

ОБЪЕКТИВ ПЕТЦВАЛЯ С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ДИАПАЗОНОМ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ В ИНФРАКРАСНОМ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЕ

Н.Н. Кулакова¹, И.А. Пермьяков¹, Н.В. Тышкунув²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: nnkulakova@gmail.com; seiest92@rambler.ru

²ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, Красногорск,
Московская обл., Российская Федерация
e-mail: ntish@zenit-kmz.ru

Изложен расчет параметров объектива Петцваля с расширенным спектральным диапазоном для регистрации интерференционной картины в рабочей ветви инфракрасного фурье-спектрометра. Указана область применения этих приборов, актуальная в настоящее время, и перечислены преимущества приборов по сравнению с классическими спектральными приборами (призмными и дифракционными). Описана принципиальная оптическая схема инфракрасного фурье-спектрометра. Приведены основные зависимости, характеризующие метод фурье-спектроскопии, сделаны соответствующие выводы. Проведен анализ базового объектива регистрирующей ветви инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-3. Даны результаты габаритного и абберационного расчетов параметров объектива Петцваля с расширенным спектральным диапазоном, позволяющим повысить точность прибора. Предложена усовершенствованная схема инфракрасного фурье-спектрометра с объективом, имеющим рассчитанные параметры, и перечислены основные преимущества новой схемы по сравнению с исходной.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спектрометр, фурье-спектрометр, объектив Петцваля.

PETZVAL LENS WITH EXTENDED SPECTRAL RANGE FOR REGISTERING INTERFERENCE PATTERNS IN THE INFRARED FOURIER SPECTROMETER

N.N. Kulakova¹, I.A. Permyakov¹, N.V. Tyshkunov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: nnkulakova@gmail.com; seiest92@rambler.ru

²ОАО “Krasnogorsky Zavod n.a. S.A. Zverev”, Krasnogorsk,
Moscow Region, Russian Federation
e-mail: ntish@zenit-kmz.ru

The article presents calculation of parameters of the Petzval lens with an extended spectral range for registering interference patterns in a working branch of the infrared Fourier spectrometer. It introduces the current application domain of these devices. Some advantages of the devices in comparison with the classical spectral instruments (prismatic and diffraction) are listed. A schematic optical diagram of the infrared Fourier spectrometer is described. Some essential relations describing the Fourier spectroscopy technique are given. The appropriate conclusions are drawn. The basic lens of a recording branch in the infrared Fourier spectrometer IRFS-3 was analyzed. The article discusses the results of size and aberration calculations

of the Petzval lens parameters with an extended spectral range, which can improve the instrument accuracy. An improved scheme of the infrared Fourier spectrometer with the lens featuring the calculated parameters is suggested. Primary advantages of the new scheme are specified in comparison with the original one.

Keywords: remote sensing of the Earth, spectrometer, Fourier spectrometer, Petzval lens.

В настоящее время для получения глобальной метеорологической информации используют спутниковые методы зондирования атмосферы с помощью спектрометров. Прогнозы погоды Гидрометцентра России зависят от метеорологической информации, полученной от международных агентств, поступающей по каналам ГСТ (Глобальная система телесвязи). Достоверность этой информации может зависеть от обострения международной обстановки. В связи с этим разработка прибора, обеспечивающего получение собственных метеорологических данных высокого качества, является актуальной научно-технической задачей.

По данным научно-технической литературы, в России в основном используют призменные и дифракционные спектрометры. Зарубежные образцы таких приборов, как правило, работают на основе метода фурье-спектроскопии, поэтому они обладают преимуществами по сравнению с классическими дифракционными и призменными спектрометрами. К этим преимуществам относятся большая светосила, одновременность регистрации всех спектральных интервалов, высокая точность привязки шкалы волновых чисел; большой диапазон спектральных разрешений.

