

ЮСТИРОВКА ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ КОЛЛИМАТОРОВ С ВНЕОСЕВЫМИ АСФЕРИЧЕСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ

© 2007 г. Н. П. Ларионов, канд. техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Рассмотрен метод юстировки двухзеркального коллиматора, выходным зеркалом которого является вогнутое внеосевое параболическое зеркало, а входным зеркалом – либо плоское, либо выпуклое внеосевое асферическое зеркало. В процессе юстировки сначала посредством двух лучей лазера, системы диафрагм, а также двух светоделителей и плоского зеркала задаются направление осей базовых асферических поверхностей внеосевых зеркал и направление оси пучка лучей, формируемого коллиматором, а также положение фокальной плоскости коллиматора. Затем формируется оптическая система интерферометра типа Тваймана–Грина, в сигнальную ветвь которого входят зеркальные элементы юстируемого коллиматора, а также плоское зеркало для осуществления в ней автоколлимационного хода лучей. Юстировка осуществляется с повышенной чувствительностью, точностью и надежностью благодаря двукратному прохождению сигнального пучка лучей через юстируемый коллиматор и контролю состояния юстировки по интерференционной картине.

Коды OCIS: 050.1970.

Поступила в редакцию 12.10.2006.

Зеркальные коллиматоры с внеосевыми зеркалами обладают двумя характерными свойствами: у них отсутствуют хроматические аберрации и исключено частичное экранирование выходящего из коллиматора параллельного пучка лучей. Такие коллиматоры находят применение в спектральных приборах [1], в аппаратуре для контроля характеристик тепловизионных систем (ТВС) [2], а также для формирования осветительной части интерферометров, в которых используются источники излучения с различными длинами волн. Оптические системы таких коллиматоров формируются на основе внеосевого параболического зеркала вогнутой формы. В том случае, когда необходимо создать компактный коллиматор, в его систему дополнительно включается плоское зеркало, а с целью сохранения компактности и повышения качества изображения по полю зрения коллиматора, что необходимо, в частности, при контроле ТВС, в качестве дополнительного зеркала используется выпуклое внеосевое зеркало либо в виде гиперблоида (система брахит) [3], либо в виде зеркала с асферической поверхностью более высокого порядка. В этом случае оптические системы обоих вариантов коллиматора представляют собой тип системы Кассегрена для телескопов [3] с обратным ходом лучей. Поэтому плоское и выпуклое зеркала коллиматоров являются входными зеркалами, а параболоид – выходным зеркалом. Юстировка таких коллиматоров с высокой точностью является сложной задачей. В данной статье рассматривается метод юстировки обоих вариантов коллиматоров, обладающий повышенной чувствительностью и обеспечивающий юстировку двухзеркальных

коллиматоров с внеосевыми асферическими зеркалами с высокой точностью и надежностью. В этом методе юстировка коллиматора с выпуклым входным зеркалом включает операции юстировки коллиматора с плоским зеркалом. Поэтому далее будет рассматриваться последовательность операций при юстировке коллиматора с входным зеркалом выпуклой формы.

На рис. 1а представлена оптическая схема коллиматора, где лучи, вышедшие из точечного источника света A , расположенного в фокусе F коллиматора, отражаются от выпуклой поверхности ξ_1 входного зеркала 1, а затем отражаются от вогнутой поверхности ξ_2 выходного зеркала 2, преобразуясь в параллельный пучок лучей. Поверхность ξ_1 является внеосевой частью базовой осесимметричной асферической поверхности второго или более высокого порядка с вершиной в точке O_1 , а поверхность ξ_2 является внеосевой частью базовой осесимметричной параболической поверхности с вершиной в точке O_2 и фокусом в точке $F_{\text{п}}$. Оси симметрии базовых асферических поверхностей совпадают между собой и лежат на оси V_1V_2 , на которой расположены точки O_1, O_2, A, F и $F_{\text{п}}$. Точки K_1 и K_2 расположены в середине рабочих частей зеркальных поверхностей ξ_1 и ξ_2 и удалены от оси V_1V_2 на расстояния, равные отрезкам соответственно h_1 и h_2 . Точка $A_{\text{п}}$ является симметричной точке $F_{\text{п}}$ относительно плоскости, проходящей через точку K_1 перпендикулярно оси V_1V_2 ; поэтому она также находится на оси V_1V_2 . Точки E_1 и E_2 лежат на краях профилей поверхностей ξ_1 и ξ_2 со стороны оси V_1V_2 . Все перечисленные точки лежат в меридиональной

