

УДК 692.001

DOI: 10.12737/22053

Е.А. Белкин, О.И. Марков, В.Н. Поярков

ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ УСТАНОВКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НАД ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА

Представлена оптическая схема профилографа, сканирующего голографическое изображение объекта в видимом интервале электромагнитных волн и позволяющего получить характеристики поверхности для структурирования ее трехмерной модели на основе модульно-геометрического подхода, а

также схема рентгенопрофилографа активного контроля над процессом формирования микрорельефа поверхности.

Ключевые слова: оптическая схема, профилограф, рентгенопрофилограф, топография микрорельефа, голографический контроль.

E.A. Belkin, O.I. Markov, V.N. Poyarkov

OPTICAL CIRCUITS OF HOLOGRAPHIC CONTROL PLANT OF MICRORELIEF FORMATION PROCESS

One of the ways allowing the increase of accuracy and control devices potentialities consists in the use of system complexes investigating a holographic image of an object under control.

The design peculiarities of system complexes of this set allow using module-geometrical approach for the simulation of a surface investigated.

The module-geometrical approach allows, in its turn, obtaining the topography of a microrelief with an analytical description and conservation of a natural surface curvature and also a three-dimensional model of an aero-hydro-dynamic surface with a complex shape which is a smooth module connection having also an analytical presentation.

To obtain a holographic image of an object which allows fixing geometrical characteristics in a nano-interval are used the circuits of image recording through Leight-Upatnieks method.

There is developed and approbated an optical circuit of a profilograph scanning a holographic image of an object in a visible interval of electro-magnetic waves and allowing the reception of surface characteristic for structuring its three-dimensional model on the basis of a module-geometrical approach.

The circuit of a roentgeno-profilograph for active control of microrelief formation is developed.

Key words: optical circuit, profilograph, roentgeno-profilograph, microrelief topography, holographic control.

Введение

Современные приборы контроля микрорельефа деталей сконструированы так, что входящие в них регистрирующие элементы позволяют лишь фиксировать параметры микрогеометрии профилей деталей с так называемых контурных карт объекта. Карты определяются с большими погрешностями, за достаточно большие промежутки времени, что делает контроль низким по точности и малоэффективным для производства. Заявленное разрешение шероховатости 10 нм в приборах TR200, Hommet Tester T500 и т.д. при радиусе закругления алмазной иглы в 2-5 мкм вызывает сомнение, так как фиксируется изменение разности потенциалов меж-

ду поверхностями иглы и детали при изменении расстояния между ними. Микрорельефности высотой 10 нм при трассировании не могут быть причиной подпрыгивания иглы, радиус поверхности полусферы которой в 100 раз больше. Для того чтобы игла сдвинулась по вертикали на 10 нм, требуется препятствие, по размерам сравнимое с иглой. Отсюда - точность определения шероховатости щуповым прибором порядка 1 мкм. Щуповые приборы не пригодны для определения топографии микрорельефа поверхности, если топография определяется на основе восстановления естественной кривизны микрорельефа.

К тому же осуществить контроль над труднодоступным объектом, например абразивным зерном в процессе шлифования движущимся в материале, вообще не представляется возможным.

Оптические приборы контроля геометрии тел вращения (ViciVision (Ostec)) и тел сложной формы (MetraSCAN и т.д.) не позволяют получить суперпозицию геометрии и топографии микрорельефа детали, имеющих аналитическое задание. Это особенно важно при обработке аэрогидродинамических поверхностей.

Голографические методы контроля, как правило, основаны на исследовании интерференционной картины объекта и для решения вышеуказанных задач не подходят.

В связи с этим одним из путей, позволяющих как повысить точность, так и расширить возможности контролирующих устройств, является применение системных комплексов, исследующих голографическое изображение объекта контроля.

Принцип контроля рассматриваемых системных комплексов основывается на последних исследованиях процессов получения голографических изображений объектов

в оптическом и рентгеновском диапазонах. Системные комплексы этой серии позволяют изучить процессы обработки не в проекции на плоскость, а в пространстве и не только на входе и выходе, а в данный момент времени, тем самым контролируя поэлементно весь процесс.

