

А. М. БУРБАЕВ, А. И. ЛЕОНТЬЕВА, Г. А. ОДИНОКИХ, Д. А. ФРЕНКЕЛЬ

ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СХЕМАХ КОНТРОЛЯ И ЮСТИРОВКИ ОЭП

Рассматриваются принципиальные особенности построения оптических схем контроля в процессе юстировки приборов, инвариантных ко всем или нерегистрируемым смещениям и поворотам оптической системы.

***Ключевые слова:** инвариантные оптические системы, автоколлиматор, схемы контроля и юстировки, уголкового отражатель.*

Качество оптических приборов, производительность труда в процессе их сборки и технологическая себестоимость во многом зависят от методов и средств, применяемых при контроле и юстировке [1—3]. К современным схемам контроля предъявляются повышенные требования по точности и надежности в сочетании с возможностью автоматизации. В наибольшей степени таким требованиям отвечают методы и средства контроля, в схемах которых

применяются инвариантные оптические системы. Под инвариантностью оптической системы понимается неизменность ее свойств или невосприимчивость к изменению пространственного положения одного или нескольких ее элементов.

Инвариантные оптические системы известны достаточно давно и успешно применяются в оптических схемах измерительных, геодезических и других оптических приборов, обеспечивая их точность, надежность, универсальность, „нерасстраиваемость“ и возможность автоматизации процесса измерения [2, 4—6]. Вместе с тем информация о применении инвариантных оптических систем в схемах юстировки в технической литературе встречается чрезвычайно редко, хотя преимущества таких схем очевидны. Рассмотрение многообразных задач юстировки и принципиальных особенностей построения схем для их решения на основе инвариантных оптических систем, в том числе и разработанных на кафедре компьютеризации и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО, является предметом исследования в настоящей статье.

Понятие „инвариантность“ носит относительный характер. Это означает, что оптическая система обладает неизменностью своих свойств лишь при определенных условиях, например только в параллельном пучке лучей, при поворотах или смещениях вокруг или вдоль определенных осей системы координат, связанной с данной оптической системой. Система может обладать так называемой „избирательной инвариантностью“ [7], т.е. быть инвариантной к углу отклонения осевого луча в одной плоскости и неинвариантной к отклонению осевого луча в плоскости, перпендикулярной первой. В дальнейшем будем рассматривать свойства инвариантных оптических систем в параллельном пучке лучей, где чаще всего осуществляется контроль.

Простейшим примером системы, инвариантной к отдельным смещениям и поворотам, является плоское зеркало. Если ось z неподвижной прямоугольной системы координат направить вдоль нормали к отражающей плоскости зеркала, то любые его смещения в плоскости $хоу$, параллельной отражающей плоскости, и повороты вокруг осей, параллельных нормали, инвариантны к направлению отраженных лучей и положению изображения.

Другим простым примером инвариантной системы может служить зеркальный ромб (ЗР) — система из двух параллельных друг другу зеркал. Любые сдвиги зеркального ромба, а также поворот его вокруг оси, параллельной нормальям к отражающим плоскостям, инвариантны к направлению отраженных лучей и положению изображения. Ромб-призма, эквивалентная по своему действию зеркальному ромбу, также инвариантна к любым сдвигам. В параллельном же ходе лучей любые сдвиги и повороты ЗР и ромб-призмы инвариантны. Пучок лучей, отраженный зеркальным ромбом, не изменяет своего направления.

Следующей оптической системой, представляющей интерес, является угловое (двойное) зеркало (УЗ) или призма с двумя отражающими гранями. В отличие от зеркального ромба, зеркала УЗ и грани призм не параллельны. Основным свойством этой системы является постоянство угла отклонения δ отраженных лучей (по отношению к падающим) в плоскости главного сечения. Причем $\delta = 2\sigma$, где σ — угол между отражающими плоскостями (гранями). В сходящемся ходе лучей действие углового зеркала выражается в повороте пространства предметов вокруг ребра, образованного пересечением зеркал, на угол 2σ в направлении от первого (по ходу лучей) зеркала ко второму. Отсюда следует инвариантность УЗ к повороту вокруг ребра. В призмах также имеется ось, параллельная ребру, образованному отражающими гранями, поворот вокруг которой инвариантен. В параллельном ходе лучей повороты вокруг любой оси, параллельной ребру, для призмы с двумя отражениями и УЗ инвариантны. Более того, как показывают исследования свойств этих систем, небольшие наклоны угловых зеркал (как и призм, им эквивалентных) вокруг осей, перпендикулярных ребру, обуславливают изменения угла δ отклонения лучей в главном сечении лишь на величину второго порядка малости [1].