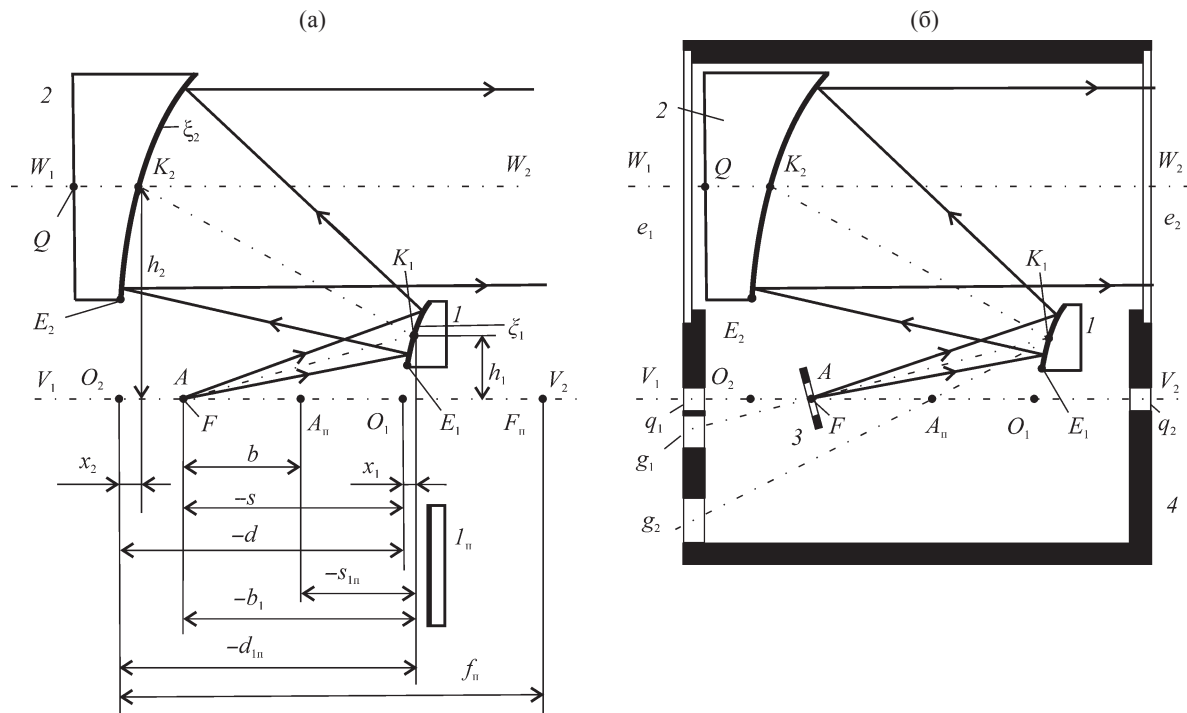


Рис. 1. а – оптическая схема двухзеркального коллиматора с внеосевыми асферическими зеркалами: A – точечный источник света, I – входное зеркало с внеосевой выпуклой асферической поверхностью ξ_1 , 2 – выходное зеркало с внеосевой вогнутой параболической поверхностью ξ_2 , I_n – плоское зеркало; б – схематическое изображение конструктивных особенностей корпуса коллиматора: 3 – оправа для установки тест-объекта, 4 – корпус коллиматора, e_1 – отверстие для ввода в корпус выходного зеркала 2 , e_2 – выходное окно.

плоскости оптической схемы, в которой находится и прямая линия W_1W_2 , проходящая через точку K_2 параллельно оси V_1V_2 и являющаяся осью параллельного пучка лучей на выходе коллиматора. Параметрами схемы являются отрезки s , d , h_1 и h_2 , которые определяются на стадии расчета оптической схемы коллиматора; остальные отрезки выражаются через них, а также абсциссу точки K_1 и фокусное расстояние f_n параболического зеркала следующими равенствами:

$$\begin{aligned} b_1 &= s - x_1, \quad d_{1n} = d - x_1, \quad s_{1n} = x_1 - f_n - d, \\ b &= 2x_1 - d - s - f_n. \end{aligned} \quad (1)$$

В процессе юстировки коллиматора используются виброизолированный стол, лазер, набор плоских зеркал и светоделителей, набор диафрагм, расширитель лазерного пучка лучей, объективы и интерферометр типа Тваймана–Грина, в сигнальную ветвь которого входят зеркальные элементы юстируемого коллиматора. Последовательность операций юстировки рассматривается далее в пп. 1–4.

1. На начальной стадии юстировки задаются направления осей V_1V_2 и W_1W_2 и положения точек A , A_n и K_1 (рис. 1а), которые должны лежать в одной плоскости. Для этого используются элементы, изображенные на рис. 2а. Они располагаются на вибро-

