

## Исследование возможности применения различных типов интерферометров в автоматизированной системе контроля приборов ориентации по Земле

*А.В. Ярцев, С.А. Синютин, Е.С. Семенистая*

*Южный федеральный университет, Таганрог*

**Аннотация:** В статье рассмотрены требования к автоматизированным системам контроля при производстве приборов ориентации по Земле. Проанализированы различные типы интерферометров, для использования в автоматизированной системе контроля изготовления приборов ориентации по Земле. В работе рассмотрены наиболее распространенные и применимые типы интерферометров, приведены их характерные особенности, некоторые конструктивы и область применения. Произведено сравнение параметров нескольких импортных и отечественных интерферометров, пригодных для использования в автоматизированной системе контроля. Рассмотрены достоинства и недостатки интерферометров по схемам Жамена, Маха-Цендера, Саньяка, Майкельсона и Физо. На основании параметров исследуемой задачи обоснован выбор в пользу конфигурации интерферометра по схеме Физо. Всем требованиям наиболее полно удовлетворяет интерферометр фирмы ООО «Опсотехническая лаборатория» OptoTL-60/125.

**Ключевые слова:** Автоматизированная система контроля, лазерный интерферометр, интерферометр Физо, оптика, фотоника, оптическое производство, интерферометрия.

### Введение

Оптико-электронные приборы, используемые для ориентации космических аппаратов, имеют высокие требования по массогабаритным характеристикам и точности измерения различных параметров. Для производства таких приборов помимо точности изготовления, также необходимо обеспечить наличие автоматизированной системы контроля (АСК), которая будет моделировать различные режимы работы устройства в условиях, приближенных к эксплуатационным [1]. В общем случае автоматизированная система контроля предназначена для имитации пространственного расположения Земли в широком диапазоне отклонений по крену и тангажу в большом диапазоне высот, в частности, от 140 км до 3300 км, имитации энергетического контраста исходящего излучения, соответствующего переходу Земля – Атмосфера – Космос, для проведения

---

настройки приборов ориентации по Земле (ПОЗ), проведения термогеометрической калибровки ПОЗ при изменении температуры на посадочном месте изделия ПОЗ, проверки функционирования ПОЗ в нормальных условиях, при пониженной и повышенной температуре посадочного места в условиях вакуума.

Соответственно, на точность работы АСК также налагаются высокие требования. Одной из самых важных функций автоматизированной системы контроля (АСК) является контроль качества оптических поверхностей. Требования к точности такого прибора составляют 30-50 нм, при этом желательно обеспечить бесконтактный способ измерений. Наиболее подходящим решением является применение для этих целей интерферометра с компьютерной обработкой результатов измерений [2]. Основной задачей интерферометра является формирование точной трехмерной картины исследуемой оптической поверхности. Проблему представляют оптические шумы, искажения и дисторсии. Для устойчивой работы системы интерферометр должен выполнять заданные функции при исследовании любых типов поверхностей. При производстве оптики чаще всего требуется контроль плоских и сферических поверхностей, но некоторые виды рассчитаны на контроль несферических поверхностей. Также необходимо, чтобы на результаты измерений не влияли перепады температур и вибрации.

Основные типы интерферометров имеют в основе своей работы принцип, когда пучок электромагнитного излучения, будь то световые волны или радиоволны, с помощью конструктива, встроенного в прибор, разделяется в пространстве на два или большее количество когерентных пучков. В результате деления отделенный пучок изменяет своё направление, и в результате имеет отличный от других оптический путь и попадает на экран. Таким образом происходит синтез интерференционной

---

картины, по которой определяется разность фаз проинтерферированных пучков волн в данной точке экрана [3].

Методы получения согласованных, когерентных волн могут быть совершенно различны, и по этому признаку определяются основные отличия типов интерферометров, хотя они имеют похожий принцип работы. Отличия также заключены и в том, какая величина измеряется: показатели преломления газа, интенсивность излучения, угловые размеры звезд и т.п.

