

УДК 621.52:681.7

**Исследование смещения матрицы чувствительных элементов
криогенно-охлаждаемых фотоприемных устройств при
криостатировании**

Семенченко Н.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Смирнова Е.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*аучный руководитель: Ровенская Т.С., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Полесский А.В., главный метролог
Россия, 111538, г. Москва, Государственный научный
центр Российской Федерации ОАО «НПО «Орион»*

*Хамидуллин К.А., И.О. начальника отдела
Россия, 111538, г. Москва, Государственный научный
центр Российской Федерации ОАО «НПО «Орион»
baryshnikov@bmstu.ru*

Введение

Одним из ключевых моментов создания новых поколений матричных фотоприемных устройств (МФПУ) большого формата и с малым размером пикселя является обеспечение высоких точностей пространственного расположения матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и стабильности ее расположения относительно создаваемой оптической системой изображения в различных условиях эксплуатации оптико-электронной системы (ОЭС) на протяжении всего срока ее службы.

Большой класс ИК МФПУ требует охлаждения до криогенных температур. Вследствие охлаждения наблюдается «уход» охлаждающего пальца микрокриогенной системы (МКС), на котором закреплена МФЧЭ. Уход может происходить в продольном и поперечном направлениях. Уход МФЧЭ вдоль оптической оси наиболее опасен для ОЭС с малым шагом дискретизации и высоким относительным отверстием, смещение МФЧЭ в

поперечном направлении – для многоканальных систем с малым шагом пикселя, т.к. приводит к расхождению визирных осей.

В рамках данной работы в ОАО «НПО «Орион» совместно с МГТУ им. Н.Э.Баумана были проведены экспериментальные исследования, направленные на определение величин смещений и наклонов охлаждающего пальца, обусловленных работой современных МКС интегрального типа, а также была проведена оценка влияния смещений и наклонов на качество работы ОЭС. Исследования проводились на ИК МФПУ формата 320х256 элементов с шагом пикселя 30 мкм, охлаждаемых до криогенных температур.

Измерение продольных и поперечных перемещений охлаждающего пальца МКС

Контроль линейных перемещений осуществлялся известным методом оптической микроскопии. Контроль проводился в видимом диапазоне, для чего было изготовлено специальное фотоприемное устройство с входным окном из лейкосапфира. Структурная схема установки для измерений представлена на рисунке 1.

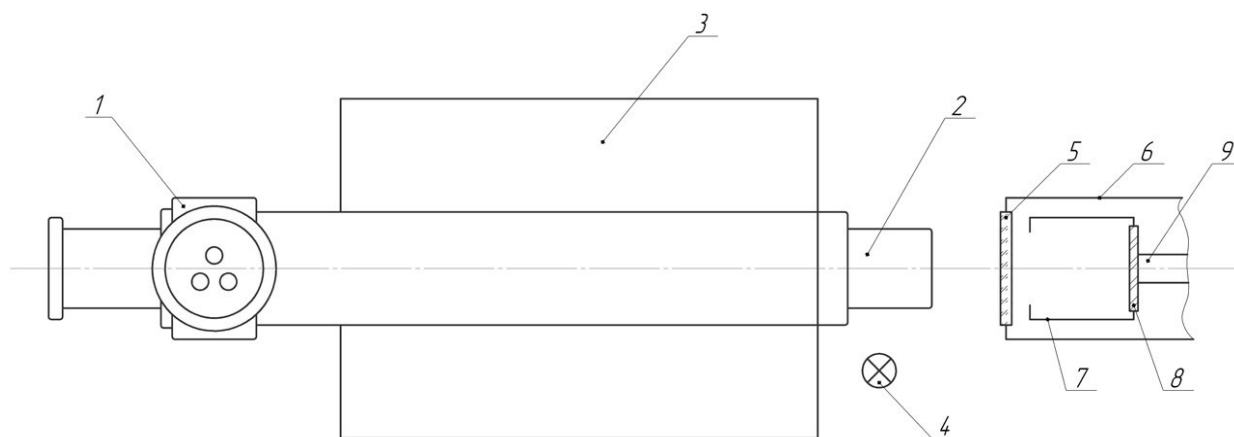


Рис. 1. Структурная схема установки для измерений перемещений фоточувствительного элемента с помощью микроскопа:

1 – окуляр-микрометр, 2 – микрообъектив, 3 – рейтер микроскопа, 4 – источник света, 5 – входное окно МФПУ, 6 – корпус МФПУ, 7 – холодная диафрагма, 8 – МФЧЭ, 9 – охлаждающий палец МКС

Контроль перемещений проводился путем измерения положения МФЧЭ до охлаждения и после. Измерение величин перемещений 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 закреплялось исследуемое МФПУ.

