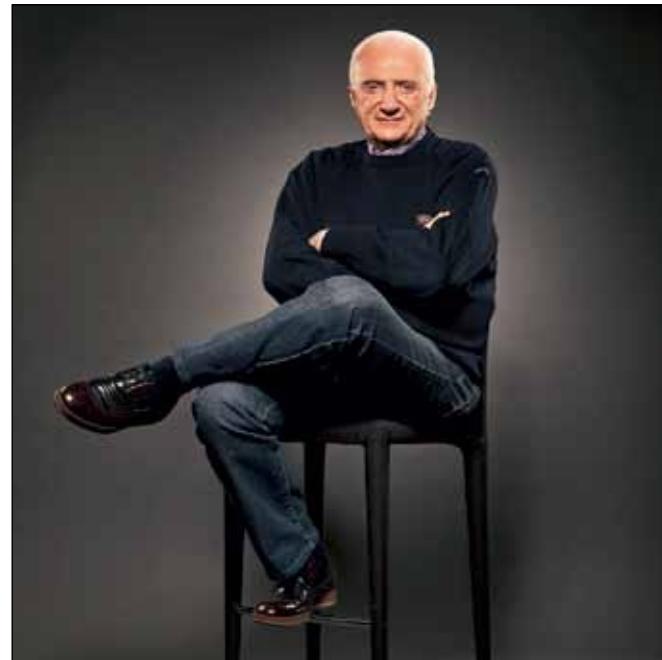
В публикации [1] был приведен экспериментальный результат, подтверждающий возможность калиброванного измерения перемещения в одной точке начала нанометрового диапазона. Следует отметить обязательность калибровки данного эталона на более высокоточной установке при калибровке им других измерительных установок или наличия гарантии стабильности пьезосвойств во всем межпроверочном интервале.

\* ООО "НАНО-АТТО Метрия" / NANO-ATTO Metria.

Поставленную задачу – проведение калибровки одним динамическим калибром в одной точке нанометрового диапазона – НПП "Центр перспективных технологий" МГУ им. М.В.Ломоносова решил правильно. Однако дешевизна и простота изготовления динамической меры на основе пьезокерамической пластины не обеспечивают метрологическое сопровождение инструмента-рия наноиндустрии, в том числе и сканирующей зондовой микроскопии. Существующий функционал данной измерительной меры, защищенный патентом и переданный в общенародное безвозмездное пользование, является лишь образцом нового типа отечественного динамического нанометрового эталона, но не выдерживает нагрузку общественной полезности.

Насколько честно предлагать такой эталон нанометра общественности для проведения калибровки технологического оборудования, успокоиться и не пытаться усовершенствовать динамическую меру, говорить о наличии качественного эталона нанометра?

Пьезокерамика при подаче заданного напряжения обеспечивает перемещение меры на одну заданную величину, но после снятия напряжения в исходную точку не возвращается. При подаче другой величины напряжения нарушается калибровка самой



Александр Потемкин  
Alexander Potemkin

меры. Соответственно, для выполнения калибровки прибора или оборудования необходим целый набор мер такого типа на разные виды перемещения.

**W**ith the development of the probe microscopy and nanoelectronics, it has emerged the need to develop standards for the beginning of the nanometer range, which couldn't be made by means of the most advanced nanotechnologies (1-10 nm). The solution to this problem became possible only with creation of the standards of a fundamentally new type, not a static as it was in previous centuries, but dynamic (with a controlled displacement).

In the United States the Hector 100 device of magnetostrictive material controlled by the external magnetic field (prototype of dynamic gauge) has been manufactured. After calibration of this device at one point in nanometer

range, it can be used to calibrate other measuring devices. To reduce the uncertainty of the calibration because of not guaranteed stability in time of magnetic characteristics, this device should be regularly calibrated using more precise and stable instruments. This solution has not received further development and application for the following reasons:

- thermal heating of the device that creates a magnetic field with subsequent thermal drift of such dynamic gauge;
- hysteresis and nonlinearity;
- lack of long-term stability of magnetic properties;
- sensitivity to external magnetic fields, which shielding is difficult, especially in

the infra and low-frequency ranges;

- ability to pass the size only at one point of the nanometer range.

The experimental result confirming a possibility of the calibrated measurement of displacement at one point of the beginning of nanometer range was given in the publication [1]. It should be noted the necessity of calibration of the standard using more high-precision device for calibration of other measuring devices, or the existence of guarantees of stability of piezoelectric features throughout the interval between verifications.