изолированном столе и имеют определенные конструктивные особенности. Так, диафрагмы 9 и 10 являются идентичными между собой и каждая снабжена двумя отверстиями, центры которых разнесены на расстояние h_2 ; диафрагма 13 также имеет два отверстия, центры которых разнесены на расстояние h_1 , а диафрагмы 11, 12 и 14 имеют по одному отверстию. Диаметры отверстий у всех диафрагм одинаковые и равны 2 мм. У этих диафрагм предварительно регулируется высота положения центров их отверстий относительно плоскости стола таким образом, чтобы она была одинаковой для всех отверстий; обозначим ее условно через H . Такое же требование необходимо выполнить для положения центров рабочих частей светоделителей 6 и 7 и зеркала 8. Для задания направления осей V_1V_2 и W_1W_2 необходимо указанные выше элементы и лазер 5 установить на виброизолированном столе так, как показано на рис. 2а. При этом диафрагма 9 устанавливается вблизи светоделителя 7, а диафрагма 10 – на расстоянии, равном примерно $2f_n$ от нее. Все эти элементы ориентируются так, чтобы луч лазера 5 проходил через центры рабочих частей светоделителей 6 и 7 и через центр одного из отверстий каждой из диафрагм 9 и 10, а отраженные от светоделителей 6 и 7 лучи лазера направлялись соответственно в центр рабочей части зеркала 8 и

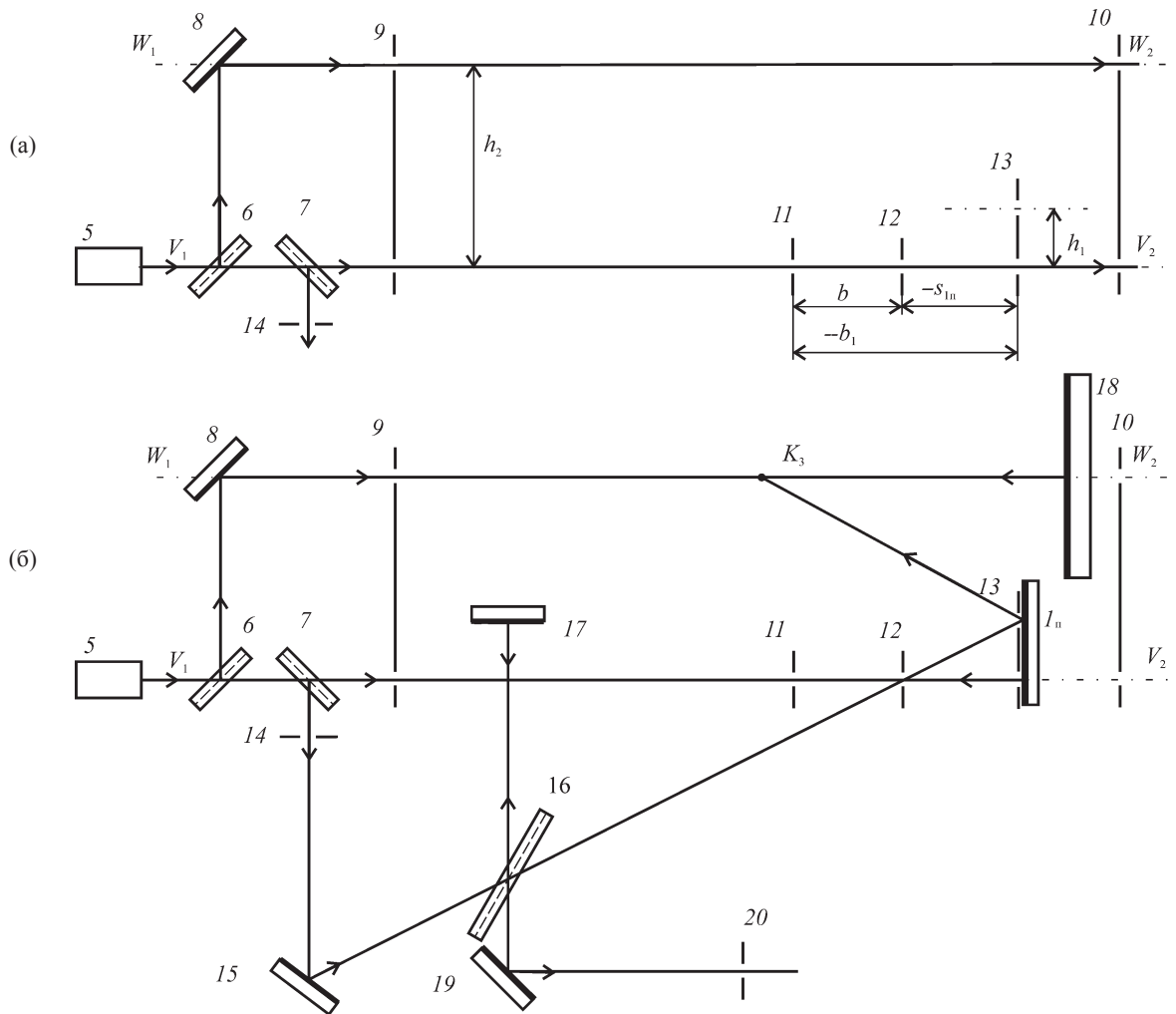


Рис. 2. а – оптическая схема для задания направления и положения осей двух осесимметричных асферических поверхностей, являющихся материнскими для поверхностей зеркал коллиматора, и оси параллельного пучка лучей на выходе коллиматора; б – оптическая схема для задания осей опорной и сигнальной ветвей и регистрирующей части интерферометра типа Тваймана–Грина для юстировки выходного зеркала коллиматора. Пояснения см. в тексте.