В настоящее время в России на базе ОАО «Болховский завод полупроводниковых приборов» (г. Болхов Орловской области) создана лаборатория «Голографические исследования в приборостроении». На базе этой лаборатории разрабатывается и собирается опытный образец УГК (установка голографического контроля) для неразрушающего голографического 3D-контроля геометрии деталей с обеспечением нано - и микрометрического диапазонов точности измерений и их визуализации. Аналогов установки голографического 3D-контроля размеров сложных деталей машиностроения, как универсального оборудования для современных промышленных предприятий, в стране и за рубежом нет.

Описание установки голографического контроля и сфера ее применения

Установка голографического контроля [1] представляет собой комплекс систем, включающих лазерные, оптические, электромеханические и микропроцессорные подсистемы. Совокупная работа этих систем под управлением контроллера позволяет осуществлять высокоточный голографический 3D-контроль сложнопрофильных деталей размером до $2000 \times 500 \times 1000$ мм с погрешностью не более: 245 нм (сине-зеленый свет) - при работе в видимом диапазоне [2]; 0,5 нм - при работе в рентгеновском диапазоне для $\lambda \sim 10^{-3} \text{ \AA}$ (мягкий рентген), 0,0005 нм - для $\lambda \sim 0,001$ нм [3]. Причем

контроль до и после обработки, а также в ее процессе на различных этапах.

Высокоточный контроль сложнопрофильных деталей требуется при осуществлении промышленного производства современных изделий машиностроения: точной механики, штампов, шпинделей, люнетов, твердосплавного инструмента - в станкостроении; оживальных частей, кумулятивных воронок боевой части, гироскопов, рулей и т.д. - в производстве снарядов и ракет; лопаток турбин в насосах, турбонасосных агрегатов и др. аналогичных элементов.

Метрологическое обеспечение установки голографического контроля, позволяющей проводить оценку на основе трехмерных геометрических моделей

Один из путей расширения возможностей контролирующих устройств и использования информации, полученной с их помощью, для построения трехмерных моделей - применение системных комплексов, исследующих голографическое изображение объекта, которые входят в состав установки голографического контроля. Это профилограф, работающий в оптическом интервале частот электромагнитных волн, и рентгенопрофилограф активного контроля.

Конструктивные особенности системных комплексов этой серии позволяют для моделирования исследуемой поверхности использовать модульно-геометрический подход [4].

Модульно-геометрический подход позволяет, в свою очередь, получить топографию микрорельефа (на основе профилометрирования щуповым прибором)

(рис. 1 - 3) с аналитическим описанием и сохранением естественной кривизны поверхности, а также трехмерную геометрическую модель аэрогидродинамической поверхности сложной формы, которая представляет собой гладкую сшивку модулей, имеющих также аналитическое представление.

Для структурирования модели микрорельефа поверхности зонд (панель, составленная из ПЗС – приборов с зарядовой связью) кинематического блока установки имеет пять степеней свободы: три поступательные и две вращательные. Зонд совершает поступательное движение по рассчитанной для данной поверхности координатной сети и снимает карты профиля поверхностного слоя (профилограммы) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

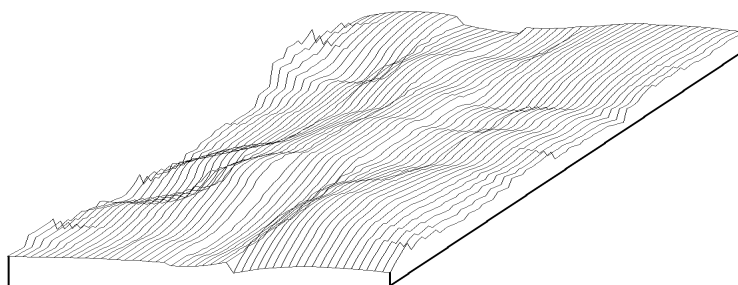


Рис. 1. Топография микрорельефа функциональной поверхности абразивного инструмента (площадка 1500x500мм)