Фурье-спектрометр должен стать составной частью целевой аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) [1]. Одна из отечественных разработок прибора на основе метода фурье-спектроскопии – инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-3, имеющий погрешности измерения температуры $\Delta T = 2$ К, влажности $\Delta \varphi = 20 \dots 30\%$; определения высоты зондирования $\Delta h = 2 \dots 4$ км.

Прибор ИКФС-3 работает в трех спектральных диапазонах: 1) $\lambda = 3 \dots 5$ мкм (линия CO_2); 2) $\lambda = 5 \dots 8$ мкм (линия H_2O); 3) $\lambda = 8 \dots 15$ мкм (линия CO_2). Для повышения точности измерений температуры необходимо расширить третий спектральный диапазон до значений $\lambda = 8,0 \dots 15,5$ мкм. В регистрирующей ветви ИКФС-3 используется проекционный двухлинзовый объектив Петцваля, выполненный из германия, поэтому объектив имеет низкий коэффициент пропускания ($\tau = 0,1$) и его спектральный диапазон уже требуемого по техническому заданию.

Цель настоящей работы – разработка проекционного объектива с расширенным спектральным диапазоном $\lambda = 8,0 \dots 15,5$ мкм и коэффициентом пропускания $\tau > 0,25$. Диаметр пятна рассеяния не должен превышать 50 мкм. Объектив должен работать при повышенной влажности ($> 80\%$).

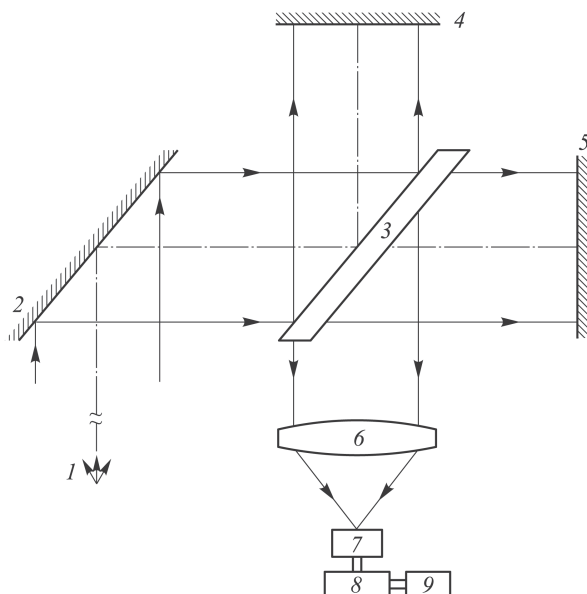


Рис. 1. Оптическая схема фурье-спектрометра:

1 — источник излучения (атмосфера); 2 — сканирующее зеркало; 3 — светоделительный элемент; 4, 5 — зеркала; 6 — проекционный объектив регистрирующей ветви; 7 — приемник излучения; 8 — электронный тракт; 9 — ЭВМ

Оптическая схема фурье-спектрометра, представляющего собой интерферометр Майкельсона, показана на рис. 1 [2]. Интерферометр позволяет получить зависимость изменения интерференционной картины от спектральной составляющей излучения атмосферы [3].

Исследуемое полихроматическое излучение с помощью сканирующего зеркала 2 направляется на светоделительный элемент 3, который разделяет излучение на два потока. После отражения от зеркал 4 и 5 потоки направляются в регистрирующую ветвь, состоящую из проекционного объектива 6, который строит изображение плоскости локализации интерференционной картины на приемнике излучения (ПИ) 7. Сигнал с ПИ поступает в электронный тракт (ЭТ) 8, где происходит оцифровка сигнала, а затем в ЭВМ 9 выполняется получение метеорологической информации.

Результат интерференции для монохроматического излучения представляет собой волну интенсивностью в плече интерферометра

$$I(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi\Delta}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения; Δ — разность хода лучей, которая обеспечивается изменением положения зеркала 5 (см. рис. 1). Исходная волна делится на равные части интенсивностью $I_1 = I_2$, тогда из формулы (1) следует $I(\lambda) = 2I_1 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi\Delta}{\lambda}\right)\right)$. Введем обозначение $v = 1/\lambda$.

