

УДК 621.52:681.7

Исследование влияния работы микрокриогенной системы интегрального типа на характеристики оптико-электронных систем

А.В. Полесский, А.В. Самвелов, Н.А. Семенченко, Е.А. Смирнова, К.А. Хамидуллин

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния работы микрокриогенной системы (МКС) типа «интегральный стирлинг», применяемых в криогенно-охлаждаемых ФПУ, на характеристики оптико-электронных систем. В ходе исследования были проведены измерения величин смещений и наклонов охлаждающего пальца микрокриогенной системы и определены возможности использования существующих МКС для создания перспективных ФПУ с малым шагом.

PACS: 42.79.Pw

Ключевые слова: микрокриогенная система, охлаждающий палец, фоточувствительная матрица.

Введение

Одной из сложных проблем, возникающих при создании оптико-механических элементов оптико-электронных систем, является обеспечение точностных требований на расположение всех элементов оптического тракта, в том числе к расположению матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Стабильность расположения МФЧЭ в различных условиях эксплуатации на протяжении всего срока службы оптико-электронной системы во многом определяет её характеристики. Особенно актуальна проблема расположения МФЧЭ стоит для оптико-электронных систем, построенных на основе фотоприемных устройств, охлаждаемых с помощью микрокриогенных систем.

Вследствие охлаждения до криогенных температур наблюдается «уход» охлаждающего пальца МКС, на который закреплена МФЧЭ, в продольном и поперечном направлении, а из-за работы ротора МКС – дрожание матрицы.

В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования, направленные на определение ошибок, вносимых МКС интегрального типа, на точность расположения МФЧЭ. Исследования проводились для МКС, которыми комплектуются фотоприемные устройства, выпускаемые в ОАО «НПО «Орион».

Расчет требований на величину допустимых смещений МФЧЭ ФПУ

В общем случае, смещение «охлаждаемого» пальца МКС, на который закрепляется МФЧЭ, является сложным перемещением и может состоять как из продольного и поперечного смещения, так и поворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Поворот МФЧЭ ФПУ в вертикальной и/или горизонтальной плоскостях приведет

к расфокусировке на краях фоточувствительного элемента. Смещение МФЧЭ вдоль оптической оси приведет к расфокусировке системы и, как следствие, к падению качества изображения. Смещение МФЧЭ в поперечном к оптической оси направлении приведет к смещению визирной оси канала оптико-электронной системы.

Требования на максимальную величину допуска смещения вдоль оптической оси ФЧЭ фотоприемного устройства (ФПУ) оптико-электронного прибора и его поворот однозначно определяются глубиной резкости оптического тракта. Глубина резкости показывает, в каких пределах допускается перемещение плоскости изображения при условии сохранения достаточно высокого качества. Наиболее жесткие требования на глубину резкости предъявляются для систем с наивысшим качеством изображения – дифракционным. Для этих систем глубина резкости Δz зависит от квадрата относительного отверстия оптической системы и определяется формулой [1]:

$$\Delta z = 2 \cdot 2,44 \cdot \lambda \cdot K^2,$$

где δ – диаметр пятна рассеяния, K – диафрагменное число оптической системы.

Применяя метод одинаковых весов при определении допусков на смещение охлаждающего пальца МКС, величину Δz необходимо поделить пополам между допуском на продольное смещение и допуском на поворот. В этом случае допуск на величину перемещения МФЧЭ вдоль оптической оси составит $\Delta z/2$, а допустимая величина угла поворота МФЧЭ вокруг вертикальной и горизонтальной оси рассчитать по следующей формуле:

$$\Delta \omega = \arcsin\left(\frac{2,44 \cdot \lambda \cdot K^2}{2y'}\right),$$

где λ – длина волны, K – диафрагменное число оптической системы, $2y'$ – размер диагонали ФПУ.

