

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА С МОДУЛЯЦИОННЫМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МИКРОСКОПОМ

© 2012 г. А. В. Лопарев*, канд. техн. наук; А. В. Правдивцев*;
П. С. Игнатъев*, канд. физ.-мат. наук; К. В. Индукаев*; П. А. Осипов*; Е. В. Ромаш**

* ООО “Лаборатории Амфора”, Москва

** ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН”, Москва

E-mail: lav@amphoralabs.ru

Приведены результаты разработки уникальной метрологической платформы, предназначенной для исследования нанодфектов объекта и измерения плоскостности его поверхности на больших площадях. Конструкция платформы основана на согласованном применении метода модуляционной интерференционной микроскопии и бесконтактных аэромагнитных направляющих. Рассмотрены оптическая схема и алгоритм получения панорамных изображений. Показаны перспективы применения метрологической платформы в оптической и полупроводниковой промышленности.

Ключевые слова: модуляционная интерференционная микроскопия, сверхразрешение, топология интегральных схем, контроль качества.

Коды OCIS: 180.3170, 170.1650.

Поступила в редакцию 21.03.2012.

Введение

В настоящее время в оптической и полупроводниковой промышленности остро стоит вопрос метрологического контроля крупногабаритных (размерами до 300×300 мм) планарных образцов. В частности, в современном оптическом производстве актуальной задачей является оценка качества оптических поверхностей с шероховатостью Ra в диапазоне 0,1–5 нм в автоматическом режиме. Такие задачи возникают, например, при производстве проекционных литографических оптических систем, работающих в УФ области спектра (исследование остаточной шероховатости зеркал) [1, 2]. Кроме того, в полупроводниковой промышленности актуальной задачей является контроль плоскостности вейферов и масок, используемых в литографии (данный параметр влияет на качество изготовления конечного продукта) [3, 4]. Кроме того, надежность и стабильность осажденных тонкопленочных компонентов во многом зависит от шероховатости поверхности, на которую выполняется осаждение. Поэтому ее измерение является актуальной задачей.

В настоящей работе предлагается оригинальная метрологическая платформа, пред-

назначенная для контроля изделий оптической и полупроводниковой промышленности в автоматическом режиме. Принцип функционирования данной платформы основан на согласованной работе метода модуляционной интерференционной микроскопии и прецизионного длинноходового координатного стола с нанометровой точностью позиционирования на основе сверхжестких бесконтактных аэромагнитных направляющих. Такое сочетание позволяет исследовать поверхности с рекордным оптическим разрешением в совокупности с результирующей точностью позиционирования 1 нм и скоростью получения изображений 3–200 кадр/с (в зависимости от пространственного разрешения), а также получать трехмерный рельеф исследуемого объекта.

Метод модуляционной интерференционной микроскопии

Теоретическая основа использующегося в метрологической платформе метода модуляционной интерференционной микроскопии базируется на измерении локальных фаз промодулированной объектом световой волны [5–8]. Высказанное в середине прошлого века

предположение о возможности преодоления рэлеевского предела разрешения путем регистрации распределения фазы отраженной волны в плоскости фотоприемника в дальнейшем было подтверждено экспериментально [9, 10].

Интерпретация фазовых изображений осуществляется с учетом теории оптических топологических фаз [10], величина которых зависит от геометрических и физических параметров изучаемого объекта. Так, например, исследование объекта при круговой поляризации излучения лазера в ряде случаев позволяет оценить вклад фазы Рытова–Владимирского в изображение, в результате чего уменьшается систематическая погрешность вычисления фазовой высоты [11, 12].

Лазерный канал метрологической платформы может быть выполнен как по модифицированной схеме микроинтерферометра Линника (рис. 1а), так и по схеме микроинтерферометра Маха–Цандера (рис. 1б).

В лазерном канале метрологической платформы, выполненном по схеме микроинтерферометра Линника, излучение полупроводникового лазера 1 попадает на неполяризующий светоделительный кубик 2 с коэффициентом деления прохождения/пропускание 50/50 и делится на опорный и объектный пучки.