### **История развития интерферометрии**

Основной сферой применения интерферометров является оптика, с их помощью определяют качество получаемых поверхностей. Они широко используются в физике, а также в прикладных науках для измерения размеров объектов и их перемещений. Находят применение интерферометры и в аддитивных технологиях для контроля формы и малых перемещений. Также применяются в телекоммуникациях, производстве лазеров, для контроля изменения микрорельефа и формы оптических компонент с высокой точностью. На химических производствах их применяют для определения состава веществ, с помощью Фурье-спектроскопии, получая соответствующие спектры поглощения или излучения. Интерферометры применяются также в астрономии для анализа излучения космических объектов.

Разработка разных схем интерферометров ведётся с середины XIX века. Так, интерферометр Жамена предложен Жюлем Жаменом в 1856 году и использовался для измерения малых показателей преломления газов [3]. Позднее на его основе были созданы интерферометры Рождественского, Маха — Цендера, Рэлея, которые устраняли недостатки первоначальной схемы и расширяли круг решаемых посредством этого прибора задач.

Необходимость ограничивать источник света узкой щелью приводит к тому, что яркость интерференционной картины при использовании схемы

Рэлея значительно ниже, чем по схеме Жамена. Однако достоинством интерферометра Рэлея является его простота и высокая устойчивость к тряске и прочим механическим воздействиям. Допустимы и одновременный поворот камер, закреплённых в общей кювете, и малое отклонение пучков лучей от параллельности в продольной плоскости, однако параллельность лучей в вертикальной плоскости должна быть выдержана строго, так как смещение одного из изображений щели вдоль её длины приведёт к наложению изображений двух разных некогерентных точек щели.

В интерферометре Маха-Цендера пучки получаемых волн с помощью полупрозрачного зеркала разводятся на достаточно большое расстояние, что позволяет интерференционные полосы одинаковой толщины сконцентрировать в нужной плоскости. Однако этот тип интерферометров имеет существенный недостаток: результаты измерений зависят от внешних условий, таких, как вибрации и колебания температуры. Настройка интерферометров Маха-Цендера достаточно трудоемка, если изменить одну из трёх величин: угла между соответственными лучами, координаты плоскости локализации и разности хода, то меняются и две оставшиеся, вследствие конструктивных особенностей.

Описывается также конструкция интерферометра, где вместо двух из 4 зеркал используются пентапризмы [4]. Перемещением одной из призм изменяют положение плоскости локализации  $P$  при постоянной ширине полос и почти постоянной разности хода, а перемещением другой призмы выравнивают разность хода, мало изменяя положение  $P$ . Однако пентапризмы применимы лишь в малогабаритных приборах, так как изготовление больших и точных призм из достаточно однородного стекла является сложным.

Вышеописанные схемы интерферометра неприменимы для поставленной задачи, поскольку требуется измерять параметры твердотельной поверхности, а не проницаемость газовой среды.

В настоящее время разработан и успешно выпускается французской компанией Photline Technologies по схеме Маха–Цендера электрооптический модулятор, который подробно рассмотрен в [5]. Этой фирмой выпускаются электрооптические модуляторы на основе кристаллов ниобата лития, для длин волн лазера 800, 1060, 1300, 1550 и 2000нм [6]. Интегрально-оптические интерферометры по схеме Маха-Цендера в России выпускает «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» для длины волны 1550нм с полуволновым напряжением 3,2В [7]. Для автоматизированной системы контроля применение интерферометра с мощным лазером нецелесообразно и избыточно, и возможно применение маломощного лазера.

Ещё одним достаточно распространенным типом интерферометров является интерферометр, основанный на эффекте Саньяка. Если для исследуемой задачи требуется создать ненулевой сдвиг фазы между лучами, то добиться этого можно вращением интерферометра. Появление фазового сдвига встречных электромагнитных волн называется эффектом Саньяка и описано в 1913 г. В конструкции, предложенной Саньяком, световые волны разделяются на два пучка полупрозрачной пластинкой-делителем. В данной схеме чётное или нечетное количество зеркал располагается по кругу, с помощью которых идёт направление пучков на делитель, и получается, что пучки волн проходят оптический путь в противоположных направлениях. Настройка такого интерферометра достаточно проста, т.к. оптическая схема обладает конструктивной симметрией и, следовательно между лучами отсутствует разница фаз.