The Advanced Technologies Center in Lomonosov Moscow



Перед компанией ООО "НАНО-АТТО Метрия" была поставлена другая задача – проведение калибровки одним динамическим калибром во всех точкахnano- и пикометрового диапазонов [2]. Для многократного уменьшения гистерезиса, ползучести (creep) и обеспечения долговременной стабильности в динамических калибрах разработаны следующие решения:

- применен однородный монокристаллический материал (типа ниобата лития) вместо поликристаллического, используемого в пьезокерамике;
- обеспечена времененная стабильность динамических калибров (в отличие от пьезокерамических благодаря отсутствию необходимости поляризации при изготовлении, а также располяризации при хранении и применении);
- для управления разработаны специализированные высоковольтные аналого-цифровые системы и соответствующее программное обеспечение.

Несмотря на трудность материаловедческих, технологических, приборных и системных проблем, все они были успешно решены. В результате впервые стала возможной калибровка измерительных устройств одним динамическим калибром во всех точках nano- и пикометрового диапазонов.

Измерительный метрологический набор с динамической мерой, разработанный ООО "НАНО-АТТО Метрия", – технологически сложный и наукоемкий продукт, много-

кратно превосходящий метрологические приборы на основе пьезокерамики. Недостаточно заменить вид материала – пьезокерамику на монокристалл. Необходимо добиться, чтобы используемые кристаллы не повторяли свойства пьезокерамики. Владение знаниями кристаллографии, длительные расчеты специалистов, сложная технологическая цепочка обработки материала позволили сориентировать кристалл и наделить его необходимыми свойствами.

Учитывая, что величина перемещения кристаллов меньше, чем у пьезокерамики, необходимо генерировать напряжение в тысячи вольт. Усложненная электронная система управления характеризуется малыми габаритными размерами, но большими возможностями и стабильными результатами. При возможности увеличения выходного напряжения до 2000 В генерируются электрические сигналы управляемой формы, задаваемой от компьютера.

Для калибровки наших динамических мер были разработаны оптические интерферометры с субнанометровой неопределенностью измерений, долговременная стабильность которых обеспечена оптоэлектронной следящей системой на основе цезиевой ячейки. Именно данный интерферометр со стабилизацией частоты излучения цезиевой ячейкой гарантирует ответственность измерения перемещения длин и линейных перемещений объектов в нанометровом диапазоне.

State University has correctly solved the assigned task – the calibration at one point of nanometer range using one dynamic gauge. However, the cheapness and simplicity of production of the dynamic gauge on the basis of a piezoceramic plate does not provide metrological support of nanotechnology instrumentation, including of scanning probe microscopy. The existing functionality of this measurement gauge, which is patent-protected and approved for public free use, is only a sample of a new type of domestic dynamic nanometer standard, but can

not withstand the load of public usefulness.

How fair is it to offer to the public such standard of the nanometer for calibration of process equipment, to calm down and not try to improve the dynamic gauge, to talk about the availability of high-quality nanometer standard?

Under the preset voltage, the piezoelectric ceramics provides movement of a gauge at one given value, but after removing the voltage it will not return to the starting point. If a different voltage is used, the calibration of gauge will be broken.

Accordingly, calibration of the device or equipment requires a set of gauges of this type for different types of movement.

NANO-ATTO Metria has solved another problem – calibration using one dynamic gauge at all points of nano- and picometer ranges [2]. The following solutions are developed for minimization of a hysteresis and creep and for ensuring long-term stability in dynamic gauges:

- homogeneous monocrystalline material (like lithium niobate) is used instead of polycrystalline, which is typical for the piezoceramics;



Таким образом, при подаче напряжения нам известно, насколько может переместиться наша динамическая мера, и ее можно ответственно перемещать на разные заданные расстояния. После снятия напряжения происходит возврат точно в исходную точку.

Для калибровки мы используем один эталон, в отличие от динамических мер из пьезокерамики, и с помощью регулировки напряжения обеспечиваем перемещение на заданные расстояния с метрологической ответственностью за работу своей калибровочной меры. Соответственно, в случае расхождения результатов измерений с калибруемой установкой происходит настройка оборудования под перемещение динамического калибра на основе монокристалла.

Динамическая мера на основе пьезокерамики характеризуется значительным гистерезисом и поэтому не может использоваться для проведения калибровки в различных точках нанометрового диапазона.