В объектном плече интерферометра лазерный пучок через микрообъектив O1 освещает исследуемый объект. Промодулированное объектом излучение через микрообъектив O1 и светоделительный кубик 2, с помощью проекционной оптики 4 формирует изображение объекта на камере лазерного канала 8 или камере навигационного канала 7. Переключение между каналами осуществляется с помощью

поворотного зеркала 5. Для анализа поляризационных свойств объекта перед камерой лазерного канала 8 предусматривается установка анализатора 6.

Основными преимуществами схемы Линника является простота конструкции измерительной головки в силу малого количества оптических элементов, а также высокое пространственное разрешение в фазовых изображениях благодаря возможности использования микрообъективов большой числовой апертуры.

В то же время схема Линника обладает следующими недостатками: для исследования широкого класса низкоотражающих объектов необходимо как наличие регулировки интенсивности излучения источника, так и возможности ее перераспределения в плечах интерферометра. Данные недостатки устраняются при построении измерительной головки метрологической платформы по модернизированной схеме микроинтерферометра Маха–Цандера (рис. 1б).

Измеряемый объект размещается на предметном столе под микрообъективом O1. Коллимированное излучение лазера 1 проходит через полуволновую пластинку 2 и попадает на поляризационный светоделитель 3 с коэффициентом деления пропускание/отражение 50/50. Отразившийся от поляризационного кубика лазерный пучок попадает на автоматизированную поляризационную систему 4, которая позволяет вращать плоскости линейной поляризации, а также изменять тип поляризации на эллиптическую или круговую. Далее объектный пучок с помощью поворотного зеркала 5 и неполяризующего светоделительного кубика 50/50 6 через объектив O1 освещает ис-

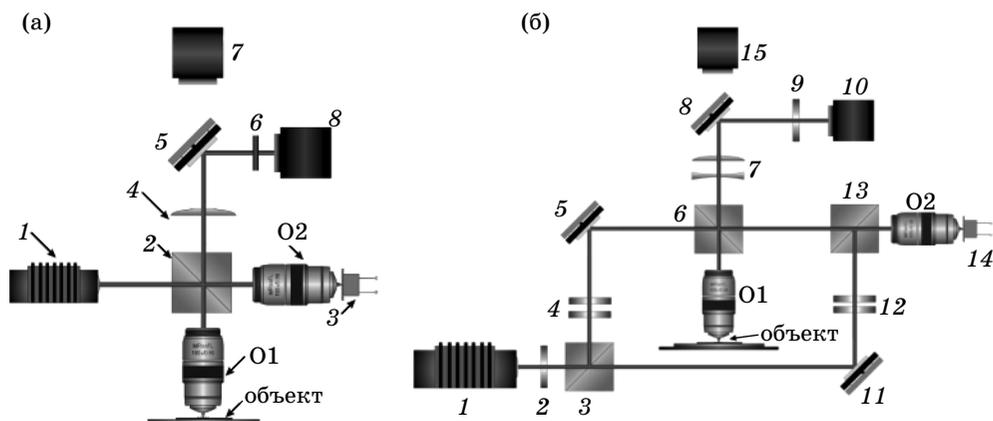


Рис. 1. Оптические схемы лазерного канала метрологической платформы на базе схемы Линника (а) и схемы Маха–Цандера (б). Пояснения в тексте.

следуемый объект. Промодулированное объектом излучение проходит через микрообъектив О1 и светоделительный кубик 6 и с помощью проекционной оптики 7 формирует изображение объекта на камере лазерного канала 10 или камере навигационного канала 15. Переключение между каналами осуществляется (как и в рассмотренной выше схеме Линника) с помощью поворотного зеркала 8. Для анализа объектов, обладающих оптической анизотропией, перед камерой лазерного канала 10 устанавливается анализатор 9.

В опорном плече интерферометра лазерное излучение, проходя светоделительный кубик 3 и поворотное зеркало 11, попадает на автоматизированную поляризационную систему, которая аналогична системе объектного плеча 4. Светоделительный кубик 13 имеет характеристики, аналогичные 6, и направляет в микрообъектив опорного плеча О2 часть излучения, которое, отражаясь от опорного зеркала узла пьезомодулятора 14, после прохождения проекционной оптики 7, попадает на матрицы камер 10 и 15.