центр отверстия диафрагмы 14. Плоскости диафрагм 9 и 10 должны быть перпендикулярны к лазерному лучу. Это можно проконтролировать, касаясь вспомогательным плоским зеркалом тыльной стороны диафрагмы с перекрытием им ее отверстия (отраженный в зоне отверстия луч лазера должен распространяться в обратном направлении). Угловыми поворотами зеркала 8 и при необходимости дополнительными поворотами светоделителя 6 отраженный от зеркала 8 луч лазера направляется в другие отверстия диафрагм 9 и 10. Два луча лазера, проходящие через центры отверстий диафрагм 9 и 10, задают направления и положения осей V_1V_2 и W_1W_2 .

Для задания положения точки A на оси V_1V_2 на стол устанавливается диафрагма 11 между диафрагмами 9 и 10 примерно на одинаковых расстояниях от них так, чтобы луч лазера, распространяющийся вдоль оси V_1V_2 , проходил через центр отверстия

диафрагмы 11, который и задает положение точки A . Для задания положения точки A_n на оси V_1V_2 на стол между диафрагмами 10 и 11 устанавливается диафрагма 12 на расстоянии, равном отрезку b от диафрагмы 11, так, чтобы луч лазера, распространяющийся вдоль оси V_1V_2 , проходил через центр отверстия диафрагмы 12, который и задает положение точки A_n . Для задания положения точки K_1 в плоскости, в которой лежат оси V_1V_2 и W_1W_2 , на стол между диафрагмами 10 и 12 устанавливается диафрагма 13 так, чтобы расстояние между ней и диафрагмой 11 было равно модулю отрезка b_1 и луч лазера, распространяющийся вдоль оси V_1V_2 , проходил через центр одного из ее отверстий, которое дальше отстоит от оси W_1W_2 ; плоскость диафрагмы должна быть перпендикулярна к лазерному лучу. В этом случае центр другого отверстия диафрагмы 13 будет задавать положение точки K_1 . Для определения величин отрезков b и b_1 использу-

ются соответствующие равенства из системы равенств (1).

2. Далее рассматриваются операции по установке плоских зеркал, светоделителя и диафрагмы с целью задания осей сигнальной и опорной ветвей и регистрирующей части интерферометра типа Тваймана–Грина, который будет использоваться далее для юстировки выходного зеркала коллиматора. Сначала на виброизолированный стол (рис. 26) устанавливаются зеркала 15, 17, 19, светоделитель 16 и диафрагма 20. Предварительно центры рабочих частей этих зеркал и светоделителя, а также центр отверстия диафрагмы 20 выводятся на высоту H от уровня плоскости стола. Затем зеркала 15 и 17 и светоделитель 16 устанавливаются таким образом, чтобы отраженный от зеркала 15 луч лазера проходил через центр рабочей части светоделителя 16 и центры отверстий диафрагм 12 и 13. При этом наклонами светоделителя 16 отраженный от него луч лазера направляется в центр зеркала 17, которое затем ориентируется перпендикулярно к этому лучу. После отражения от зеркала 17 луч лазера в автоколлимационном ходе должен проходить через центр рабочей части зеркала 19 и центр отверстия диафрагмы 20. Затем устанавливаются плоские зеркала I_n и 18. При этом зеркало I_n должно быть установлено вплотную к диафрагме 13 и перпендикулярно к оси V_1V_2 , что контролируется по отражению от него луча лазера, распространяющегося от светоделителя 7 вдоль оси V_1V_2 . Зеркало 18 устанавливается перпендикулярно к оси W_1W_2 , которая должна проходить через центр рабочей части этого

зеркала. Выполнение этих требований контролируется посредством луча лазера, распространяющегося вдоль оси W_1W_2 от зеркала 8, который должен падать в центр зеркала 18 и отражаться от него в обратном направлении. Световой диаметр зеркала 18 должен быть не меньше диаметра выходного зрачка коллиматора, а световой диаметр зеркала I_n перекрывать отверстие диафрагмы 13, находящееся на оси V_1V_2 , и световой диаметр входного зеркала коллиматора. Зеркала I_n , 17 и 18 и светоделитель 16 должны быть высокого качества. В результате проведенных операций отраженный от зеркала I_n в области второго отверстия диафрагмы 13 луч лазера должен пересекать ось W_1W_2 в точке K_3 . Это можно проконтролировать по совпадению световых пятен лучей, распространяющихся от зеркал I_n и 8. Точка K_3 имитирует положение, в котором должна находиться на оси W_1W_2 точка K_2 выходного зеркала коллиматора.