Наиболее интересной зеркальной системой является прямоугольный триэдр или уголко-вый отражатель. Другие названия этой системы — световозвращатель и трипельпризма. Призма, эквивалентная уголкового отражателю, обозначена в работе [1] как БкР-180°. Угол-ковый отражатель состоит из трех взаимоперпендикулярных отражающих граней. Его основ-ное свойство заключается в том, что он отражает лучи в строго обратном направлении, неза-висимо от угла их падения.

Свойства перечисленных выше зеркально-призменных систем могут быть описаны мат-рицами их действия на направление падающих лучей [1, 8]. Приведем выражения для матриц наиболее часто применяемых инвариантных зеркально-призменных систем.

Для УЗ, в случае когда угол σ между зеркалами составляет 90°, а ось z направлена вдоль ребра, матрица имеет следующий вид:

$$P''_{\sigma=90^\circ} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = -P'_{\text{ЭКВ}},$$

где $P'_{\text{ЭКВ}}$ — матрица плоского зеркала, перпендикулярного ребру прямоугольного УЗ, эквива-лентного по своему действию угловому зеркалу в параллельном ходе лучей; для исключения отрицательного знака перед матрицей следует поменять на противоположные знаки всех ор-тов пространства предметов.

Для ромб-призмы, когда $\sigma = 0$,

$$P''_{\sigma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = E,$$

где E — единичная матрица.

Для прямоугольного триэдра (уголкового отражателя) в любой системе координат мат-рица определяется как

$$P'''_{\sigma_{\text{ЭКВ}}} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = -E.$$

Рассмотрим конкретные примеры применения инвариантных оптических систем, при-меняемых в схемах контроля и юстировки оптических приборов.

Пример 1. Рассмотренные выше зеркальный ромб и призма БкР-180° широко исполь-зуются в схемах контроля, выверки и юстировки многоканальных приборов, для параллель-ного переноса пучка лучей излучающих систем, например коллиматоров, лазеров, а также ви-зирных осей зрительных труб, тепло- и телевизионных камер, автоколлиматоров.

Пример 2. На рис. 1 показана схема специального искателя, составленного из светоде-лительного куба-призмы 3 и уголкового отражателя 2. Искатель предназначен для облегчения поиска автоколлимационного изображения, образуемого зеркалом 1 малого размера, и для приведения его в поле зрения автоколлиматора 4, имеющего, как правило, малое угловое по-ле зрения. Оператор через куб-призму искателя наблюдает два освещенных поля и посредст-вом наклонов автоколлиматора совмещает эти два поля. В этот момент в поле зрения авто-коллиматора появляется автоколлимационное изображение. Покажем, что угловое положение искателя не влияет на взаимное положение совмещаемых полей. Для этого нужно доказать, что угол между ортом \mathbf{A} осевого луча, выходящего из автоколлиматора 4, и ортом \mathbf{A}' луча,

отраженного от плоского зеркала *1*, и в отсутствие специального искателя, и при его установке сохраняет свое значение. Величину угла δ можно найти из скалярного произведения указанных ортов:

$$\cos\delta = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}'.$$

После установки в ход лучей искателя пучок разделяется, но и при этом каждая его часть отражается от одной и той же светоделительной грани. В работе [8] доказано, что угол между векторами после отражения в плоском зеркале не изменяется. Следовательно, угловое положение искателя не влияет на взаимное положение совмещаемых полей и точная его установка не требуется.