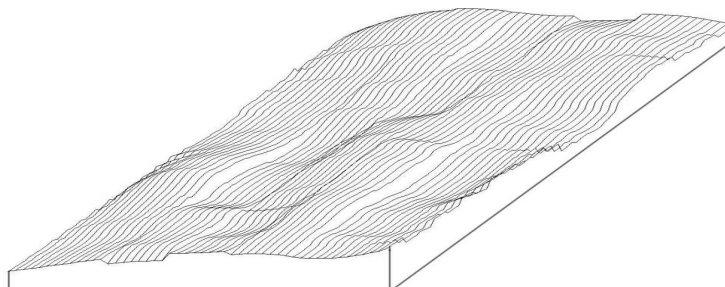


Рис. 2. Топография микрорельефа образца (сталь 50ХГА, термостойкая) после черновой обработки (площадка 1500x500мм)

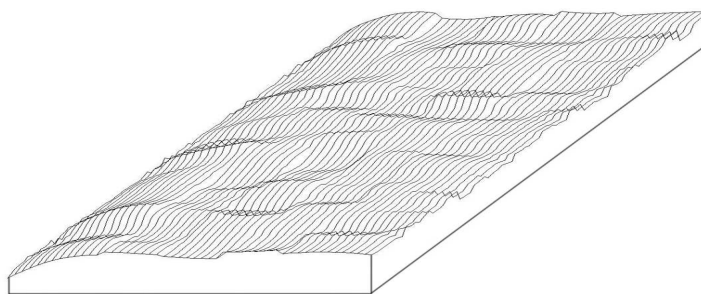


Рис. 3. Топография микрорельефа образца (сталь 50ХГА, термостойкая) после финишной обработки (площадка 1500x500мкм)

Профилограф, работающий в оптическом интервале частот электромагнитных волн

Задача, на решение которой направлен предлагаемый системный комплекс состоит в обеспечении увеличения точности и возможности измерений восстановленного голографического изображения микрорельефа контролируемого объекта.

Это достигается тем, что в профилографе, содержащем светоделители луча лазера, оптические преобразователи, регистрирующие среды - толстослойные эмульсии, увеличение трехмерной интерференционной картины осуществляется микроскопом при записи и копировании голографического изображения микрорельефа поверхности, а для измерений используется индикатор электромагнитного поля.

На рис. 4 представлена установка для записи пропускающей объемной голограммы по методу Лейта - Упатниекса [5]. Схема записи голограмм (рис. 5) содержит лазер 1, светоделитель 2 излучения лазера, оптические преобразователи в виде зеркал 3 и линз 4, объект измерений 5, микроскоп 6 и регистрирующую среду - толстослойную эмульсию 7.

Профилограф работает следующим образом. Пучок когерентного излучения лазера 1 (рис. 5) направляется на светоделитель 2, с помощью которого получают два пучка - объектный и опорный. Опорный пучок направляется системой зеркало 3 - линза 4 - светоделитель 2 непосредственно на регистрирующую среду - толстослойную эмульсию 7. Объектный пучок падает на объект 5, голограмму которого регистриру-

ют, отражается от него, проходит через микроскоп 6, попадает на регистрирующую среду 7. В результате интерференции волн опорного и объектного пучков, распространяющихся в толстослойной эмульсии, образуются плоскости, засвеченные светом большей интенсивности. После проявления голограммы на засвеченных плоскостях образуются слои почернения, т.е. создаются брэгговские плоскости, которые обладают свойством частично отражать свет.

Таким образом, в регистрирующей среде 7 создается трехмерная интерференционная картина.

При восстановлении объемной голограммы образуется только одно изображение вследствие отражения от голограммы восстанавливающего пучка только в одном направлении, определяемом углом Брэгга.

Точное формирование действительно изображения без итераций, изменения размеров требует выполнения двух условий. Первое условие: при записи и восстановлении голограммы используемый свет должен иметь одну и ту же длину волны. Второе условие: направление распространения и форма волнового фронта, падающего на голограмму, при восстановлении должны точно соответствовать комплексному сопряжению опорного пучка, использованного при записи.

Пучок когерентного излучения лазера, пройдя через линзу, падает на голограмму и восстанавливает увеличенное действитель-

ное изображение базового участка микрорельефа изучаемой поверхности.

Голографическая система, входящая в состав профилографа, должна обеспечить при восстановлении предэкранное изображение (изображение, висящее в воздухе) для последующего получения контурных карт микрорельефа исследуемой поверхности.