Основным преимуществом схемы Маха–Цандера является возможность независимого управления поляризацией в объектном и опорном плечах интерферометра, а также последующим учетом поворота плоскости поляризации, вносимого измеряемым образцом.

Обе описанные оптические схемы микроинтерферометров позволяют получать фазовые изображения с разрешением 0,1 нм по вертикали и 10–100 нм в плоскости образца.

Известно, что предел латерального разрешения в оптических микроскопах связан с дифракцией когерентной оптической волны на объективе и определяется критерием Рэля [9, 10]

$$D = \frac{0,77\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где λ – длина волны лазера, NA – числовая апертура объектива, D – разрешающая способность объектива. Из выражения (1) следует, что при использовании лазера с длиной волны $\lambda = 405$ нм разрешающая способность модуляционного интерференционного микроскопа (МИМ) с объективом $50\times/0,8$ должна составлять 390 нм. Однако полученные нами экспериментальные результаты продемонстрировали наличие в фазовых портретах контрастных структур размером до 30 нм (при условии хорошего фазового контраста изображения) [11].

Позиционирование портала метрологической платформы

При реализации сложной задачи расширения функциональных возможностей МИМ требовалось решить вопрос прецизионного позиционирования измерительной головки относительно измеряемого объекта в широких пределах (300×300 мм). Для этого нами была использована технология аэростатических направляющих, разработанная в ООО “Лаборатории АМФОРА”, обеспечивающая высокую точность позиционирования и повторяемость результатов.

Принцип действия аэромагнитных направляющих основан на оригинальном способе бесконтактного перемещения [13]. Направляющие содержат подвижную танкетку и рельс, который закрепляется на жестком основании. Специальная система из постоянных магнитов обеспечивает высокую жесткость направляющей, а аэростатические подшипники создают постоянный зазор между танкеткой и рельсом.

Нами был разработан ряд оригинальных конструктивных решений, из которых наибольший интерес представляет направляющая, в которой традиционное силовое магнитное замыкание в направлении, нормальном воздушному зазору, дополнено бесконтактным силовым удержанием каретки в поперечном направлении. В результате отпадает необходимость в дополнительной паре направляющих для удержания кареток в поперечном направлении, а привод приобретает возможность полной самоустановки. Благодаря этому полностью исключаются все, казалось бы, неизбежные для сверхточного оборудования операции юстировки. Все детали аэромагнитных направляющих изготавливаются с применением точного оборудования и подвергаются строгому выходному контролю. Таким образом, разработанная метрологическая платформа обеспечивает высокую стабильность и точность измерений в лазерном канале МИМ.

Специальная порталная конструкция метрологической платформы и наличие жесткой гранитной станины обеспечивают высокую стабильность при измерениях больших объектов на всей площади их поверхности и в приповерхностных слоях. Функциональность аналитических возможностей метрологической платформы может быть расширена за счет использования дополнительных измерительных приборов, например атомно-силового микро-

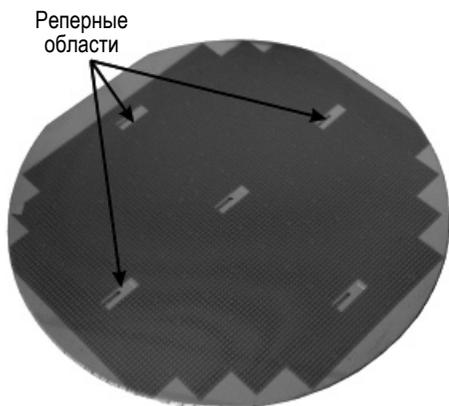


Рис. 2. Внешний вид вейфера.

скопа или датчика касания. Подобная интеграция различных измерительных приборов в едином приборном комплексе делает рассматриваемую метрологическую платформу наиболее экономичной и эффективной метрологической системой для наноисследований больших объектов.

Методика исследования поверхности образцов в автоматическом режиме, например в линии контроля продукции на производстве, предполагает наличие реперных областей на поверхности исследуемого объекта.

На рис. 2 приведено изображение вейфера с выделенными реперными областями. Данные области должны характеризоваться уникальным профилем, алгоритм распознавания которых может быть реализован, например, на основе анализа пространственных частот изображения. После нахождения в автоматическом режиме реперной области исследуемого образца портал метрологической платформы отводит измерительную головку МИМ в требуемую область (задается программой управления в зависимости от требований к методике измерения конкретного образца).