Точность такого метода измерения величин определяется чувствительностью поперечной и продольной наводок, причем чувствительность поперечной наводки определяет точность измерения в поперечном к оптической оси направлении, а продольной – вдоль оптической оси.

Чувствительность поперечной наводки определяется формулой [1, 2]:

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

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

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

Чувствительность продольной наводки зависит от квадрата числовой апертуры микрообъектива и определяется следующим выражением [1, 2]:

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

При выборе характеристик микрообъектива принималась во внимание возможность проведения контроля МФЧЭ при нахождении его в сборе в МФПУ. Для этого в микрообъективе необходимо иметь определенный размер переднего отрезка, который должен составлять не менее 20 мм. Этому условию удовлетворяет ряд объективов с числовыми апертурами 0,07; 0,1; 0,12. С целью обеспечения наибольшей точности измерений в экспериментах использовался микрообъектив ОМ-3 с числовой апертурой 0,12 и передним отрезком 23,4 мм. Точность измерений в этом случае составляет 0,35 мкм в перпендикулярном оптической оси направлении и 13,8 мкм вдоль оптической оси.

Экспериментальные результаты измерения линейных перемещений

В качестве измеряемого объекта при контроле поперечных линейных перемещений была выбрана яркая точка (дефект фоточувствительного слоя (ФЧС)), координаты которой измерялись до охлаждения (x_0, y_0) и после охлаждения (x_1, y_1).

Данные, полученные в результате контроля поперечных линейных перемещений МФЧЭ, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований поперечных 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					0,005125	0,030
Среднее квадратическое отклонение					0,000243	0,000537

Значения среднего квадратического отклонения составляют менее 1 мкм (0,24 мкм по оси x и 0,54 мкм по оси y).

В данном эксперименте при захолаживании продольное линейное перемещение не фиксировалось, что, учитывая выполненную выше оценку точности при продольной наводке, позволяет определить для смещения значение меньше, чем 13,8 мкм.

В ходе проведения измерений линейных перемещений МФЧЭ было установлено, что во время работы МКС происходит увеличение размера тестовой яркой точки (дефекта ФЧС). Причиной данного явления является вибрация, создаваемая во время работы МКС. Измерения показали, что увеличение размера точки составляет ~ 7 мкм. Данный факт является важным и требует отдельного рассмотрения. Оценка влияния вибрации на качество работы ОЭС будет приведена ниже.

Измерение величины наклона охлаждающего пальца МКС

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

Структурная схема установки для измерений угловых перемещений представлена на рисунке 2.