3. Далее проводятся операции по окончательному формированию интерферометра типа Тваймана–Грина с целью юстировки выходного зеркала коллиматора. Сначала удаляется из хода луча диафрагма 13 (рис. 3) и на стол между зеркалом 15 и светоделителем 16 устанавливается расширитель лазерного луча 21, на выходе которого формируется параллельный пучок лучей. Расширитель юстируется таким образом, чтобы вышедший из него пучок лучей после отражения от светоделителя 16, а затем и от зеркала 17 распространялся обратно и для него осуществлялся автоколлимационный ход лучей. Этот пучок является опорным, он проходит

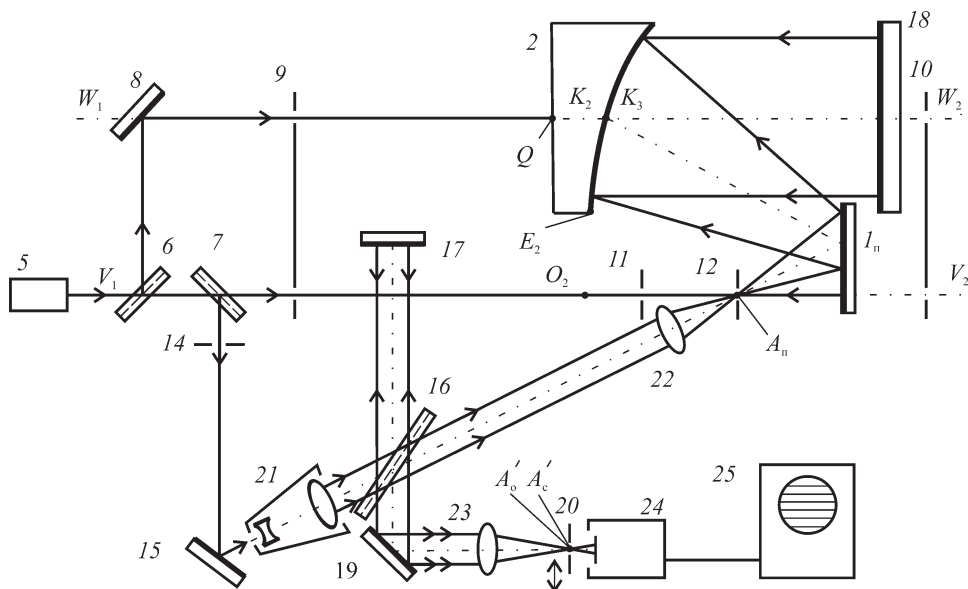


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра типа Тваймана–Грина для юстировки выходного зеркала коллиматора. Пояснения см. в тексте.

светоделитель 16 и отражается от зеркала 19. Затем в отраженный от зеркала 19 пучок лучей вводится объектив 23 таким образом, чтобы точка A'_0 сфокусированного опорного пучка лучей совмещалась с центром отверстия диафрагмы 20, за которой по ходу лучей устанавливается передающая камера 24 видеоконтрольного устройства и его монитор 25. Затем в пучок лучей, прошедший светоделитель 16, вводится объектив 22 для фокусировки его в центре отверстия диафрагмы 12, имитирующего положение точки A_n на оси V_1V_2 , с которой должен совпадать фокус параболоидального зеркала коллиматора. После этого в пучок лучей, отраженный от плоского зеркала I_n , вводится выходное зеркало 2 коллиматора таким образом, чтобы его вогнутая параболоидальная поверхность ξ_2 была обращена к плоскому зеркалу 18. Для ускорения процесса юстировки зеркала 2 в центре его тыльной стороны наносится метка в виде точки Q , а на стадии изготовления зеркала на его поверхности ξ_2 в окрестности точки E_2 наносится риска вне светового диаметра. Зеркало 2 предварительно устанавливается таким образом, чтобы луч лазера, распространяющийся от зеркала 8, падал в метку Q , а риска, нанесенная вблизи точки E_2 , находилась на высоте H от плоскости стола. Угловыми наклонами зеркала 2 необходимо направить отраженный от него пучок лучей на зеркало 18, а затем отраженный от плоского зеркала 18 и распространяющийся в обратном направлении пучок лучей продольным смещением вдоль оси W_1W_2 и угловыми наклонами зеркала 2 сфокусировать в плоскости диафрагмы 12 вблизи ее отверстия со стороны плоского зеркала I_n . Далее угловыми поворотами зеркала 2 необходимо совместить фокус этого пучка лучей с отверстием в диафрагме 12, а затем его изображение – точку A'_c – с отверстием в диафрагме 20. На экране монитора 25 возникнет интерференционная картина. Осуществляя три взаимно перпендикулярных линейных смещения зеркала 2 (направления двух смещений должны лежать в плоскости, перпендикулярной к плоскости стола, причем одно из них должно совпадать с направлением оси W_1W_2), угловые наклоны его, а также плавный поворот зеркала 2 вокруг оси его цилиндрической поверхности, необходимо добиться, чтобы форма полос в интерференционной картине была близка к прямолинейной. При высоком качестве зеркал I_n , 17 и 18, светоделителя 16 и поверхности ξ_2 полосы должны быть прямолинейными, с одинаковым периодом их следования. Если же полосы интерференционной картины при ее первоначальном наблюдении имеют очень сложный вид, тогда нужно провести предварительную юстировку зеркала 2 по форме изображения сигнальной точки A'_c , сформировав ее изображение на экране