Если на ПИ попадает полихроматическое излучение со спектральным распределением интенсивностью $I(\lambda)$, то сигнал фотоприемника $F(\Delta)$ равен сумме сигналов, вызываемых каждой монохроматической составляющей спектра:

$$F(\Delta) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} 2I(\lambda) P(\lambda)(1 + \cos(2\pi\Delta v)) dv, \quad (2)$$

где $P(\lambda)$ — чувствительность фотоприемника.

Разобьем выражение (2) на сумму двух интегралов:

$$F(\Delta) = 2 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} I(\lambda) P(\lambda) dv + 2 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} I(\lambda) P(\lambda) \cos(2\pi\Delta v) dv. \quad (3)$$

В формуле (3) первое слагаемое — константа. Обозначим второе слагаемое как $F'(\Delta)$. Согласно формуле (3), при разности хода интерференционных лучей $\Delta = 0$ второе слагаемое становится равным первому слагаемому. В этом случае сигнал на ПИ обозначим через $F(\Delta = 0)$. Формула (3) принимает вид

$$F(\Delta = 0) = 4 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} I(\lambda) P(\lambda) dv. \quad (4)$$

В формуле (4) $F(\Delta = 0)$ — константа. С учетом формул (3) и (4) получим

$$F(\Delta) = \frac{F(\Delta = 0)}{2} + F'(\Delta). \quad (5)$$

Из формулы (5) найдем

$$F'(\Delta) = F(\Delta) - \frac{F(\Delta = 0)}{2}, \quad (6)$$

где $F'(\Delta)$ — зависимость сигнала, регистрируемого на фотоприемнике, от оптической разности хода Δ . Эта зависимость называется интерферограммой. С учетом формул (3)–(6) запишем

$$F'(\Delta) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} I(\lambda) P(\lambda) \cos(2\pi\Delta v) dv = F(\Delta) - \frac{F(\Delta = 0)}{2}. \quad (7)$$

Зависимость $F'(\Delta)$ (7) можно заменить математическим понятием косинусного фурье-преобразования [4]. Проведя операцию обратного фурье-преобразования интерферограммы на ЭВМ и зная кривую чувствительности ПИ, можно вычислить спектр источника излучения, т.е. атмосферы: $I(\lambda) = \frac{1}{P(\lambda)} \Phi^{-1} \{F'(\Delta)\}$. Таким образом, для определе-

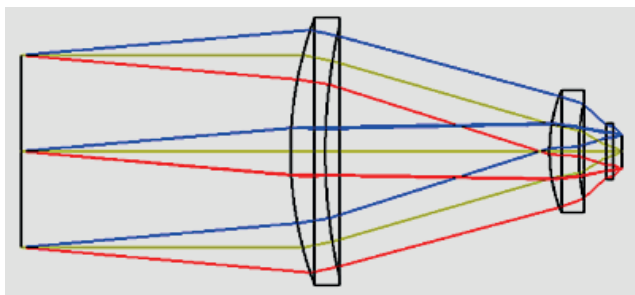


Рис. 2. Оптическая схема проекционного объектива регистрирующей ветви ИКФС-3

ния спектрального состава источника излучения (атмосферы) в ИКФС необходимо знать лишь сигналы на фотоприемнике при $\Delta = 0$, текущее значение сигнала фотоприемника и его чувствительность $P(\lambda)$ [4].

Анализ объектива регистрирующей ветви ИКФС-3. Как уже было отмечено выше, в качестве объектива регистрирующей ветви (см. рис. 1) в ИКФС-3 использован двухлинзовый объектив Петцваля, выполненный из германия. Оптическая схема проекционного объектива регистрирующей ветви ИКФС-3 приведена на рис. 2, конструктивные параметры объектива — в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры германиевого объектива регистрирующей ветви ИКФС-3 с показателем преломления 4,02475

Радиус, мм	Толщина, мм	Световой полурадиус, мм
49,065*	4,5	17,399
73,605	29,1	16,589
21,496*	3,8	7,916
31,516	3,6	6,779
Infinity	0,8	3,638
Infinity	1,2	2,205

* Асферические поверхности 8 порядка.