Результаты расчета допусков на смещение МФЧЭ для современных ФПУ с диагоналями 12,3 мм (320×256 элементов с шагом 30 мкм и 640×512 элементов с шагом 15 мкм) и 24,6 мм (640×512 элементов с шагом 30 мкм и 1280×1024 с шагом 15 мкм) средневолнового и дальневолнового ИК-диапазонов для систем с относительными отверстиями: 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4, приведены в табл. 1 и 2. В качестве длины волны для среднего и дальнего ИК диапазонов были приняты 4 и 10 мкм, соответственно.

Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹
Самвелов Андрей Витальевич, начальник НТЦ МКС¹
Семенченко Наталья Александровна, техник¹, студентка²
Смирнова Елизавета Александровна, техник¹, студентка²
Хамидуллин Камилль Алимович, нач. отдела¹

¹ ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2013 г.

© Полесский А.В., Самвелов А.В., Семенченко Н.А., Смирнова Е.А., Хамидуллин К.А., 2014

Таблица 1

Результаты расчетов допусков на смещение МФЧЭ для среднего ИК-диапазона

Относительное отверстие	1:1		1:2		1:3		1:4	
Допуск на продольное смещение МФЧЭ ($\Delta z/2$), мкм	9,76		39,04		87,84		156,16	
Размер диагонали ФПУ, мм	12,3	24,6	12,3	24,6	12,3	24,6	12,3	24,6
Допуск на поворот МФЧЭ, угл. мин.	2,73	1,36	10,91	5,46	24,50	12,28	43,65	21,82

Таблица 2

Результаты расчетов допусков на смещение МФЧЭ для дальнего ИК-диапазона

Относительно отверстие	1:1		1:2		1:3	
Допуск на продольное смещение МФЧЭ ($\Delta z/2$), мкм	24,4		97,6		219,6	
Размер диагонали ФПУ, мм	12,3	24,6	12,3	24,6	12,3	24,6
Допуск на поворот МФЧЭ, угл. мин.	6,82	3,41	27,28	13,64	61,38	30,69

Требования на величину смещения МФЧЭ в поперечном к оптической оси направлении Δy зависят от размера пикселя и в большинстве случаев их можно принять равным:

$$\Delta y = a \cdot p,$$

где Δy – величина поперечного смещения, p – шаг МФЧЭ, a – коэффициент, зависящий от количества каналов оптико-электронной системы (0,16 – 0,33).

В случае применения ФПУ с МКС наибольшие требования предъявляются не на величину смещения охлаждаемого пальца в поперечном сечении, а на постоянство ухода. Для матриц с шагом 30 мкм постоянство ухода должно составлять не более 5–10 мкм, а для матриц с шагом 15 мкм не более 2,5–5 мкм.

Описание метода контроля продольных и поперечных перемещений охлаждаемого пальца МКС

Контроль линейных перемещений осуществлялся с помощью микроскопа. Схема измерений представлена на рис. 1.

В ходе контроля проводились измерения положения МФЧЭ ФПУ до охлаждения и после. Контроль перемещения по вертикальной оси (ось y) осуществлялся с помощью окуляра-микрометра, а по горизонтали (оси x , z) – с помощью микрометрических винтов, входящих в состав стола, на котором закрепляется исследуемое ФПУ.

В случае контроля смещения положения МФЧЭ ФПУ таким методом точность измерения определяется чувствительностью поперечной и продольной наводок, причем чувствительность поперечной наводки определяет

точность измерения в поперечном к оптической оси направлении, а продольной – вдоль оптической оси.

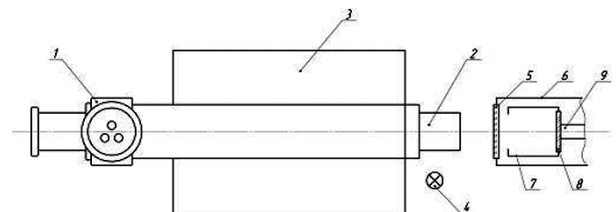


Рис. 1. Схема контроля перемещений фоточувствительного элемента с помощью микроскопа: 1 – окуляр-микрометр, 2 – микрообъектив, 3 – рейтер микроскопа, 4 – источник света, 5 – входное окно ФПУ, 6 – корпус ФПУ, 7 – холодная диафрагма, 8 – МФЧЭ, 9 – охлаждаемый палец МКС.