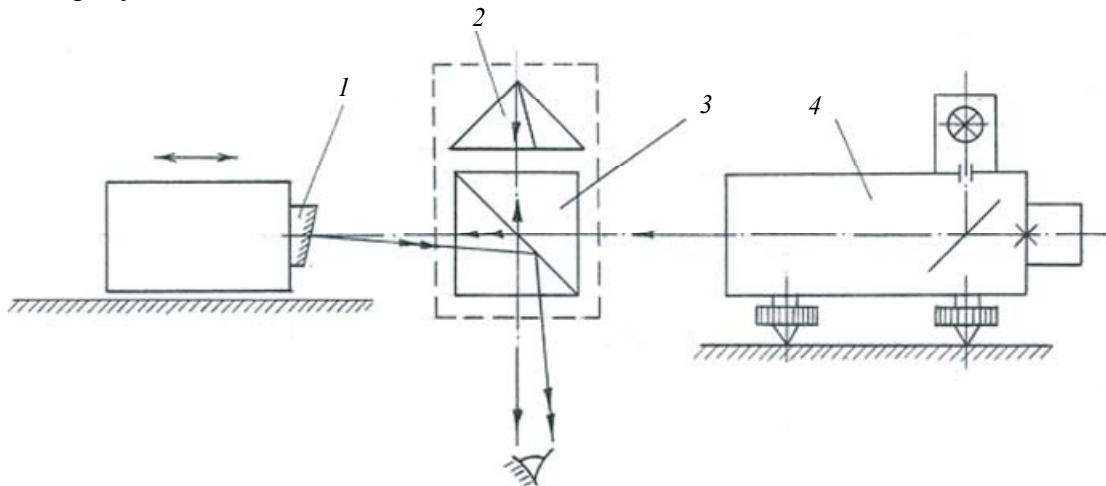


Рис. 1

Пример 3. На рис. 2 приведена схема приспособления ГК-3 для горизонтального дальномера ИКУ-2. При сборке этого устройства необходимо обеспечить строгую параллельность рабочих плоскостей доведенных до зеркальной точности стальных угольников 2 и 3, установленных на едином основании 1 и повернутых в противоположные стороны. Для контроля следует использовать автоколлимационный метод с разделением зрачка автоколлиматора 4, а также вспомогательный отражатель 5 в виде призмы БкР-180° (уголкового отражателя).

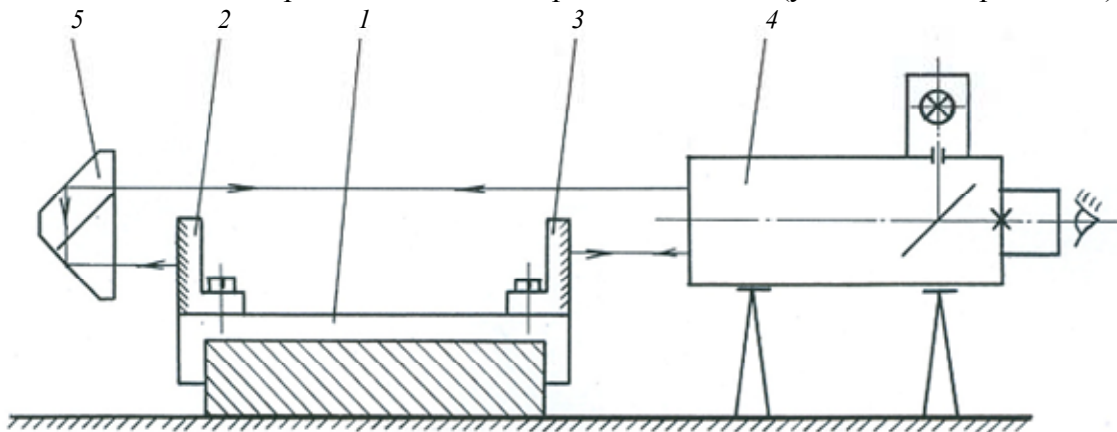


Рис. 2

Пример 4. В оптической системе, представленной на рис. 3, при юстировке автоколлимационной трубы 1, содержащей окуляр со светоделительным кубиком и две сетки — основную 2 и автоколлимационную 3, необходимо не только совместить обе сетки с фокальной плоскостью объектива трубы, но и устранить взаимный разворот штрихов сеток, а также совместить центры их перекрестий, т.е. совместить визирные оси коллиматорной ветви и приемной.