Объектив имеет следующие основные характеристики: фокусное расстояние $f' = 25$ мм; диаметр входного зрачка $D_{\text{вх}} = 25$ мм; угловое поле $2\omega = 10^\circ$. Спектральный диапазон пропускания $\lambda = 8 \dots 15$ мкм. Диаграмма пятна рассеяния объектива регистрирующей ветви приведена на рис. 3. Объектив имеет диаметр пятна рассеяния, не превышающий 50 мкм. Спектральный диапазон уже требуемого по техническому заданию ($\lambda = 8,0 \dots 15,5$ мкм).

Для расширения рабочего спектрального диапазона объектива необходимо заменить германий другими оптическими материалами. При этом качество изображения объектива не должно ухудшаться.

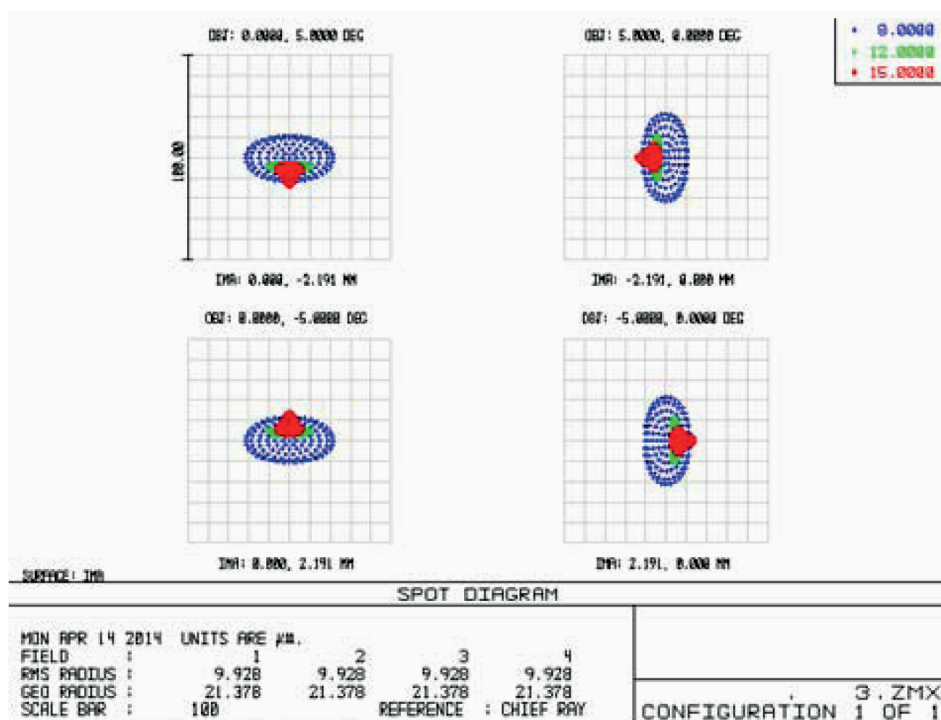


Рис. 3. Диаграмма пятна рассеяния объектива регистрирующей ветви ИКФС-3

Объектив регистрирующей ветви фурье-спектрометра с расширенным спектральным диапазоном. В качестве базовой схемы для расчета параметров объектива была выбрана схема объектива Петцваля. Основные характеристики рассчитанного объектива: $f' = 25$ мм; $2\omega = 10^\circ$; $1 : k = 1$; $\lambda = 8,0 \dots 15,5$ мкм; диаметр пятна рассеяния не более 50 мкм.