Для построения схем большинства волоконно-оптических гироскопов используется возможность определения угловой скорости по фазовому

---

сдвигу во вращающемся интерферометре Саньяка. Математический аппарат для обработки сигнала волоконно-оптических фазовых датчиков описывается, например, в [8], где предложен способ измерения фазы интерферометрического сигнала на основе эффекта Саньяка. Однако для поставленной задачи желательно иметь неподвижный прибор, так как смещения лучей даже на малую величину могут породить ошибку измерения.

В астрономии применяется интерферометр интенсивности, в этом типе интерферометров измеряется коэффициент корреляции интенсивности излучения между двумя разнесёнными приёмниками, поэтому он называется ещё «корреляционный интерферометр». Этот тип интерферометров нашёл практическое применение для определения угловых размеров излучающих космических объектов. Впервые этот метод измерения применен для измерения углового размера Солнца в 1950 году в обсерватории Джодрелл-Бэнк с применением интерферометра, работающего на частоте 125 МГц. Позже, в 1954 году, Р.Х. Брауном и Р.К. Твиссом разработали математическую модель интерферометра интенсивности.

В АСК требуется измерять форму поверхностей, находящихся достаточно близко от устройства, но подобные астрономические интерферометры для её решения также неприменимы, в том числе потому, что они, как правило, имеют очень крупные размеры.

Альберт Майкельсон в 1890 году предложил схему интерферометра, основой которого является светоразделяющее зеркало. В таком интерферометре с помощью светоразделяющего зеркала свет разделяется на две части, затем происходит переотражение, и после через два отверстия в диафрагме направляется на собирающую линзу и фокусируется на экране. В подобной конструкции в фокусе линзы наблюдается интерференция света, проходящего через отверстия, а на экране происходит смешение лучей и интерференционная картина. Такая конструкция интерферометра

---

применяется для измерения угловых размеров излучающих космических объектов, в том числе, звезд, а также позволяет определить расстояние между двойными звёздами и т.п. [2, 9].

Произвести настройку интерферометра Майкельсона возможно с помощью вращения волновых пластин. Такие интерферометры нашли широкое применение в обеспечении учебного процесса и в измерительной технике для изучения преломления света в тонких пленках и для измерения малых расстояний. Для сравнения, в интерферометрах Фабри — Перо, настройка осуществляется с помощью управления высоким напряжением пьезоэлектрическими кристаллами или оптическими модуляторами. Основным преимуществом является простота обслуживания и эксплуатации. К недостаткам можно отнести низкую температурную чувствительность, ограниченный диапазон длин волн. Для точных измерений необходимо применение предварительных фильтров, что сказывается на коэффициенте пропускания.

Достаточно распространенной модификацией интерферометра Майкельсона является интерферометр Тваймана — Грина. Он в основном используется в тестировании оптических компонентов. Основным отличием от интерферометра Майкельсона является использование монохроматического точечного источника света и наличие коллиматора.

Одной из самых распространенных является схема интерферометра Физо, предложенная в 1868 г. В этом типе приборов интерференция происходит в промежутке между двумя отражающими поверхностями [2]. Источником излучения служит чаще всего полупроводниковый лазер. В конструкции Физо присутствует микрообъектив, в фокусе которого расположена точечная диафрагма. Когерентный пакет световых волн собирается микрообъективом и преобразуется в расходящийся пучок, который посредством коллиматора преобразуется в параллельный пакет

---

волн. Однородность пакета волн достигается за счёт точечной диафрагмы, выполняющей функцию фильтра пространственных частот.