Чувствительность поперечной наводки определяется формулой [2]:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \varepsilon_p \text{ [мкм]},$$

$$\varepsilon_p = \frac{\lambda}{2A},$$

где ε_p – линейный предел разрешения прибора, λ – длина волны, A – числовая апертура.

Чувствительность продольной наводки определяется следующим выражением [2]:

$$\Delta z = \frac{0,2}{A^2} \text{ [мкм]}$$

При проведении исследований использовался микрообъектив ОМ-3 с числовой апертурой $A = 0,12$. Данный объектив, благодаря большому переднему отрезку, равному 23,4 мм, позволяет проводить контроль МФЧЭ ФПУ в сборе. При контроле в видимом диапазоне предельная точность измерений с использованием данного микрообъектива составляет 0,35 мкм для измерений в направлении перпендикулярном оптической оси и 13,8 мкм вдоль оптической оси. Любое перемещение, вызванное различными причинами, будет визуально не заметно, если оно меньше этих величин.

Экспериментальные результаты контроля линейных перемещений

Контроль линейных перемещений проводился на установке, собранной согласно структурной схеме, приведенной на рис. 1. Для обеспечения возможности контроля в видимом диапазоне использовалось ФПУ с входным окном, изготовленным из лейкосапфира. Измерения проводились следующим образом: на ФЧЭ ФПУ была выбрана яркая точка (дефект ФЧЭ), координаты которой были измерены до охлаждения (x_0, y_0) и после охлаждения (x_1, y_1).

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований контроля линейных перемещений

№	До охлаждения		После охлаждения		Результаты измерений	
	x_0 , мм	y_0 , мм	x_1 , мм	y_1 , мм	Δx , мм	Δy , мм
1	30,060	0,936	30,070	0,913	0,010	0,023
2	30,065	0,936	30,069	0,905	0,004	0,031
3	30,069	0,933	30,068	0,903	0,001	0,03
4	30,070	0,935	30,065	0,895	0,005	0,04
5	30,065	0,930	30,071	0,903	0,006	0,027
6	30,069	0,935	30,067	0,904	0,002	0,031
7	30,068	0,933	30,065	0,900	0,003	0,033
8	30,070	0,930	30,060	0,905	0,010	0,025
Среднее арифметическое значение					0,005	0,030
					125	
Среднее квадратическое отклонение					0,000	0,000
					243	537

Данные, полученные в результате контроля, представлены в табл. 3.

Значения среднего квадратического отклонения не превышают 1 мкм (0,24 мкм по оси x и 0,54 мкм по оси y), что говорит о хорошей повторяемости «ухода» пальца МКС, и возможности использования МКС данного типа для производства ФПУ с шагом до ~ 5 мкм.

Смещение вдоль оптической оси при захолаживании визуально не наблюдалось, то есть величина смещения менее 13,8 мкм.

Во время проведения контроля линейных перемещений было установлено, что при работе МКС происходит увеличение размера яркой точки (дефекта ФЧЭ). Увеличение вызвано вибрацией, создаваемой МКС во время ра-

боты. Измерения показали, что увеличение размера точки составляет 7 мкм.

С целью определения влияния вибрации на качество работы оптико-электронной системы было проведено исследование влияния увеличения пятна на частотно-контрастную характеристику. В качестве основных частей модели оптико-электронной системы использовались: дифракционно-ограниченные оптические такты на спектральный диапазон 3–5 мкм с относительными отверстиями 1:1, 1:2 и 1:4 и ФПУ с размером фоточувствительного элемента 30, 15 и 7,5 мкм. Результаты исследований приведены в табл. 4. Величины пространственных частот приведены по уровню контраста 0,2.