монитора с небольшим смещением от изображения опорной точки A'_0 ; для этого необходимо удалить диафрагму 20 и сместить продольно камеру 24. Настройку осесимметричности изображения точки A'_c необходимо проводить, пользуясь указанными подвижками зеркала 2. После оптимизации изображения точки A'_c необходимо снова перейти к наблюдению интерференционной картины и, если возникнет необходимость, подъюстировать зеркало 2.

4. Далее рассматриваются операции по юстировке входного зеркала 1 коллиматора также с использованием интерферометра типа Тваймана–Грина (рис. 4а, 4б). В данном случае направление оси сигнальной ветви интерферометра на пути от светоделителя 16 до входного зеркала 1 изменится и для его задания необходимо вновь установить диафрагму 13 на прежнее место на оси V_1V_2 (рис. 4а), предварительно удалив плоское зеркало I_n , расширитель 21, объектив 22 и диафрагму 12 (рис. 3). Затем, смещая зеркало 15 и светоделитель 16, направить отраженный от зеркала 15 луч лазера через центры отверстий в диафрагмах 11 и 13. При этом луч лазера, отраженный от светоделителя 16, должен падать перпендикулярно на зеркало 17 в центр его рабочей части. Затем между зеркалом 15 и светоделителем 16 установить расширитель 21 таким образом, чтобы параллельный пучок лучей, отраженный от светоделителя 16, падал перпендикулярно на зеркало 17 (рис. 4б). Далее в параллельный пучок лучей, прошедший светоделитель 16, ввести объектив 22 для фокусировки лучей в центре отверстия диафрагмы 11, которое задает положение предметной точки A и фокуса F коллиматора. Затем в расходящийся из точки A пучок лучей установить входное зеркало 1 с выпуклой рабочей поверхностью ξ_1 . Для ускорения процесса юстировки зеркала 1 при его изготовлении на рабочей поверхности вне светового диаметра и вблизи точки E_1 наносится риска. При установке зеркала 1 необходимо центр его рабочей поверхности и риску вывести ориентировочно на высоту H от плоскости стола. Затем угловыми наклонами зеркала 1 направить отраженный им пучок лучей на выходное зеркало 2 так, чтобы после отражения от него он падал на зеркало 18. Посредством смещения зеркала 1 вдоль оси V_1V_2 сфокусировать отраженный от зеркала 18 и распространяющийся в обратном направлении пучок лучей в плоскости диафрагмы 11 со стороны зеркала 1 и направить его в отверстие диафрагмы 11 угловыми наклонами зеркала 1; на экране монитора 25 должна возникнуть интерференционная картина. Посредством трех взаимно перпендикулярных линейных смещений зеркала 1, направление одного из которых должно совпадать с направлением оси V_1V_2 , а