Любая научная деятельность должна уметь выбирать, признавать и предлагать обществу лучшее из имеющегося. Научная ответственность перед обществом определяет, что работа ученых приносит пользу, удовлетворяет потребности людей, полученные выводы указывают путь дальнейшего развития, становятся основой для достоверных прогнозов и вероятных предупреждений. Научное творчество, основанное на глубоких знаниях, должно иметь продолжение и

последователей. Наука должна говорить правду, поэтому предлагать в качестве метрологического сопровождения инструментария копеечный, неудобный и безответственный вариант проведения калибровки – значит вводить в заблуждение общественность. Мне, как профессору МГУ им. М.В.Ломоносова, небезразлично, какие результаты достигаются в его стенах. Считаю необходимым проинформировать научное сообщество о недостатках подхода авторов публикации [1] к решению проблемы метрологического обеспечения наноиндустрии.

Предлагаем провести независимое испытание калибровочных стандартов на публичной площадке, определенной научным сообществом.

Итак, сегодня разработка калибров проводится двумя путями:

- создание статических калибров на основе разрабатываемых нанотехнологий и поэтому не опережающих развитие последних;
- создание динамических калибров, позволяющих в десятки и сотни раз превысить точность изготовления только еще разрабатываемых элементов нанометровых размеров.

Динамические калибры позволяют обеспечить выполнение важнейшего требования – опережающего развития метрологии по сравнению с разрабатываемыми нанотехнологиями.

Ф.Энгельс писал, что "знание становится движущей силой, когда овладевает массами", а значит необходимо всемерно поддерживать разнообразные разработки в области динами-

- stability in time of dynamic gauges is provided (in contrast to the piezoceramics due to the lack of need for a polarization at production, and depolarization during storage and application);
- the specialized high-voltage analog-to-digital systems and appropriate software are developed for control.

Despite the difficulty of the problems in the areas of materials science, technology and devices, all of them were successfully resolved. As a result, calibration of measuring devices using one dynamic gauge at

all points of nano- and picometer ranges has for the first time become possible.

The metrological measuring set with the dynamic gauge developed by NANO-ATTO Metria is a technically complex and knowledge-intensive product, which is many times superior to metrological devices based on piezoceramics.

It is not enough to replace a type of material, that is to use the monocrystal instead of piezoceramics. It is necessary to achieve that the used crystals didn't reproduce properties of piezoceramics. Knowledge

in the field of crystallography, long calculations of experts, the complex technological chain of processing of the material have allowed to orient the crystal and to provide it with the necessary properties.

Since the amount of movement of the crystals is less than that of piezoceramics, it is necessary to generate a voltage of thousands of volts. Complicated electronic control system has small dimensions, but provides big capabilities and stable results. With the possibility of increase the output voltage up to 2000 V, the generated electric signals have the



ческих калибров, проводимые лидирующими научными коллективами. Несколько лет назад мы были одиноки в области создания эталонов, но как только представили новую разработку, появились публикации и действующие образцы – нас стали противопоставлять.

Существующие методики и стандарты не позволяют провести аккуратную калибровку, так как не существует действующего отлаженного оборудования. Нет строгих калибров – только не очень корректные, и, похоже, что это всех устраивает. Ловкие формулировки чиновников, ответственных за развитие наноиндустрии, не отражают действительности. Отсутствие заинтересованности у разработчиков и предприятий отечественной наноиндустрии в измерительном метрологическом наборе с динамической мерой и невостребованность последнего свидетельствуют о нежелании узнать правду о фактическом состоянии дел или своих недостатках.

С разработкой динамических мер уровень развития нанометрологии перестает зависеть от уровня развития нанотехнологии и многократно его превышает. Нанотехнологии на первом этапе развивались путем совершенствования существующих решений. Однако неустранимые недостатки типа отсутствия локальности в методе молекулярно-лучевой эпитаксии или разрушения поверхностного слоя высокоэнергетическими ионами при литографии затруднили развитие нанотехнологий, основанных на тра-

диционных технологиях более чем полувековой давности. Стало ясно, что для дальнейшего продвижения необходимы новые решения.

Предпринимаемые попытки разработать новые технологии на базе выпускаемых туннельных и атомно-силовых микроскопов оказались неэффективными. Для новых технологий необходимо оборудование новых типов, а не комбинации систем почти полувековой давности.