Таблица 4

Влияние вибрации, вносимой МКС, на частотно-контрастную характеристику оптико-электронной системы

Размер фоточувствительного элемента, мкм	Пространственная частота по уровню контраста 0,2 (л/мм)	Относительное отверстие оптического тракта		
		1:1	1:2	1:4
7,5	без вибрации	121,695	78,015	41,923
	при вибрации	86,956	66,546	40,040
	разница частот, %	28,54	14,70	4,49
15	без вибрации	51,483	46,471	34,831
	при вибрации	48,801	44,128	33,688
	разница частот, %	5,211	5,042	3,281
30	без вибрации	26,729	25,742	23,236
	при вибрации	26,396	25,408	22,937
	разница частот, %	1,246	1,296	1,283

Расчет показал, что вибрация МКС вносит существенный вклад в погрешности в случае малого размера элемента матрицы и высокого значения относительного отверстия. Результаты исследования показали, что на основе исследованного МКС возможно создание ФПУ с шагом 15 мкм для ОЭС с любым относительным отверстием и ФПУ с шагом 7,5 мкм для ОЭС с апертурой менее, чем 1:3.

Описание метода контроля наклона охлаждаемого пальца МКС

Контроль угловых перемещений МФЧЭ ФПУ осуществляется автоколлимационным способом [3].

Схема контроля перемещений представлена на рис. 2.

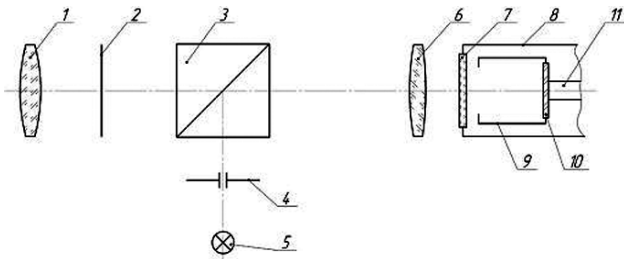


Рис. 2. Схема контроля угловых перемещений фоточувствительного элемента с помощью автоколлимационного прибора: 1 – окуляр автоколлиматора, 2 – коллимационная сетка, 3 – светоделительная куб-призма, 4 – тест-объект, 5 – источник оптического излучения, 6 – объектив автоколлиматора, 7 – входное окно ФПУ, 8 – корпус ФПУ, 9 – холодная диафрагма, 10 – МФЧЭ, 11 – охлаждаемый палец МКС.

Автоколлимационный способ контроля угловых перемещений охлаждающего пальца заключается в измерении угла отражения параллельного светового пучка от поверхности МФЧЭ ФПУ. При проведении контроля угловых перемещений также возможен контроль качества вклейки входного окна.

Оценка возможностей данного метода показывает, что ошибка измерений при его использовании совместно с различными диафрагмами:

$$\Delta\omega = 1,22 \lambda / D \text{ [угл. мин.]},$$

где λ , мкм – длина волны излучения, D , мм – диаметр отверстия «холодной» диафрагмы матричного фотоприемного устройства.

Результаты расчета для фотоприемных устройств с диафрагмами, имеющими диаметры 6, 8 и 12 мм, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Точность определения поворота охлаждаемого пальца МКС

Диаметр холодной диафрагмы, мм	6	8	12
Точность измерений наклона, угл. мин.	0,102	0,076	0,051

Экспериментальные результаты контроля наклона охлаждаемого пальца МКС

Контроль угловых перемещений проводился на установке, собранной согласно структурной схеме, приведенной на рис. 2. При наблюдении МФЧЭ в автоколлиматор было замечено, что:

1. изображения автоколлимационных перекрестий являются довольно нечеткими, что говорит о наличии деформаций входного окна и МФЧЭ;

2. плоскости наилучшего изображения автоколлимационных перекрестий различны для всех поверхностей оптической схемы МФПУ (передней поверхности входного окна, задней поверхности входного окна и плоскости ФЧЭ).