Для этой цели используется индикатор электромагнитного поля. Индикатор представляет собой прибор с зарядовой связью (ПЗС), применяемый в цифровой фотоаппаратуре.

Изображение микрорельефа представляет собой восстановленную электромагнитную волну, которая является идентичной в амплитудном и фазовом отношении волне, отраженной от снятого на голограмму участка поверхности. Под действием восстановленной электромагнитной волны

каждый микроконденсатор ПЗС заряжается. Величина заряда определяется интенсивностью волны (яркостью изображения). Электроника профилографа последовательно снимает заряды с каждого конденсатора.

Информация о снятых контурных картах микрорельефа передается на персональный компьютер для последующей обработки данных.

В состав профилографа входит кинематический блок (не показан), позволяющий посредством ПЗС снимать профиль микрорельефа в двух взаимно перпендикулярных направлениях, через заданный шаг Δx - по оси X и Δy - по оси Y.

Точность восстановления профиля микрорельефа определяется размерами конденсаторов и увеличением микроскопа.

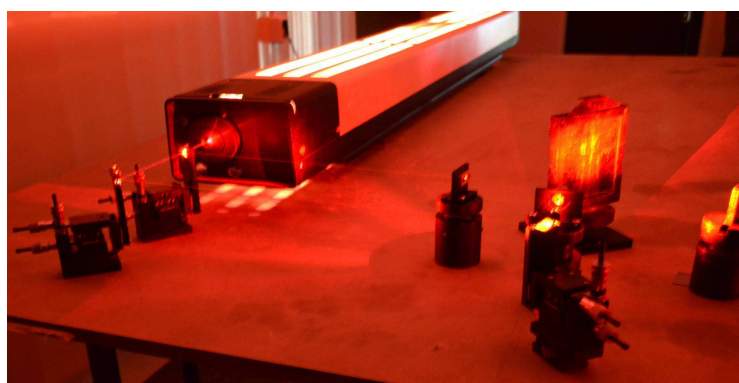


Рис. 4. Запись голографического изображения микрорельефа образца по методу Лейта - Упатниекса

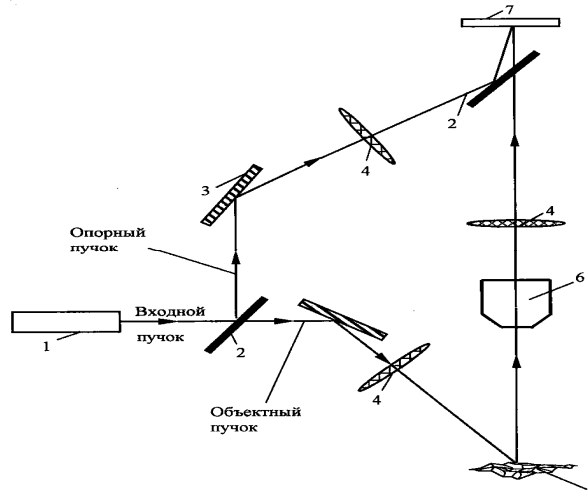


Рис. 5. Схема записи пропускающей объемной голограммы

с предварительным увеличением

Применение предлагаемого профилографа позволяет увеличить точность, число трасс ощупывания, снизить оперативное время

регистрации шероховатости, исследовать реальную картину микрорельефа.

Рентгенопрофилограф активного контроля

Задача, на решение которой направлен предлагаемый системный комплекс [6], состоит в обеспечении возможности осуществления контроля над формированием микрогеометрии поверхностного слоя детали в процессе абразивной обработки и исследования механизма процессов, сопутствующих формированию микрорельефа: стирания скола, выкрашивания и вырывания абразивного зерна из связки инструмента, возникновения микроколебаний зерна в связке инструмента, изменения пористой структуры связки инструмента, микростружкообразования, пластического оттеснения и упрочнения обрабатываемого материала единичным зерном и совокупностью зерен и т. д.