Обычно для этих целей используют контрольную зрительную трубу, которую устанавливают перед юстируемой. Юстировку осуществляют подвижками сетки 3. Однако результат

юстировки приходится контролировать путем наблюдения в окуляр контрольной трубы. В интервале между двумя переходами этой операции юстировщику приходится перемещаться от одного окуляра к другому (автоколлимационные трубы обычно длиннофокусные) и, более того, находясь у окуляра юстируемой трубы 1, осуществлять подвижки наугад. Иными словами, операции контроля и собственно юстировки оказались в данном случае разделенными в пространстве и во времени, что увеличивает затраты времени на юстировку.

Совсем другой результат достигается, если вместо контрольной трубы применить угловой отражатель 4. Тогда в поле зрения юстируемой трубы 1 наблюдаются две сетки 2 и 3. В этом случае необходимо автоколлимационное изображение совместить с перекрестием основной сетки 2 (приемной ветви).

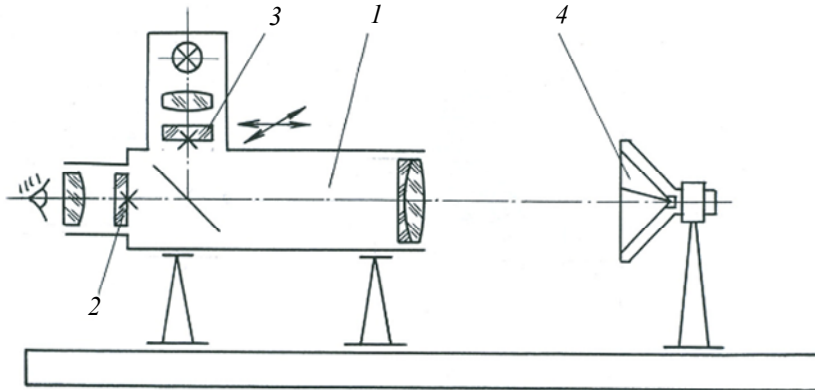


Рис. 3

Пример 5. На рис. 4 представлена оптическая система цехового интерферометра ИТ-100, построенного по схеме Физо; здесь: 1 — ртутная лампа, 2 — конденсор, 3 — точечная диафрагма, 4 — зеркало, 5 — полупрозрачная пластина, 6 — объектив, 7, 8 — клинья-эталоны, 9 — оправа клиньев, 10 — предметный столик, 11 — револьвер с проекционными объективами и отверстием, 12 — окуляр-микрометр. При юстировке интерферометра необходимо достичь телецентричности пучка лучей в пространстве образования интерференционных полос равной толщины. Это означает, что помимо обеспечения плоскостности волнового фронта, необходимо также обеспечить перпендикулярность пучка лучей эталонной плоскости „А“ клиньев интерферометра.

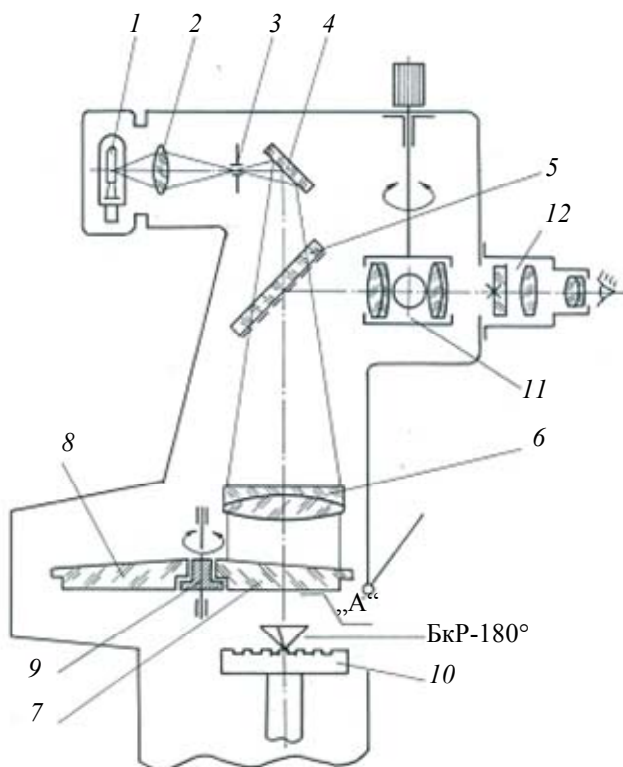


Рис. 4

предметный столик установить трипельпризму, что позволяет как бы повернуть коллиматорную ветвь на 180° , направляя пучок света на клин снизу. Тогда в окуляр наблюдаются два