Следует отметить, что в некоторых случаях в области каждой реперной точки требуется контроль больших участков поверхности образца, превышающих поле зрения одного кадра. Вместе с этим требуется обеспечение высокого пространственного разрешения, поэтому

использование объективов малой кратности с небольшой числовой апертурой не представляется возможным. Одновременное выполнение требований большого исследуемого поля зрения и высокого пространственного разрешения можно обеспечить путем построения панорамных фазовых изображений, представляющих собой программную сшивку ряда соприкасающихся областей.

Панорамные фазовые изображения

Для построения панорамных изображений в окрестности реперных областей был реализован механизм сшивки фазовых изображений, основанный на вычислении корреляционной функции между областями двух последовательно полученных фазовых кадров, изображающих одну область предмета. На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма сшивки фазовых изображений для получения панорамного фазового изображения.

Порядок получения панорамных фазовых изображений рельефа поверхности для каждой реперной области состоит в следующей последовательности действий:

1. Проводится запись k -го фазового изображения и вычисляется рельеф поверхности в (I_k) текущей точке измерений с координатами (x_k, y_k) .

2. С помощью портала метрологической платформы производится сдвиг измерительной головки МИМ относительно предмета на заданное расстояние $(\Delta x_k, \Delta y_k)$. Сдвиг осуществляется таким образом, чтобы поля зрения в k и $(k + 1)$ фазовых кадрах имели общую область (10–30% от площади фазового изображения).

3. Регистрация $(k + 1)$ -го фазового изображения и вычисление рельефа поверхности в точке (I_{k+1}) .

4. Вычисление сдвига для общей части поля зрения k и $(k + 1)$ кадров, определение необходимого смещения изображения $(k + 1)$ $(\Delta x_{Sk}, \Delta y_{Sk})$ для совмещения с кадром k . В качестве шаблона используется часть k -го изображения фазового рельефа, а поиск выполняется по $(k + 1)$ -му кадру в области, координаты ко-

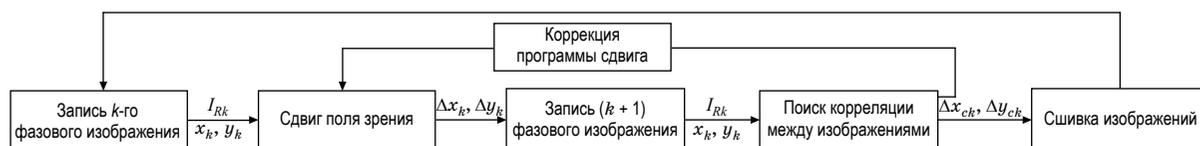


Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования панорамного фазового изображения.

торой получены на основании данных о перемещении измерительной головки МИМ. Результаты вычисления сравниваются с данными текущего положения измерительной головки МИМ, полученными с помощью системы обратной связи положения портала метрологической платформы. При необходимости выполняется коррекция программы его управления для следующего шага.

5. На следующем этапе выполняется сшивка фазовых изображений по полученным данным. Сшивка может выполняться как суммированием общих областей (при этом увеличивается отношение сигнал/шум в данной области), так и добавлением к исходному изображению новой части кадра (сшивка без наложения).

6. Переход к следующему кадру, переход к п. 1 алгоритма, при достижении границы исследуемой области – завершение алгоритма.

Данный алгоритм обеспечивает построение панорамных фазовых изображений предмета с коррекцией остаточной неточности выставления координат. В общем виде функцию пространственной корреляции между шаблоном и исследуемым изображением, смещенным по двум осям на величины (r, c) можно представить следующим образом:

$$R(r, c) = \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} I_O(i+r, j+c) \cdot I_P(i, j), \quad (2)$$

где I_O и I_P – значения фазы для исследуемого изображения и шаблона в рассматриваемых точках соответственно, W и H – ширина и длина шаблона в пикселах. Максимальное значение рассчитанной корреляционной функции $R(r, c)$ указывает на точку наиболее полного совпадения шаблона и области изображения, в которой ведется поиск. Во время вычисления корреляционной функции ее значения в точках, которые выходят за пределы изображения и шаблона, приравниваются нулю. Следует отметить, что исходя из принципов работы метрологической платформы, алгоритм выполняет поиск только смещений по двум координатам. Разворота предмета за время снятия панорамного изображения не происходит благодаря предметному столу, который обеспечивает нанометровую точность позиционирования.