Это достигается тем, что в рентгенопрофилографе активного контроля, содержащем источник рентгеновского излучения, кристаллический резонатор для получения монохроматического рентгеновского излучения, фокусирующее кристаллические системы – коллиматоры, принцип действия одного из которых основан на восьмилучевой дифракции, кристаллические зеркала для разделения и изменения направления распространения рентгеновского излучения, регистрирующую среду – кристалл-анализатор для получения интерференции волн, увеличение трехмерной интерференционной картины осуществляется отражательным микроскопом при регистрации голографического изображения исследуемого объекта, а для измерений используется трехмерная матрица, составленная из электронно-оптических преобразователей.

На рис. 6 изображена схема регистрации трехмерного голографического изображения, изменяющегося во времени, с предварительным увеличением в диапазоне рентгеновского излучения $\lambda \sim 10 - 10^3 \text{ \AA}$ (мягкий рентген).

Рентгенопрофилограф активного контроля имеет схему регистрации трехмерного голографического изображения, изменяющегося во времени. Схема регистрации (рис. 6) содержит рентгеновскую трубку 1, резонатор 2, кристаллические зеркала 3, 4, коллиматоры 5, 6, движущийся объект измерений 7, отражательный рентгеновский микроскоп 8, регистрирующую среду – кристалл-анализатор 9 и индикатор электромагнитного поля трехмерная матрица 10, составленная из электронно-оптических преобразователей – координатно-чувствительных микроканальных пластин.

Рентгенопрофилограф работает следующим образом. В устройстве реализуется дифракция рентгеновских лучей на кристалле методами «на отражение» и «на просвечивание».

Предварительное увеличение применяется для того, чтобы получить высокое разрешение в небольшом поле зрения.

Пучок рентгеновского излучения трубки 1 пропускается через кристаллический резонатор 2 для получения монохроматического рентгеновского излучения, направляется на кристаллическое зеркало 3, с помощью которого получают два пучка – объектный и опорный. Опорный пучок направляется системой элементов дифракционной оптики (кристаллическое зеркало 4, коллиматор 5) непосредственно на регистрирующую среду – кристалл-анализатор 9.

Объектный пучок, пройдя через коллиматор 6, попадает на движущийся объект 7, проходит через коллиматор 5, отражательный рентгеновский микроскоп 8, попадает на кристалл – анализатор 9. В результате интерференции волн опорного и объектного пучков за кристаллом

9 можно получить бегущие волны интенсивности, т. е. увеличенное, изменяющееся во времени голографическое изображение 11 движущегося объекта 7.