Выполнение новых разработок требует:

- выбора нового направления (например, зондовых нанотехнологий);
- коллектива разработчиков оборудования;
- разработчиков технологических процессов;
- ориентации на социально востребованные изделия, например, наноэлектронные схемы, наносенсоры, микро- и наномеханические устройства и т.д., многократно описанные в научно-технической литературе;
- нанометрологов;
- определенного уровня финансирования – его отсутствие обрекает только на работы по микроскопии.

Отсутствие специального нанотехнологического оборудования и реальных нанотехнологий приводит к невозможности выпуска продукции и развития наноиндустрии при любом уровне нанометрологии. Примером преодоления данной проблемы может быть организация работ в США путем создания-компаний разработчиков нового оборудования и процессов (фирма Zuyex

controlled shape, which is set from the computer.

Optical interferometers with subnanometre measurement uncertainty, which long-term stability is provided by optoelectronic watching system on the basis of a cesium cell, have been developed for calibration of our dynamic gauges. This interferometer with stabilization of the radiation frequency using the cesium cell guarantees responsibility of measuring the displacement lengths and linear displacements of objects in the nanometer range.

Thus, when the voltage is supplied, we know how can move

our dynamic gauge, and we can responsibly move it at different predetermined distances. After removing the voltage it returns exactly to the starting point.

We use one standard for calibration, in contrast to the dynamic gauges of the piezoceramics, and by means of voltage adjustment provide the displacements for the specified distance with the metrological responsibility for operation of our calibration gauge. Respectively, in case of divergence between the results of measurements and calibration, the equipment will adjust to a displacements of

dynamic gauge on the basis of the monocrystal.

Dynamic gauge based on piezoceramics is characterized by a considerable hysteresis and therefore cannot be used for calibration at various points in the nanometer range.

Any scientific activity should be able to choose, recognize and offer the public the best available. The scientific responsibility to society determines that the work of scientists brings benefits, meets the needs of people, the conclusions specify the way for further development, become the basis for



в Кремниевой долине, Массачусетский технологический университет, Национальный метрологический институт NIST, мозговой центр компании IBM – Ватсоновский центр). Аналогичные организации созданы также в ЕС, Японии, Южной Корее. Они получили экспериментальные результаты по управляемому перемещению атомов, одноэлектронным и одноатомным транзисторам и т.д. Кроме эффективно действующей программы "Национальная нанотехнологическая инициатива", в США разработана перспективная программа развития производства атомарной точности.

Еще четверть века назад, в 1993 году, на 2-й Международной конференции по нанотехнологии, проведенной в Москве научным сообществом, были предложены важнейшие по актуальности работы в области нанотехнологий, включая зондовые нанотехнологии. Но на протяжении последующих лет и до настоящего момента в стране поддерживаются работы, не имеющие отношения к важнейшим направлениям (например, покрытия для инструментов и т.д.). При постановке работ по зондовым нанотехнологиям будет абсолютно ясна применимость всех имеющихся эталонов в разных областях.

Известно, что электроника является наиболее эффективной областью вложения средств. Базовый элемент электроники – транзистор, поэтому наиболее целесообразно финансирование работ по созданию нанотранзисторов с рекордными параметрами, что автоматиче-

ски активирует применение нанотехнологий. Появление нанотранзисторов, как нанопродукции, позволит ликвидировать существующее отставание и развить наноиндустрию. При наличии нанопродукции будет востребована нанометрология, созданы высокотехнологические рабочие места, будет активно развиваться экономика.

Объем финансирования нанотехнологий в России соразмерен объемам финансирования в ЕС, что более чем достаточно для организации работ в наиболее экономически выгодном и технически совершенном направлении. Вопрос к РОСНАНО: кто в России занимается разработкой и производством транзисторов с нанометровым разрешением? Ставятся ли такие задачи государством перед РОСНАНО? Получив положительный ответ на данный вопрос, можно смело говорить о наличии отечественной наноиндустрии, а пока – это лишь красивая иллюзия с потраченными бюджетными деньгами, отраженная на глянцевых страницах печатных изданий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметова А., Мешков Г., Синицына О., Яминский И. Метрологическое обеспечение в бионаноскопии // Наноиндустрия. 2016. № 4(66). Р. 36–39.
2. Потемкин А. Если нет точного нанометрового эталона, то нет и индустрии нанотехнологий // Наноиндустрия. 2016. № 3(65). Р. 8–12.

reliable forecasts and possible warnings. Scientific creativity, based on deep knowledge, should be continued by followers. Science must speak the truth, therefore, the offer as a metrological tool of the cheap, uncomfortable and irresponsible instrumentation for calibration is misleading the public. I, as a Professor of the Lomonosov Moscow State University, isn't indifferent to results, which are achieved within its walls. I consider it necessary to inform the scientific community about the shortcomings of the approach of the authors of [1] to the problem

of metrological support of nanotechnology.