Рабочее поле у интерферометров по схеме Физо от 5 до 150 мм. Наиболее востребованными являются серийно выпускаемые устройства с полем 102 мм. Такие интерферометры имеют компьютерное управление и позволяют формировать двух- и трехмерные карты исследуемой оптической поверхности. Интерференционная картина формируется из полос равной толщины в плоскости, оптически сопряженной с контролируемой поверхностью. Для этого в качестве эталона используют клиновидную пластину, обращенную эталонной поверхностью к тестируемой поверхности. Лучи, которые отразились от эталонной и проверяемой поверхности, а также от полупрозрачного зеркала, возвращаются обратно через коллимирующий объектив.

Интерферометр с плоской эталонной пластиной позволяет контролировать поверхность объекта только с небольшим отклонением от плоскости [10]. Для контроля сферических поверхностей вместо эталонной пластины устанавливают эталонный объектив, состоящий из нескольких линз, причем выходная линза имеет высококачественную апланатическую поверхность, которая формирует опорный волновой фронт на отражение [11]. Эталонные объективы с полем 102 мм и 153 мм и апертурой от  $f/0,65$  выпускаются многими зарубежными компаниями (Zygo, MRF, Marh и др.).

В интерферометрах Физо для контроля асферических поверхностей эталонные объективы дополняются корректорами волнового фронта на основе синтезированной голограммы [10].

### **Выбор интерферометра для АСК**

Сейчас выпускаются приборы следующих моделей: OptoTL-60/125, ООО «Опто-ТЛ», (поле 60 мм,  $\lambda=633$  нм, погрешность измерения -  $\delta \approx 1/20 \lambda$ , воспроизводимость -  $1/1500 \lambda$  rms), РИФ, группа компаний «Гранат» (поле 95

мм,  $\lambda=650$  нм,  $\delta \approx 1/20 \lambda$ ), ИФА 300, ФГУП «ВНИИОФИ» (поле до 300 мм) и ФТИ 100PS, ЗАО «ДИФРАКЦИЯ» ( $\lambda=632,8$  нм,  $\delta \approx 1/200 \lambda$ , воспроизводимость  $1/1000 \lambda$  rms) [12-15]. Интерферометры, выпускаемые производителями из других стран, имеют схожие характеристики: MODEL 4HPS, Graham Optical Systems, США ( $\lambda=635$  нм, воспроизводимость  $1/1000 \lambda$  rms), Verifire XPZ, ZYGO Inc., Германия ( $\lambda=632,8$  нм, воспроизводимость  $1/1800 \lambda$  rms), MarSurf FI 1100Z, Mahr GmbH, Германия ( $\lambda=632,8$  нм, погрешность измерения  $\delta \approx 1/100 \lambda$ , воспроизводимость  $1/5000 \lambda$  rms), FizCam 2000, 4D Technology, США ( $\lambda=658$  нм, погрешность измерения  $\delta \approx 1/20 \lambda$ , воспроизводимость  $1/1000 \lambda$  rms); VI-direct 100, MÖLLERWEDEL OPTICAL GmbH, Германия ( $\lambda=632,8$  нм, погрешность измерения  $\delta \approx 1/20 \lambda$ , воспроизводимость  $1/300 \lambda$  rms); SILO 100AV, OPTOPHASE, Франция ( $\lambda=632,8$  нм, погрешность измерения  $\delta \approx 1/20 \lambda$ , воспроизводимость  $1/1000 \lambda$  rms).

По точности и воспроизводимости результатов пригодны практически все рассмотренные интерферометры, и выбор необходимо осуществлять по параметрам легкости встраивания интерферометра в аппаратные средства АСК.

Поскольку АСК предназначен для контроля различных оптических поверхностей (плоских и сферических), то предпочтительна конструкция интерферометра с вертикальным расположением оптики. Кроме того, желательна защита от возможных вибраций пола помещения (достаточная масса). Различные типы поверхностей предполагают наличие доступного расширяемого набора объективов.

Таким требованиям наиболее полно удовлетворяет интерферометр фирмы ООО «Оптотехническая лаборатория» OptoTL-60/125 [12].

Серийно выпускаемый интерферометр OptoTL-60/125, изображенный на рис. 1, предназначен для контроля точности формы оптических

---

поверхностей, измерения их радиусов и проверки искажения волновых фронтов объективов.