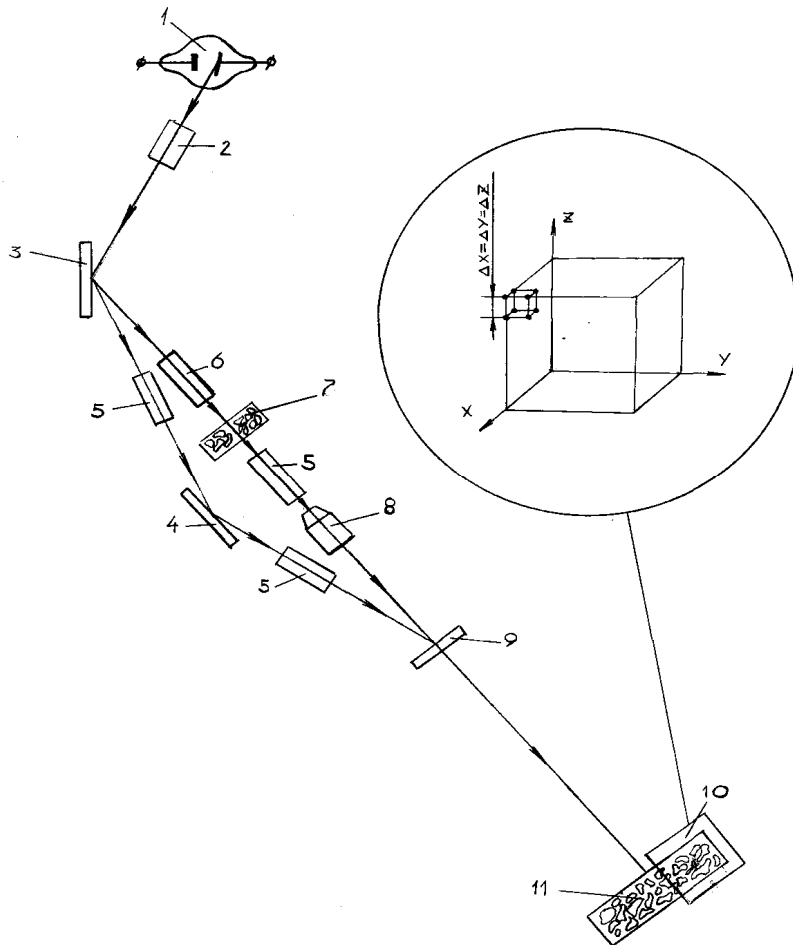


Рис. 6. Рентгенопрофилограф активного контроля

Кристаллический резонатор 2 – рентгеновский прибор с замкнутой траекторией луча, полученной на основе отражения от плоскостей кристалла и явления полного внешнего отражения.

В качестве коллиматора 5 применяются многослойные структуры (МИС), состоящие из чередующихся слоев двух различных веществ (при толщине слоя начиная с моноатомного), нанесенных на слегка искривленные подложки. МИС позволяют фокусировать и концентрировать излучение в существенно большем угле, чем однородные структуры.

Принцип действия коллиматора 6 основан на восьмилучевой дифракции. Многоволновой эффект Бормана, реализуемый в совершенном кристалле, позволяет сформировать параллельный пучок рентгеновского излучения, т. е. пучок с расходимостью $\sim 10^{-6}$ радиан.

Движущийся объект 7 – абразивный инструмент, формирующий микрорельеф поверхностного слоя детали, - должен быть ориентирован перпендикулярно параллельному пучку рентгеновского излучения, падающему на него, т. е. ось вращения абразивного инструмента должна быть параллельна оси симметрии параллельного пучка,

что дает возможность исключить эффект Доплера.

Трехмерная матрица 10 представляет собой каркас, состоящий из ячеек кубической формы. Длина ребра куба-ячейки равна шагу по осям x, y, z $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, через который определяются точки микрогеометрии пористой структуры абразивного инструмента и формируемого поверхностного слоя детали. В узлах каркаса (вершинах кубов-ячеек) смонтированы электронно-оптические преобразователи – координатно-чувствительные микроканальные пластины.

Контурные карты микрогеометрии исследуемого объекта - движущегося абразивного инструмента и формируемого поверхностного слоя детали - визуализируются при помощи трехмерной матрицы, на которую проецируется его голографическое изображение.

Информация о снятых контурных картах после последующей обработки на персональном компьютере дает возможность построить трехмерную геометрическую модель исследуемого объекта, изменяющуюся во времени.

Заключение

Системные комплексы неразрушающего контроля нового поколения над формированием топографии микрорельефа разработаны для применения в структурировании на основе модульно-геометрического подхода топографии микрорельефа, а также геометрии (внешней, внутренней) поверхности сложной формы.

Разработана и апробирована оптическая схема профилографа, сканирующего

В состав рентгенопрофилографа активного контроля входит кинематический блок (не показан), позволяющий смещать трехмерную матрицу в позицию, где расположено доплеровское голографическое изображение исследуемого участка.

Точность восстановления профиля микрорельефа определяется координатным разрешением для координатно-чувствительных микроканальных пластин $\sigma = 0,01$ мм и увеличением отражательного рентгеновского микроскопа. Так, чтобы обеспечить восстановление профиля микрорельефа $R_a = 0,001$ мкм, достаточно выбрать отражательный микроскоп с двумя скрещенными зеркалами с увеличением $N = 10^4$ для $\lambda \sim 10^{-3}$ Å, так как $\sigma = NR_a$.

Применение предлагаемого рентгенопрофилографа активного контроля позволяет исследовать процесс формирования поверхностного слоя детали в зависимости от технологических факторов по ходу процесса абразивной обработки.

голографическое изображение объекта в видимом интервале электромагнитных волн и позволяющего получить характеристики поверхности для структурирования ее трехмерной модели на основе модульно-геометрического подхода.