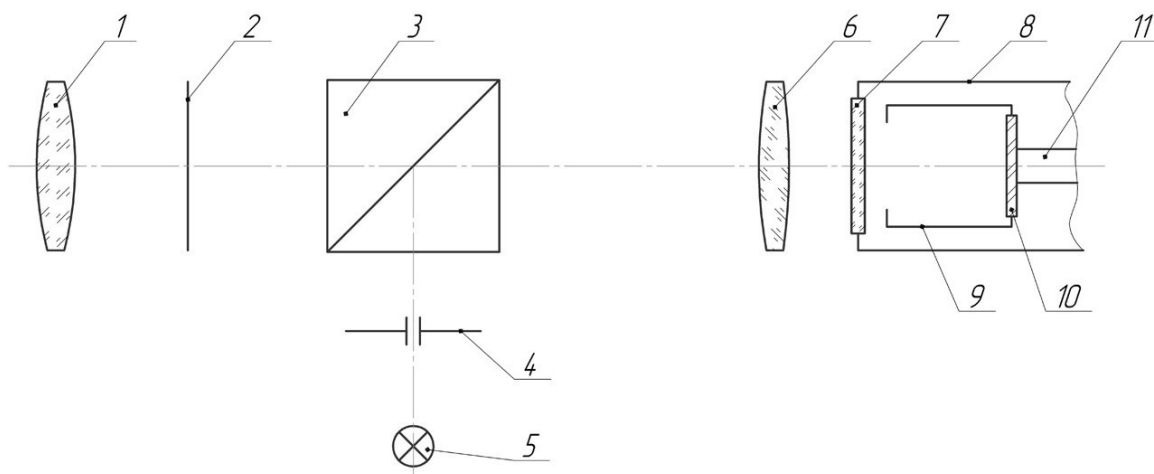


Рис. 2. Структурная схема установки измерения угловых перемещений фоточувствительного элемента с помощью автоколлимационного прибора:

- 1 – окуляр автоколлиматора, 2 – коллимационная сетка, 3 – светоделительная куб-призма, 4 – тест-объект, 5 – источник оптического излучения, 6 – объектив автоколлиматора, 7 – входное окно МФПУ, 8 – корпус МФПУ, 9 – холодная диафрагма, 10 – МФЧЭ, 11 – охлаждающий палец МКС

Автоколлимационный способ контроля угловых перемещений охлаждающего пальца позволяет измерить угол отражения параллельного светового пучка от поверхности МФЧЭ МФПУ. Еще одним важным достоинством данного метода является возможность контроля качестваклейки входного окна МФПУ.

Фактором, который может ограничивать точность метода, является экранирование входного зрачка автоколлиматора «холодной» диафрагмой МФПУ. В этом случае точность измерения наклонов составляет:

$$\Delta\omega = \frac{1,22 \lambda}{D} [\text{мрад.}],$$

где λ , мкм – длина волны излучения; D , мм – диаметр отверстия «холодной» диафрагмы МФПУ.

Точности измерения для МФПУ с диафрагмами диаметром 6, 8 и 12 мм приведены в таблице 2.

Точность определения наклона охлаждающего пальца МКС при использовании МФПУ с «холодными» диафрагмами различного диаметра

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

Экспериментальные результаты измерений наклона охлаждающего пальца МКС

Контроль угловых перемещений проводился на установке, собранной согласно структурной схеме рис. 2. За эталон было взято плоское зеркало, установка автоколлиматора производилась по автоколлимационному блику от этого зеркала.

Результат контроля угловых перемещений показал, что при охлаждении матрица наклоняется на 2,5 угл. мин.

Также при наблюдении МФПУ в автоколлиматор было замечено следующее (рисунок 3):

1. изображения автоколлимационных перекрестий являются нечеткими, что говорит о наличии деформаций входного окна и МФЧЭ;
2. плоскости наилучшего изображения автоколлимационных перекрестий различны для всех оптических поверхностей МФПУ: передней поверхности входного окна, задней поверхности входного окна и плоскости МФЧЭ.