Рассмотрим функционирование приведенного алгоритма для построения панорамных изображений без наложения на примере изображения поверхности DVD диска. На рис. 4а приведен вид участка панорамного фазового изображения для объекта, представляющего

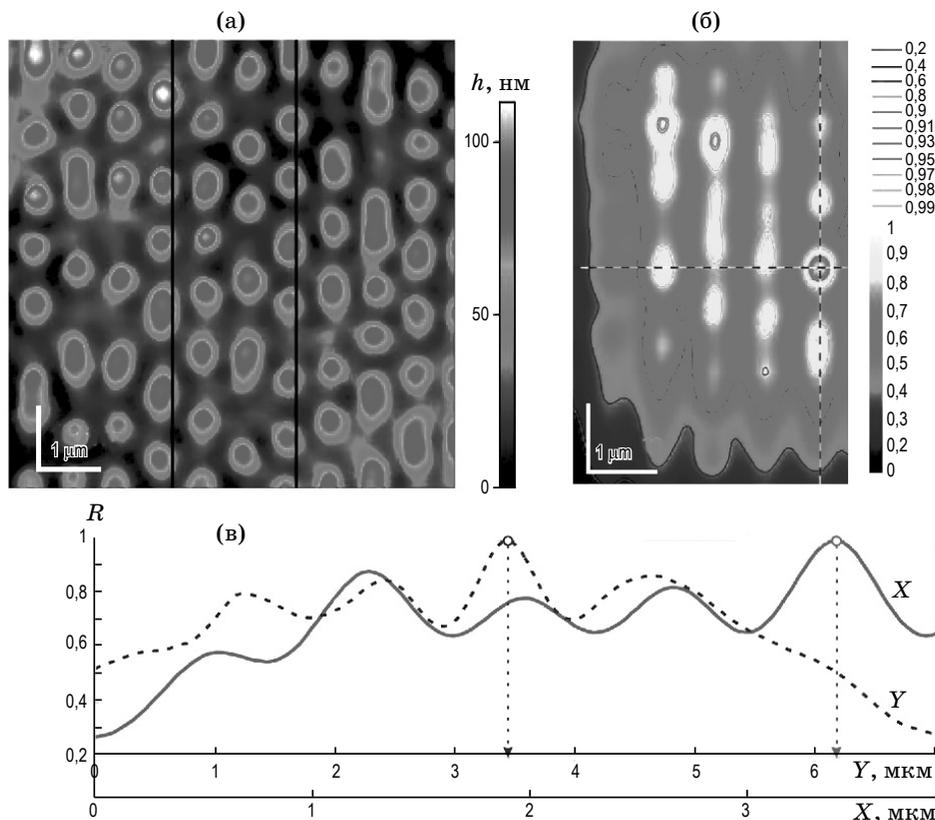


Рис. 4. Участок панорамного изображения в области сшивки (а), корреляционная функция шаблона и участка изображения (б) и профили ее сечения (в).

собой рабочую поверхность DVD диска. Вертикальными линиями выделена область общая для двух кадров.

Результат вычисления корреляционной функции показан на рис. 4б, пересечением пунктирных линий выделен ее максимум. На рис. 4в приведено сечение корреляционной функции вдоль пунктирных линий. Следует отметить, что приведенный пример является достаточно сложным для анализа, так как содержит периодическую структуру. Несмотря на это, корреляционная функция имеет отчетливый максимум, который находится в общей области шаблона и участка изображения. Приведенный вид двумерного распределения корреляционной функции по площади второго изображения в псевдоцвете наглядно демонстрирует, что значения побочных пиков, во-первых, заметно меньше по амплитуде, чем основной максимум, а во-вторых, они лежат вне области пересечения, что является еще одним признаком корректности определения смещений. После вычисления величины одного фазового изображения относительно другого была проведена процедура вычитания общих частей изображений, которая показала совпадение объектов (результат вычитания сопоставим с уровнем шума в изображении). Данная операция проводится с целью дополнительной верификации корректности построения панорамного изображения.