Разработана схема рентгенопрофилографа активного контроля над формированием микрорельефа поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкин, Е.А. Профилографы нового поколения на основе голографии / Е.А. Белкин, В.Н. Поярков // Научное обозрение. – 2015. - №12. - С. 205-208.
2. Белкин, Е.А. Голографический профилограф пассивного контроля / Е.А. Белкин, В.Н. Поярков // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. – М.: АР-Консалт, 2013. – Ч. II. - С. 33-35.
3. Belkin, Inspection tools for control of microrelief formation process / E.A. Belkin, V.N. Poyrkov // Наука, образование, общество: современные вызовы и перспективы: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. – М.: АР-Консалт, 2013. – Ч. II. - С. 117-119.
4. Белкин, Е.А. Профилографы нового поколения / Е.А. Белкин, В.Н. Поярков // Materiały IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji.

Wschodnie partnerstwo – 2013 (07 – 15 wrzesnia 2013 roku) Vol. 31. Fizyka. Przemysl. Nauka I studia. - 2013. - С 8-10.

1. Belkin, E.A. Profilographs of new generation based on holography / E.A. Belkin, V.N. Poyarkov // *Scientific Review*. – 2015. - №12. - pp. 205-208.
2. Belkin, E.A. Holographic profilograph with passive control / E.A. Belkin, V.N. Poyarkov // *Science, Education, Society: Trends and Prospects: Proceedings of the Inter. Scientific-Pract. Conf.* – М.: AP-Consult, 2013. – Vol. II. - pp. 33-35.
3. Belkin, Inspection tools for control of microrelief formation process / E.A. Belkin, V.N. Poyarkov // *Science, Education, Society: Current Challenges Prospects: Proceedings of the Inter. Pract. Conf.* – М.: AP-Consult, 2013. – Vol. II. - pp. 117-119.

5. Пат. 2215317 РФ. Профилограф / Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. - Заявл. 08.01.02; опубл. 27.10.03, Бюл. № 30.

6. Пат. 2258203 РФ. Рентгенопрофилограф / Белкин Е.А. - Заявл. 15.06.04; опубл. 10.08005, Бюл. № 22.

4. Belkin, E.A. Profilographs of new generation / E.A. Belkin, V.N. Poyarkov // *Materialy IX miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. Wschodnie partnerstwo – 2013 (07 – 15 wrzesnia 2013 roku)* Vol. 31. Fizyka. Przemysl. Nauka I studia. - 2013. - С 8-10.

5. Pat. 2215317 RF. Profilograph / Stepanov Yu.S., Belkin E.A., Barsukov G.V. – Applic. 08.01.02; published 27.10.03, Bull. № 30.

6. Pat. 2258203 RF. Roentgeno-profilograph / Belkin E.A. - Appl. 15.06.04; published 10.08005, Bull. № 22.

Статья поступила в редколлегию 6.07.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор ОГУ им. Тургенева
Емельянов А.А.

Сведения об авторах:

Белкин Евгений Александрович, д.т.н., Зав. лабораторией «Голографические исследования в приборостроении», ОАО «Болховский завод полупроводниковых приборов», e-mel: BelkinE.A@yandex.ru.

Поярков Вячеслав Николаевич, к.т.н., ген. директор ОАО «Болховский завод

полупроводниковых приборов», e-mel: oaobzpp@list.ru.

Марков Олег Иванович, д. физ.-мат. н., вед. научный сотрудник лаборатории «Голографические исследования в приборостроении», ОАО «Болховский завод полупроводниковых приборов», e-mel: O.I.Markov@mail.ru.

Belkin Evgeny Alexandrovich, D.Eng., Head of the Lab. “Holographic Researches in Instrument-making Industry”, “Bolkhov Semiconductor Plant” Co., e-mail: BelkinE.A@yandex.ru.

Poyarkov Vyacheslav Nikolayevich, Can.Eng., Director-General of the “Bolkhov Semiconductor Plant” Co., e-mail: oaobzpp@list.ru.

Markov Oleg Ivanovich, D.Ph-Math., Leading Researcher of the Lab. “Holographic Researches in Instrument-making Industry”, “Bolkhov Semiconductor Plant” Co., e-mail: O.I.Markov@mail.ru.