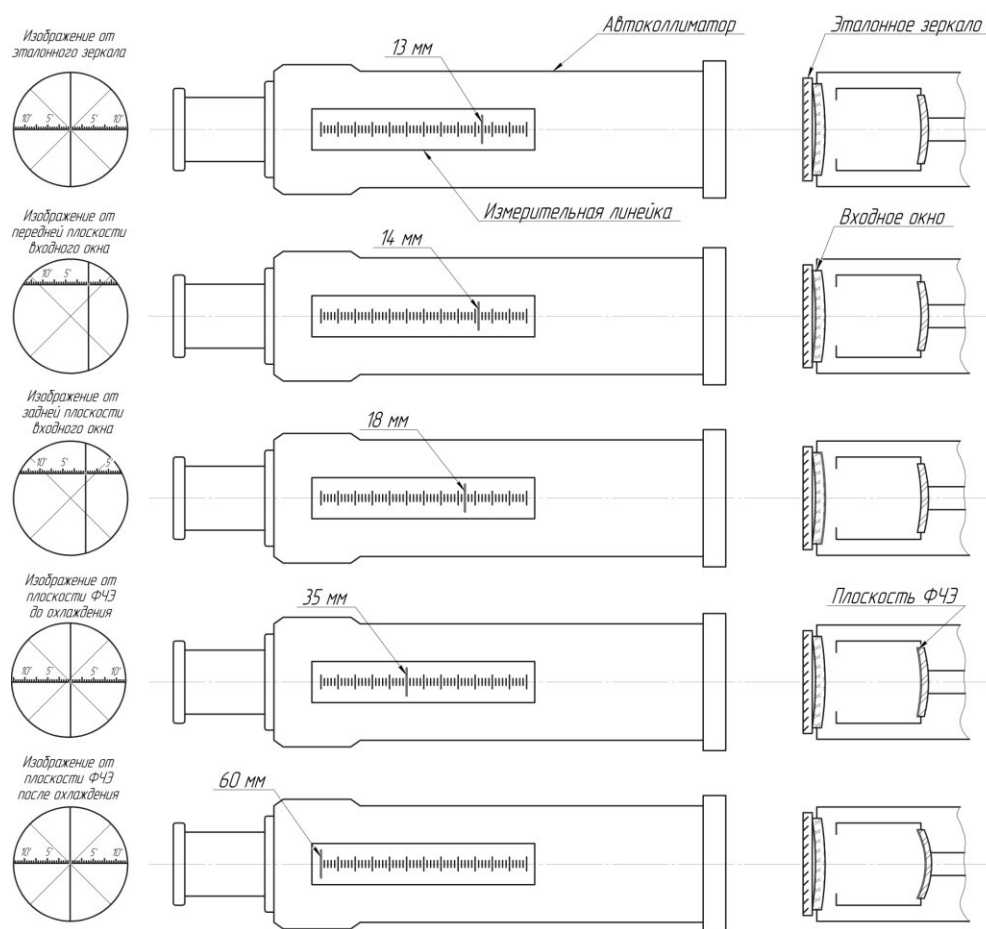


Рис. 3. Плоскости наилучшей установки автоколлиматора. Установка автоколлиматора осуществлялась по автоколлимационному блику от плоского зеркала.

По результатам измерений можно говорить о том, что все три поверхности являются искривленными с определенными радиусами кривизны.

Обсуждение и оценка результатов экспериментов

Для оценки влияния величин измеренных перемещений выполнен расчет допусков на положение МФЧЭ в ОЭС.

Требования на максимальную величину допуска смещения МФЧЭ вдоль оптической оси и ее наклон однозначно определяются глубиной резкости оптического тракта. Глубина резкости показывает, в каких пределах допускается перемещение плоскости изображения при условии определенного требования к качеству изображения, заданного размером кружка рассеяния. 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 [4, 5]:

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

где K – диафрагменное число формирующей изображение оптической системы (объектива), λ – длина волны.

Принимая Δz за допуск на величину перемещения МФЧЭ вдоль оптической оси, допустимую величину угла поворота МФЧЭ вокруг вертикальной и горизонтальной оси можно рассчитать по следующей формуле:

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

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

В таблице 3 даны рассчитанные по приведенным формулам допуски $\Delta z_{\max}$ и $\Delta \omega_{\max}$ на смещение МФЧЭ для современных МФПУ с диагональю 12,3 мм (320 x 256 элементов с шагом 30 мкм и 640 x 512 элементов с шагом 15 мкм) средневолнового ИК диапазона ($\lambda = 4$ мкм) для объективов с относительными отверстиями 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4. Также в табл. 3 приведены результаты измерений продольного и углового перемещений $\Delta z_{\text{изм}}$ и $\Delta \omega_{\text{изм}}$ и результат их оценки с помощью коэффициента запаса.

Таблица 3

Допуски на смещение МФЧЭ для среднего ИК диапазона.