изображения точечной диафрагмы. Посредством наклонов зеркала 4 совмещают оба изображения, а путем наклонов пластины 5 приводят их в центр поля зрения.

Пример 6. В процессе юстировки узла клиньев рассмотренного выше интерферометра ИТ-100 необходимо установить главные сечения двух клиньев, круглых по форме, параллельно диаметральной плоскости их оправы (имеющей форму круглого диска $\varnothing 400$ мм), проходящей через геометрические центры клиньев с погрешностью $\pm 2^\circ$.

Использование коллимационной схемы контроля (с приставным коллиматором — „утенком“) создает дополнительную непростую задачу — выставление в заданной плоскости визирной оси зрительной трубы, фиксирующей направление отклоненного клином пучка.

Поиск более рациональной схемы контроля привел авторов к решению применить автоколлимационный метод в сочетании с отражателем, обладающим особыми свойствами: он должен быть инвариантным к углу отклонения пучка лучей клином в его главном сечении, но чувствительным к развороту клина вокруг оптической оси системы. Таким отражателем оказалась призма БР-180° (рис. 5).

До установки в ход лучей клина 2 визирная ось автоколлимационной трубы 3 выставляется перпендикулярно ребру Р призмы 1 путем совмещения автоколлимационного изображения перекрестия с перекрестием основной сетки. При введении в пучок лучей клина автоколлимационное изображение в поле зрения сместится вдоль оси x , параллельной ребру Р призмы, если главное сечение клина окажется неперпендикулярным ребру Р. Установку же ребра призмы перпендикулярно заданной диаметральной плоскости оправы можно осуществить конструктивно — базированием оправы призмы в приспособлении, на которое устанавливается юстируемый узел клиньев.

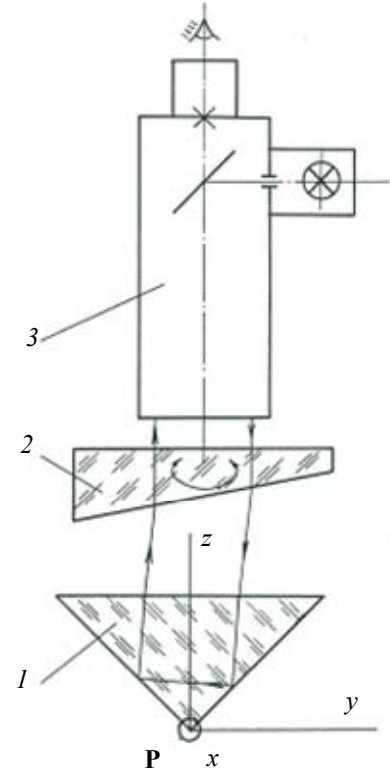


Рис. 5

Пример 7. Довольно часто в процессе юстировки приборов возникает задача контроля угла отклонения пучка света, отраженного зеркалом, когда угол отклонения отличается от 90° . В таких приборах, например, как измерительные проекторы требуемая точность установки зеркал составляет несколько угловых минут [8].