Рис. 1. - Интерферометр OptoTL - 60/125

Характерными особенностями интерферометра OptoTL– 60/125 являются специально разработанное оригинальное программное обеспечение FastInterf для оперативных измерений в производственных условиях, оригинальная программа калибровки линейки для измерения радиусов. Также в комплект входят два монитора для быстрой юстировки и визуализации интерференционной картины. Применение двух источников света (когерентный и некогерентный) позволяет уменьшить влияние отражения второй стороны при контроле плоскопараллельных пластин. Вертикальное перемещение по штативу осуществляется серводвигателем, точное вертикальное перемещение производится при помощи генератора импульсов с чувствительностью 30 нм. В комплект входит два типоразмера эталонных объективов 60 мм и 125 мм с адаптером 60/125. Наличие пассивной системы виброизоляции позволяет применять данный интерферометр в производственных условиях.

## Заключение

Интерферометры применяются в различных областях: в производстве оптики, в машиностроении, в термометрии [16]. При выборе интерферометра для решения конкретной задачи необходимо в первую очередь руководствоваться целесообразностью применения того или иного конкретного устройства. В статье проведен обзор интерферометров большинства известных типов, рассмотрены наиболее распространенные модели, обсуждены характеристики. Особое внимание уделено рассмотрению конфигурации интерферометра Физо. Произведено сравнение параметров нескольких импортных и отечественных интерферометров, пригодных для использования в автоматизированной системе контроля. На основании требований к характеристикам интерферометра выбран интерферометр OptoTL-60/125 фирмы «ООО Оптотехническая лаборатория».

Работы, результаты которых представлены в данной статье, проводились на базе ФГАОУ ВО ЮФУ совместно с ОАО НПП КП «Квант» в рамках проекта: «Разработка и создание инновационного стендового оборудования и высокотехнологичного производства радиационностойкого малогабаритного прибора ориентации космических аппаратов на Землю секущего типа на базе электронных компонентов отечественного производства» по Постановлению Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218 «Об утверждении Правил предоставления субсидий на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств».

## Литература

1. Петров С.Н. Современное оптическое производство и некоторые тенденции его развития // Инженерный вестник Дона, 2009, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/141](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/141).
  2. Полещук, А.Г., Хомутов В.Н., Маточкин, Насыров Р.К., Черкашин В.В. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей // Фотоника. 2016. № 4. С. 38-51.
  3. Сивухин Д. В. Оптика. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2005. Т. 4. 768 с.
  4. Hariharan P. Basics of interferometry. Academic Press, 2007. 226 p.
  5. Афанасьев В. М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 4. С. 341–369.
  6. Вычислительная фотоника. Книги по радиифотонике. URL: [radiofotonika.ru/books/b018.pdf](http://radiofotonika.ru/books/b018.pdf) (Дата обращения 13.08.2021г.).
  7. Пономарев Р.С. Модулятор интенсивности излучения на интерферометре Маха–Цендера. URL: [fibopt.ru/rfo2011/presentation/A7-3.pdf](http://fibopt.ru/rfo2011/presentation/A7-3.pdf) (Дата обращения 13.08.2021г.).
  8. Г.П. Мирошниченко, И.Г. Дейнека, Д.А. Погорелая, Ф.А. Шуклин, М.А. Смоловик. Способ измерения фазы интерферометрического сигнала. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 61–67.
  9. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 7th. CUP Archive, 2000. 986 p.
  10. Brock N., Hayes J., Kimbrough B., Millerd J., North-Morris M., Novak M., and Wyant J. C. Dynamic interferometry. // Proc. SPIE 5875, Novel Optical Systems Design and Optimization VIII, 58750F (29 August 2005); URL: [doi.org/10.1117/12.621245](https://doi.org/10.1117/12.621245) (Дата обращения 20.08.2021г.).
-