Относительное отверстие	$\Delta z_{\max}$, мкм	$\Delta \omega_{\max}$, угл. мин	$\Delta z_{\text{изм}}$, мкм	$\Delta \omega_{\text{изм}}$, угл. мин	Коэффициент запаса $\left(\frac{\text{изм}}{\max} \cdot 100\%\right), \%$		
					Δz	$\Delta \omega$	Σ
1:1	19,52	5,45	~13,8	2,5	71	46	117
1:2	78,08	21,82	~13,8	2,5	18	11	29
1:3	175,68	49,10	~13,8	2,5	8	5	13
1:4	312,32	87,30	~13,8	2,5	4	3	7

Для ОЭС с относительным отверстием 1:1 результаты измерений надо интерпретировать с определенной осторожностью, т.к. ошибка измерения составляет значительную долю (71%) от глубины резкости. Для оценки возможности использования МКС данного типа в ОЭС со светосильными объективами требуются более точные измерения. Повышенную точность измерения можно достичь за счет изготовления исследуемого МФПУ с холодной диафрагмой малого диаметра, что делает возможным применение стандартных микрообъективов с более высокой числовой апертурой, или путем разработки для измерений специализированного микрообъектива.

Требование на величину смещения МФЧЭ в поперечном к оптической оси направлении (Δy) зависит от размера пикселя и в большинстве случаев его 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 МФПУ с МКС наибольшие требования предъявляются не на величину смещения охлаждающего 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.

Результаты экспериментальных исследований линейных перемещений показали, что при измерении поперечных смещений среднее квадратическое отклонение не превысило 1 мкм (0,24 мкм по оси x и 0,54 мкм по оси y), а смещение вдоль оптической оси при захолаживании составило менее 13,8 мкм. Данные результаты говорят о хорошей повторяемости «ухода» охлаждающего пальца МКС, и возможности использования МКС данного типа в МФПУ с шагом до ~5 мкм.

Во время проведения контроля линейных перемещений было установлено, что при работе МКС создает вибрации, влияющие на размер объекта измерения (дефекта ФЧС). С целью определения влияния вибрации на качество работы оптико-электронной системы был проведен расчет влияния увеличения размера пятна на частотно-контрастную характеристику системы. В качестве основных частей модели ОЭС на спектральном диапазоне 3 ... 5 мкм использовались дифракционно-ограниченные оптические тракты на с относительными отверстиями 1:1, 1:2 и 1:4 и МФПУ с размером ФЧЭ 15, 7,5 и 5 мкм. Результаты исследований приведены в таблице 4.

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 МФПУ с шагом 7,5 мкм для ОЭС с апертурой менее чем 1:4.

Таблица 4

Влияние вибрации, вносимой МКС, на частотно-контрастную характеристику ОЭС.

Значения пространственных частот определены по уровню контраста 0,2.

Размер фоточувствительного элемента, мкм	Пространственная частота по уровню контраста 0,2 (пара линий/мм)	Относительное отверстие оптического тракта		
		1:1	1:2	1:4
15	без вибрации	26,729	25,742	23,236
	при вибрации	25,370	24,400	22,064
	разница частот, %	5,083	5,211	5,042
7,5	без вибрации	51,483	46,471	34,831
	при вибрации	41,407	38,049	30,627
	разница частот, %	19,572	18,123	12,070
5	без вибрации	73,715	60,847	39,008
	при вибрации	48,239	43,478	33,273
	разница частот, %	34,56	28,546	14,702

Результаты экспериментальных исследований наклонов МФПУ позволяют говорить о том, что все три поверхности МФПУ являются искривленными с определенными радиусами кривизны.

На основании полученных данных была проведена оценка радиусов кривизны оптических компонентов МФПУ: первая поверхность входного окна имеет радиус ~165000 мм, а вторая поверхность ~56800 мм. Плоскость МФЧЭ 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 захолаживании составляет 3,35 мкм. Он существенно меньше точности продольной наводки, поэтому его невозможно проконтролировать с помощью установки по рис.1 с использованием микроскопа.

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 и для разработки 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 поперечных 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 охлаждающего пальца МКС.

Список литературы

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения: учебное пособие. Ч. 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб.: ГИТМО (ТУ), 2003. 60 с.
2. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
3. Еремчук А.И., Полесский А.В., Самвелов А.В., Сысоев Д.А., Хамидуллин К.А. Бесконтактный способ контроля углового перемещения охладителя микрокриогенной системы Стирлинга при охлаждении матричных фотоприемных устройств // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 2, С. 216–220.

4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: пер. с англ. / под ред. Г.П. Мотулевича. М.: Наука, 1973 г., 721 с. [M. Born, E. Wolf. Principles of optics. Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt: Pergamon press, 1968.].
5. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 239 с.