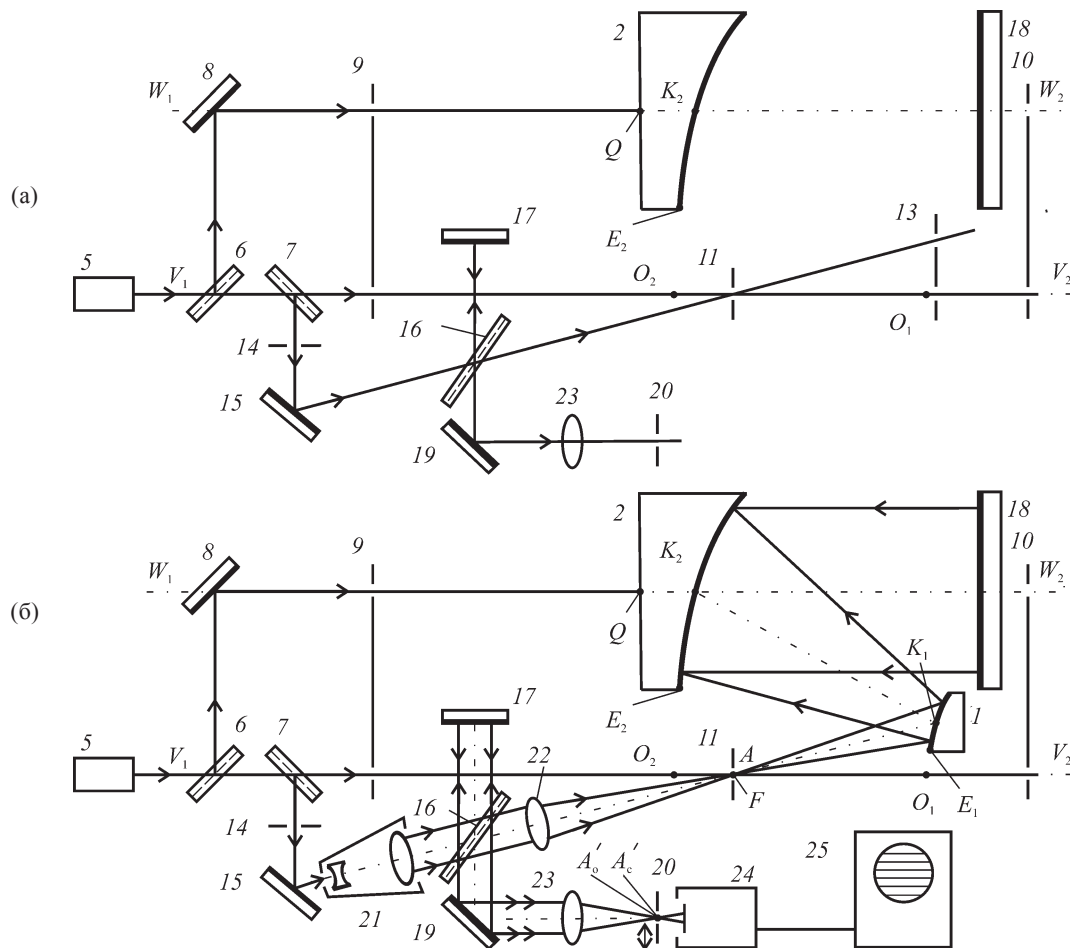


Рис. 4. а – оптическая схема для задания осей опорной и сигнальной ветвей и регистрирующей части интерферометра типа Тваймана–Грина для юстировки входного зеркала коллиматора, б – оптическая схема интерферометра типа Тваймана–Грина для юстировки входного зеркала коллиматора. Пояснения см. в тексте.

еще одного – лежать в плоскости, параллельной плоскости стола, угловыми наклонами, а также плавным поворотом зеркала 1 вокруг оси его цилиндрической поверхности получить форму полос в интерференционной картине, близкую к прямолинейной. В случае высокого качества поверхностей зеркал 1, 2, 17 и 18 и светоделителя 16 в процессе юстировки должны быть получены в интерференционной картине прямые полосы с одинаковым периодом их следования. Если при первоначальном наблюдении интерференционной картины ее полосы имеют сложный вид, необходимо провести предварительную юстировку зеркала 1, оптимизируя изображение точки A'_c . Для этого его необходимо вывести на экран монитора 25, как показано в п. 3. После оптимизации изображения точки A'_c необходимо снова перейти к наблюдению на мониторе 25 интерференционной картины и продолжить более тщательную юстировку, если в этом возникнет необходимость. На этом юстировка двухзеркального коллиматора с внеосевыми асферическими зерка-

лами, одно из которых – выходное – является параболическим, а другое – входное – выпуклым асферическим любого порядка, заканчивается.

Если же в двухзеркальном коллиматоре входное зеркало является плоским, а выходное – внеосевым параболическим, то сначала осуществляется юстировка выходного зеркала в соответствии с операциями пп. 1–3 с использованием плоских зеркал I_n и 18 (рис. 2а, 2б и рис. 3). В этом случае диафрагма 12 играет роль диафрагмы 11, а отрезки s_{1n} и d_{1n} являются отрезками соответственно s и d (см. рис. 1а). После этого плоское зеркало I_n в схеме интерферометра (см. рис. 3) заменяется входным плоским зеркалом коллиматора, которое затем юстируется посредством его угловых наклонов и продольного смещения вдоль оси V_1V_2 . Контроль состояния юстировки ведется по интерференционной картине, как описано в пп. 3 и 4.

Рассмотренный метод может быть применен не только при юстировке элементов коллиматора на стенде для исследования качества оптической си-

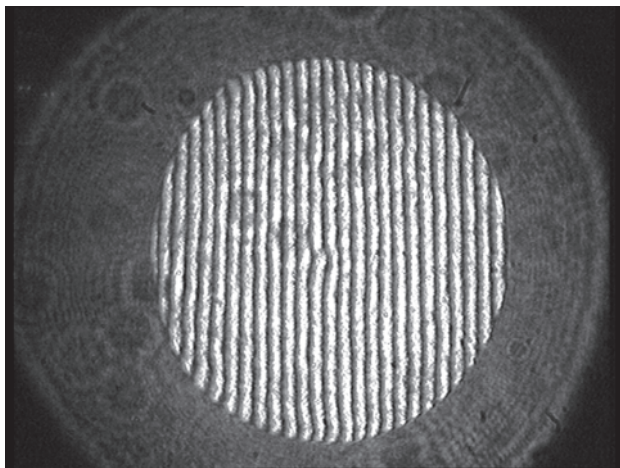


Рис. 5. Интерференграмма, полученная на конечной стадии юстировки двухзеркального коллиматора с плоским входным зеркалом.