11. Smythe R. Practical aspects of modern interferometry for optical manufacturing quality control: Part 1. // Advanced Optical Technologies. 2012. v.1. pp.59–64.
12. ООО «Опто-технологическая лаборатория». URL: [optotl.ru/testing\\_devices](http://optotl.ru/testing_devices) (Дата обращения 20.08.2021г.).
13. ООО «Активная Оптика НайтН». URL: [nighn.ru/files/products/files/interf/interf\\_ru.htm](http://nighn.ru/files/products/files/interf/interf_ru.htm) (Дата обращения 20.08.2021г.).
14. Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений URL: [vniiofi.ru/depart/m44/ifa-300.html](http://vniiofi.ru/depart/m44/ifa-300.html) (Дата обращения 20.08.2021г.).
15. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н. Лазерный интерферометр ФТИ-100. // Сборник трудов Научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013», конференция «СибОптика –2013», г. Новосибирск. 2013. вып.3, т.5. С. 25–31.
16. Гусева Н.В., Киселёв М.М, Дородов П.В., Михеев Г.М., Морозов В.А. Измерение плотности ВЧ и СВЧ энергии методом лазерной интерференционной термометрии // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1489](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1489).

### References

1. Petrov S.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2009, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/141](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/141).
  2. Poleshchuk A.G., Khomutov V.N., Matochkin, Nasyrov R.K., Cherkashin V.V. Fotonika, 2016. № 4. pp. 38-51.
  3. Sivukhin D.V. Optika. Obshchiy kurs fiziki [Optics. General course of physics]. Moscow: Fizmatlit, 2005. Т. 4. 768 p.
  4. Hariharan P. Basics of interferometry. Academic Press, 2007. 226 p.
  5. Afanasyev V.M. Prikladnaya fotonika. 2016. Т. 3. No. 4. pp. 341–369.
-

6. Vychislitel'naya fotonika. Knigi po radiofotonike [Computational Photonics. Books on radio-photonics]. URL: [radiofotonika.ru/books/b018.pdf](http://radiofotonika.ru/books/b018.pdf).
7. Ponomarev R.S. Modulyator intensivnosti izlucheniya na interferometre Makha–Tsendera [Radiation intensity modulator on a Mach – Zehnder interferometer]. URL: [fibopt.ru/rfo2011/presentation/A7-3.pdf](http://fibopt.ru/rfo2011/presentation/A7-3.pdf).
8. Miroshnichenko G.P., Deyneka I.G., Pogorelaya D.A., Shuklin F.A., Smolovik M.A. Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2013. № 6 (88). pp. 61–67.
9. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 7th. CUP Archive, 2000. 986 p.
10. Brock N., Hayes J., Kimbrough B., Millerd J., North-Morris M., Novak M., and Wyant J. C. Dynamic interferometry. Proc. SPIE 5875, Novel Optical Systems Design and Optimization VIII, 58750F (29 August 2005); URL: [doi.org/10.1117/12.621245](https://doi.org/10.1117/12.621245).
11. Smythe R. Practical aspects of modern interferometry for optical manufacturing quality control: Part 1. Advanced Optical Technologies. 2012. v.1. pp.59–64.
12. ООО «Opto-tekhnologicheskaya laboratoriya» [LLC "Optic technological laboratory"]. URL: [optotl.ru/testing\\_devices](http://optotl.ru/testing_devices).
13. ООО «Aktivnaya Optika NaytN» [LLC "Active Optics NightN"]. URL: [nightn.ru/files/products/files/interf/interf\\_ru.htm](http://nightn.ru/files/products/files/interf/interf_ru.htm)
14. Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut optiko-fizicheskikh izmereniy [All-Russian scientific research institute of optical and physical measurements]. URL: [vniiofi.ru/depart/m44/ifa-300.html](http://vniiofi.ru/depart/m44/ifa-300.html) (Date assessed: 20.08.2021.).
15. Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K., Matochkin A.Ye., Cherkashin V.V., Khomutov V.N. Sbornik trudov Nauchnogo kongressa «Interekspos GEO-



Сибир'-2013», konferentsiya «SibOptika –2013», g. Novosibirsk. 2013. V.3, t.5. pp. 25–31.

16.Guseva N.V., Kiselov M.M, Dorodov P.V., Mikheyev G.M., Morozov V.A.  
Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1489.