We propose to conduct an independent test of the calibration standards at a public site selected by the scientific community.

So, today the development of the gauges is conducted in two ways:

- creation of static gauges on the basis of modern nanotechnology, which not outpace their development;
- creation of dynamic gauges, allowing to exceed in tens and hundreds of times the manufacturing precision of

developed elements of nanometer size.

Dynamic gauges allow the realization of the essential requirement that is advanced development of metrology in comparison with the nanotechnology.

Engels wrote that knowledge becomes a driving force when it grabs the masses, so it is necessary to support in every possible way the various developments in the field of dynamic gauges, conducted by leading research teams. A few years ago we were alone in the field of creation of standards, but as soon as have



presented a new development, publications and samples, we began to be opposed.

Current methods and standards do not allow careful calibration as there is no existing well-functioning equipment. There is no strict standards, only not very correct, and it seems that it suits everybody. Clever wording of officials who are responsible for the development of the nanindustry do not reflect reality. The lack of interest from developers and enterprises of the domestic nanoindustry in the metrological measuring set with dynamic gauge and the lack of demand for the latter demonstrate an unwillingness to know the truth about the actual state of affairs or shortcomings.

With the development of dynamic gauges the level of development of nanometrology ceases to depend on the level of development of nanotechnology and many times exceeds it. In the first stage, nanotechnology was developed by improving the existing solutions. However, the fatal shortcomings as the lack of locality in the molecular beam epitaxy or destruction of the surface layer by high-energy ions in lithography have hindered the development of nanotechnology, based on the traditional technologies, which were developed more than half a century ago. It became clear that further progress requires new solutions.

Attempts to develop new technology on the base of commercial tunneling and atomic force microscopes have been ineffective. New technologies require the equipment of new types, but not combinations of systems that are almost half a century old.

The implementation of the new developments requires followings:

- a choice of the new direction (for example, probe nanotechnologies);
- development team for the equipment;
- development team for technological processes;
- orientation to the socially demanded products, such as nanoelectronic circuits, nanosensors, micro- and nanomechanical devices, etc., numerously described in the scientific and technical literature;
- metrologists;
- a certain level of funding, as lack of it doomed to work only in the field of microscopy.

The lack of special nanotechnology equipment and of real nanotechnology leads to a lack of production and nanoindustry, respectively (at any level of development of nanometrology). An example of overcoming this problem is the creation in the USA of special companies for development of new equipment and processes (Zyvex in Silicon valley, Massachusetts Institute of Technology, National Institute of Standards and Technology (NIST), Thomas J. Watson Research Center, headquarters of IBM's Research division). Similar organizations are also established in EU, Japan and South Korea. Result of their operation are such experimental results, as a controlled movement of atoms, single-electron and single-atom transistors, etc. In the USA, in addition to the effective National Nanotechnology Initiative, a long-term programme for atomically precise manufacturing has been developed.

A quarter of a century ago, in 1993, at the 2nd International conference on nanotechnology in Moscow the major projects in the field of nanotechnologies,

including probe nanotechnologies have been offered. But over the next years and until now in the country the projects not related to critical areas (for example, coatings for tools, etc.) are carried out. Work on scanning probe nanotechnology will make absolutely clear the applicability of all existing standards in different areas.

It is known that electronics is the most effective area for investment. The basic element of electronics is the transistor, therefore financing of projects on creation of nanotransistors with record parameters is the most reasonable because automatically activates the application of nanotechnology. Start of production of nanotransistors as nanoproduccts will allow to eliminate existing backwardness and to develop the nanoindustry. With the advent of nanoproduccts the nanometrology will be in demand, high-tech jobs will be created, the economy will actively develop.

Funding of nanotechnology in Russia is comparable to the amount of funding in the EU, which is more than enough for the organization of works in the most cost-effective and technically perfect area. A question for RUSNANO: who in Russia is engaged in designing and manufacturing of transistors with nanometer resolution? Whether to put such tasks before the government of RUSNANO? Does the state set such task for RUSNANO? After receiving a positive answer to this question, we can speak about Russian nanoindustry, and at present it is just a beautiful illusion with spending of budget money, which is reflected on the glossy pages of publications.