Обсуждение и выводы

Разработанная метрологическая платформа обеспечивает измерение фазовой высоты с дискретностью 0,1 нм на протяженных участках

исследуемого объекта. Использование портальной конструкции и технологии бесконтактных аэромагнитных направляющих позволяет позиционировать измерительную головку МИМ с точностью 2,5 нм для объектов размером до 300×300 мм. Для построения панорамных фазовых изображений был реализован алгоритм сшивки на основе корреляционной функции двух фазовых изображений. Следует отметить, что построение фазового изображения полной поверхности исследуемого объекта может потребовать продолжительного времени. В зависимости от конкретного типа исследуемого образца алгоритм управления метрологической платформой позволяет проводить исследование заданных участков в автоматическом режиме.

Сравнение полученных значений сдвига соседних изображений, после построения их сшивки с данными текущего положения приводов метрологической платформы X-Y, позволяет на каждом шаге выполнять верификацию точности позиционирования измерительной головки и, при необходимости, вносить коррективы в алгоритм управления приводами.

Таким образом, разработанная метрологическая платформа является универсальной системой, обладающей уникальными техническими характеристиками, что позволяет использовать ее в различных областях промышленности.

В работе использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА:

1. Noordman O., Tychkov A., Baselmans J., Tsacoyeanes J., Politi G., Patra M., Blahnik V., Maul M. Speckle in optical lithography and the influence on line width roughness // Proc. SPIE. 2009. V. 7274. 72741R.
2. Barysheva M.M., Gribkov B.A., Vainer Yu.A., Zorina M.V., Pestov A.E., Platonov Yu.Ya., Rogachev D.N., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. Problem of roughness detection for supersmooth surfaces // Proc. SPIE. 2011. V. 8076. 80760M-1.
3. Valley J., Poduje N., Sinha J., Judell N., Wu Jie, Boonman M., Tempelaars S., Youri van Dommelen, Kattouw H., Hauschild J., Hughes B., Grabbe A., Stanton L. Approaching New Metrics for Wafer Flatness: An Investigation of the Lithographic Consequences of Wafer Non-Flatness // Proc. SPIE. 2004. V. 5375. P. 1098–1108.
4. Fujisawa T., Inoue S., Hagiwara T. Desirable wafer edge flatness for CD control in photolithography // Optical Microlithography. Proc. SPIE. 2003. V. 5040. P. 600–609.

5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 721 с.
 6. Андреев В.А., Индукаев К.В., Осипов П.А. Способ определения микрорельефа объекта и оптических свойств приповерхностного слоя, модуляционный интерференционный микроскоп для осуществления способа // Патент России № 2181498. 2002.
 7. Andreev V.A., Indukaev K.V., Osipov P.A. Method for measuring the microrelief of an object and optical characteristics of near-surface layer, modulation interference microscope for carrying out said method // Europ. Pat. Appl. 01922153.0-2217, 23.01.2001.
 8. Andreev V.A., Indukaev K.V., Osipov P.A. Method for determining an object microrelief and optical properties of a surface layer, a modulation interference microscope for the method realization // USA Pat. № US 7,221,458, B2. 2003.
 9. Bennet A.H., Osterberg H., Jupnik H. Phase Microscopy: Principles and Applications. N.Y.: John Wiley & Sons Inc. 1951. 320 p.
 10. Andreev V.A., Indukaev K.V., Ioselev O.K., Legkii A., Lazarev G., Orlov D. Phase Modulation Microscope MIM-2.1 for Measurements of Surface Microrelief. Results of Measurements // J. Rus. Laser Research. 2005. V. 26. № 5. P.394–401.
 11. Andreev V.A., Indukaev K.V. The Rytov–Vladimirskii Phase and Interferometric Measurements // J. Rus. Laser Research. 2001. V. 22. № 1. P. 1–22.
 12. Pancharatnam S. Collected Work of S. Pancharatnam. Ed. G. W. Series. – London: Oxford Univ. Press, 1975.
 13. Индукаев К.В., Осипов П.А. Устройство перемещения объекта // Патент России №2385220. 2008.
-