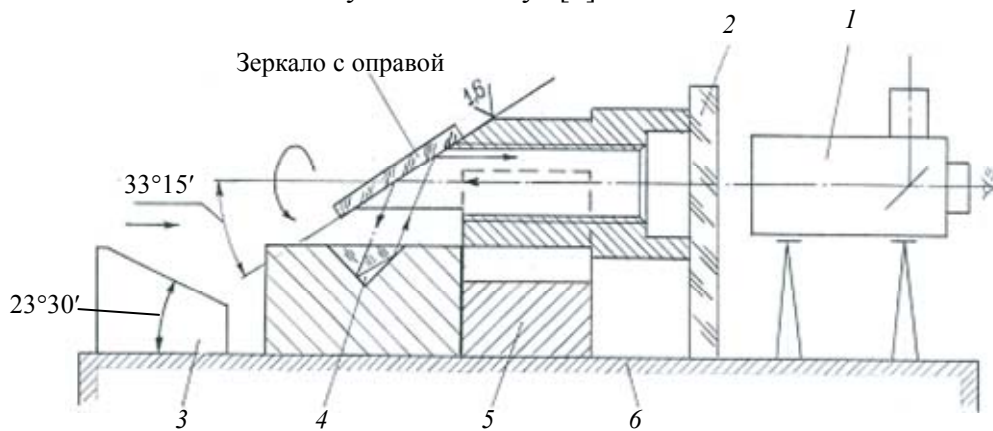


Рис. 6

Рассмотрим оптическую систему, схема которой приведена на рис. 6. Автоколлимационный контроль угла отклонения отраженного пучка света осуществляют в два этапа. На первом этапе зеркало в оправе, имеющей цилиндрическую ступенчатую форму с отверстием

внутри, базируют в стальной призме 5 таким образом, чтобы плоскость падения отраженного осевого луча оказалась перпендикулярной плоскости контрольной плиты 6, на которой собрана данная установка. Для этой цели используют отражатель 4 в виде призмы БР-180°, ребро прямого угла которой параллельно основанию оправы.

Разворотом оправы с зеркалом на призме 5 приводят автоколлимационное изображение перекрестия трубы 1, установленной с использованием вспомогательного зеркала 2, в центр поля зрения. Посредством поворота на плите 6 отражателя 4 устраняют разворот автоколлимационного изображения по отношению к собственному перекрестию трубы 1. На втором этапе отражатель 4 заменяют отражателем 3, имеющим вид короткого валика из закаленной стали ХВГ со скошенным торцом. Оба торца валика представляют собой доведенные до оптической точности плоскости, причем двугранный угол σ , образованный торцами контрольного валика, равен $\sigma = 90^\circ - \delta$, где δ — угол отклонения осевого луча. Разворотом отражателя 3 автоколлимационное изображение приводят в центр поля. Его смещение в вертикальной плоскости определяет погрешность угла отклонения.

Таким образом, на примере рассмотренных инвариантных оптических систем показано, что их применение в схемах контроля и юстировки ОЭП придает компактность схемам и значительно упрощает сам технологический процесс, позволяя повысить его производительность за счет сокращения числа используемых средств контроля, легкости установки этих систем как внутри прибора, так и в схемах контроля отдельных узлов, обеспечения доступности к регулируемым элементам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.
2. Сухопаров С. А. На службе оптическому приборостроению. Сер. „Выдающиеся ученые Университета ИТМО“. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. Вып. 14. 218 с.
3. Бурбаев А. М. Пути обеспечения технологичности конструкций оптических приборов и совершенствования сборочных процессов. Современные технологии: Сб. научных статей / Под ред. С. А. Козлова и В. О. Никифорова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2002. 318 с.
4. Левин Б. М., Шевцов И. В., Зайцев И. В. и др. Прибор для автоматической регистрации непрямолинейности поверхности // Измерительная техника. 1970. № 1.
5. Сухопаров С. А., Горлушкина Н. Н. Автоматический телевизионный измерительный модуль // Оптич. журн. 1994. № 9. С. 85—88.
6. Горбачёв А. А., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Построение инвариантных оптических схем оптико-электронных систем с сопряженным матричным полем анализа // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 54—57.
7. Син Сянмин. Определение параметров контрольного элемента углоизмерительной ОЭС с избирательной инвариантностью // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2006. Вып. 26.
8. Погарев Г. В., Киселев Н. Г. Оптические юстировочные задачи: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 260 с.

Сведения об авторах

Амир Маруанович Бурбаев

— доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;
E-mail: aburbaev@mail.ru

Алена Игоревна Леонтьева

— студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Глеб Андреевич Одиноких

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Давид Александрович Френкель — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
26.04.11 г.