стемы разрабатываемого коллиматора, но и для юстировки элементов в корпусе коллиматора в процессе его сборки в оптическом производстве. Для этого необходимо сформировать на виброизолированном столе такую же схему расположения элементов, которая изображена на рис. 2а, только без элементов 11, 12 и 13 и установить между диафрагмами 9 и 10 корпус коллиматора. На рис. 1б схематично изображен вид этого корпуса. В нем отверстие e_1 служит для введения внутрь корпуса выходного зеркала 2, а его посадочное место – для установки крышки. Отверстие e_2 является выходным окном, в посадочное место которого устанавливается защитная плоскопараллельная пластина, прозрачная для выходящего из коллиматора излучения. Цилиндрические поверхности посадочных мест отверстий e_1 и e_2 соосны между собой; их оси должны совпадать с осью W_1W_2 . Отверстия q_1 и q_2 предназначены для пропускания луча лазера, распространяющегося вдоль оси V_1V_2 , а отверстия g_1 и g_2 – для пропускания лазерного излучения при формировании интерферометра типа Тваймана–Грина для юстировки входного и выходного зеркал коллиматора. Оправа 3 служит для установки тест-объекта. Корпус 4 должен быть установлен так, чтобы центр отверстия оправы 3 находился на оси V_1V_2 , а центры отверстий e_1 и e_2 – на оси W_1W_2 . Для выполнения этих требований необходимо при юстировке использовать три круглые диафрагмы с отверстиями в их центре диаметром 2 мм. Одна из них выполняется с внешним диаметром, равным диаметру посадочного места отверстия e_1 , и устанавливается в это посадочное место; вторая – выполняется с внешним диаметром, равным диамет-

ру посадочного места отверстия e_2 , и устанавливается в это посадочное место; третья диафрагма выполняется с диаметром, равным диаметру посадочного места отверстия оправы 3, и устанавливается в него. Наклонами корпуса 4 необходимо добиться, чтобы луч лазера, распространяющийся вдоль оси W_1W_2 , проходил через отверстия в диафрагмах, установленных в посадочные места отверстий e_1 и e_2 , а луч, распространяющийся вдоль оси V_1V_2 , проходил через отверстие диафрагмы, установленной в оправе 3. Положение оправы 3, а также узлов крепления зеркал 1 и 2 задано в конструкции корпуса. Для достижения в процессе юстировки расчетных взаимных положений зеркал 1 и 2 и оправы 3 узлы крепления входного и выходного зеркал должны иметь три линейные и две угловые подвижки, а также подвижку для осуществления плавного поворота зеркал 1 и 2 вокруг осей их цилиндрических поверхностей. Далее юстировка оптической системы в корпусе коллиматора осуществляется в соответствии с рассмотренными в пп. 1–4 операциями.

Как следует из вышеизложенного, в данном методе юстировка выходного, а затем и входного зеркал коллиматора осуществляется с помощью интерферометра типа Тваймана–Грина, в котором эти зеркала являются элементами сигнальной ветви и где для осуществления автоколлимации используется высококачественное плоское зеркало. В процессе юстировки сигнальный пучок лучей интерферометра дважды отражается от юстируемых зеркал коллиматора. Это обстоятельство обеспечивает повышенную чувствительность, а значит и точность данного метода юстировки. Кроме того, оценка состояния юстировки элементов коллиматора по интерференционной картине обеспечивает высокую надежность метода.

В качестве иллюстрации, характеризующей работоспособность рассмотренного метода, на рис. 5 представлена интерференграмма, полученная при юстировке коллиматора с плоским входным зеркалом и внеосевым параболическим выходным зеркалом со световым диаметром и фокусным расстоянием, равными соответственно 200 и 800 мм, и выносом (отрезок h_2) центра (точка K_2) рабочей части внеосевого параболического зеркала от оси симметрии (ось V_1V_2) базовой поверхности, равным 180 мм. Как следует из расшифровки интерференграммы, среднеквадратичная погрешность волнового фронта на выходе коллиматора не превышает значения $\lambda/15$, где $\lambda = 0,6328$ мкм – длина волны излучения лазера, использованного при юстировке. В эту погрешность входят и погрешности поверхностей юстируемых зеркал. Поэтому составляющая погрешности, обусловленная только погрешностями

ми операций юстировки, меньше приведенного значения, что и подтверждает достаточно высокую точность данного метода юстировки.

В заключение следует отметить, что оптическая схема, изображенная на рис. 3, представляет собой схему интерферометра типа Тваймана–Грина для контроля формы внеосевых вогнутых параболоидальных зеркал и может быть использована для этих целей в процессе их формообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. С. 107–109.
2. *Бугаенко А.Г., Никитин Ю.П., Пантелеев Н.Л.* Коллиматоры для проверки тепловизионных прицелов // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 2. С. 32–36.
3. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.