Несовпадение плоскостей наилучшей установки говорит о том, что все три поверхности являются искривленными с определенными радиусами кривизны. Если за опорную точку отсчета принять автоколлимационное отражение от зеркала, то расстояния до плоскости наилучшей установки оптических поверхностей МФПУ составляют (табл. 6):

Таблица 6

Данные о плоскостях наилучшей установки автоколлиматора

Объект	Отсчет, мм	
Нулевое положение*	13	
Передняя поверхность входного окна	14	
Задняя поверхность входного окна	18	
Плоскость ФЧЭ	до охлаждения	35
	после охлаждения	60

* – установка коллиматора осуществлялась по автоколлимационному блику от плоского зеркала.

На основании полученных данных была проведена оценка радиусов кривизны оптических компонентов ФПУ: первая поверхность входного окна имеет радиус ~165000 мм, а вторая поверхность ~56800 мм. Плоскость ФЧЭ деформируется по мере охлаждения, поэтому поверхность имеет разные радиусы кривизны при охлаждении и без него. При охлаждении поверхность имеет радиус ~3730 мм, а при комнатной температуре ~7600 мм. Оценить величину прогиба матрицы можно по следующей формуле:

$$S = |R| - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}$$

где R – радиус кривизны поверхности, D – диаметр.

Центральный прогиб матрицы при захлаживании составляет 3,35 мкм. Он меньше точности продольной наводки, поэтому его невозможно проконтролировать на микроскопе.

Результат контроля угловых перемещений показал, что при охлаждении матрица наклоняется на 2,5 угл. мин. Несмотря на то, что эта величина лежит на границе удовлетворяющих теоретическим расчетам величин, она является вполне допустимой, в том числе для матриц с диагональю 24,6 мм.

Выводы

В результате исследований было показано, что для создания МФПУ следующего поколения с диагональю

24,6 мм и шагом до 15 мкм возможно использование существующих МКС, у которых характерные величины повторяемости линейных смещений пальца с МФЧЭ вследствие охлаждения составляют менее 1 мкм, а величина углового наклона – порядка 2,5 угл. мин. Для создания МФПУ с шагом до 7,5 мкм необходимо уменьшать величину вибрации пальца МКС.

Литература

1. Афанасьев В.А. Оптические измерения. – М.: Недра. 1968.
2. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Учебное пособие. Часть 2. – СПб. ГИТМО (ТУ), 2003.
3. Еремчук А.И., Полесский А.В., Самвелов А.В., Сысоев Д.А., Хамидуллин К.А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 220.

Research of influence of microcryogenic system on quality of optical-electronic systems

A. V. Poleskii¹, A. V. Samvelov¹, N. A. Semenchenko^{1,2}, E. A. Smirnova^{1,2}, K. A. Khamidullin¹

¹ Orion Research-and-Production Association,
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Bauman Moscow State Technical University,
5/1 2-nd Bauman str., Moscow, 105005, Russia

Received November 19, 2013

The results of experimental research about influence of microcryogenic system's (MCS) operation on quality of optical-electronic systems are given. MCS with an integrated Stirling gas cryogenic machine are used in focal plane arrays (FPA) that is cooled to cryogenic temperature. The research measurements of the displacements and incline of cooling pin of MCS were made. Opportunities of using existing MCS for the development of advanced FPA with a small pixel pitch are determined.

PACS: 42.79.Pw

Keywords: microcryogenic system, cooling pin, focal plane array.

References

1. V. A. Afanas'ev, Optical Measurements (Nedra, Moscow, 1968) [in Russian].
2. V. K. Kirillovskii, Optical Measurements. Tutorial. Part 2 (GITMO, S-P., 2003) [in Russian].
3. A. I. Eremchuk, A. V. Poleskii, A. V. Samvelov, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki 1, 220 (2013).