При расчете параметров объектива руководствовались следующими индивидуальными особенностями. Поскольку объектив должен иметь высокое значение относительного отверстия ($k = 1$) и простейшую конструкцию, два компонента объектива выбраны положительными. При наличии в системе только положительных бесконечно тонких компонентов кривизна Петцваля оказывается принципиально неустранимой. Эта особенность ограничивает возможности использования объектива с угловым полем более 15° [5–7]. Оптическая схема объектива Петцваля приведена на рис. 4.

Оптические материалы были выбраны с учетом требований по влажности и заданным условиям (рабочему диапазону длин волн, коэффициенту пропускания): AgCl; Krs5; CsBr; CdSe; Ir (показатель преломления $n = 2 \dots 3$, коэффициент дисперсии $\nu = 200 \dots 300$ для $\lambda = 8,0 \dots 15,5$ мкм) [8–10]. В результате габаритного и абберрационного расчетов определены значения конструктивных параметров объектива (табл. 2).

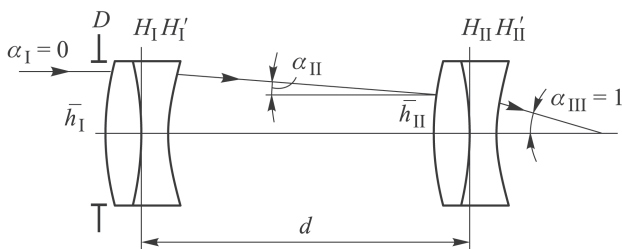


Рис. 4. Оптическая схема объектива Петцваля

Таблица 2

Конструктивные параметры объектива фурье-спектрометра с расширенным спектральным диапазоном

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления	Материал	Световой полурадиус, мм
32,21	9,95	1,659738	CsBr	14,532
107,65	4,20			13,894
118,03	8,70	2,170108	ZNS_IR	13,359
65,46	11,35			12,658
26,79	9,95	2,366220	Krs5	12,498
597	6,40			10,414
Infinity	0,80	2,419969	CdSe	5,3710
Infinity	4,00			5,1680

Для радиуса объектива 32,210 мм (см. табл. 2) уравнение асферических поверхностей имеет вид

$$z = \frac{0,031r^2}{1 + \sqrt{1 - (0,031)^2r^2}} + (-3,834 \cdot 10^{-6})r^4 + (-1,785 \cdot 10^{-8})r^6 + (8,734 \cdot 10^{-11})r^8 + (-2,204 \cdot 10^{-13})r^{10};$$

а для радиуса 597 мм —

$$z = \frac{1,675 \cdot 10^{-3}r^2}{1 + \sqrt{1 - (1,675 \cdot 10^{-3})^2r^2}} + (9,931 \cdot 10^{-6})r^4 + (2,045 \cdot 10^{-8})r^6 + (-7,094 \cdot 10^{-10})r^8 + (3,11 \cdot 10^{-12})r^{10}.$$

Оптическая схема объектива фурье-спектрометра с расширенным спектральным диапазоном, имеющего рассчитанные параметры, приведена на рис. 5, диаграмма пятна рассеяния этого объектива — на рис. 6.

По данным сравнения диаграмм пятен рассеяния объектива регистрирующей ветви ИКФС-3 и объектива с расширенным спектральным диапазоном, качество изображения последнего удовлетворяет требованиям технического задания.

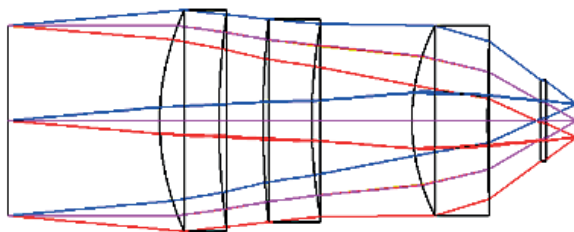


Рис. 5. Оптическая схема объектива фурье-спектрометра с расширенным спектральным диапазоном

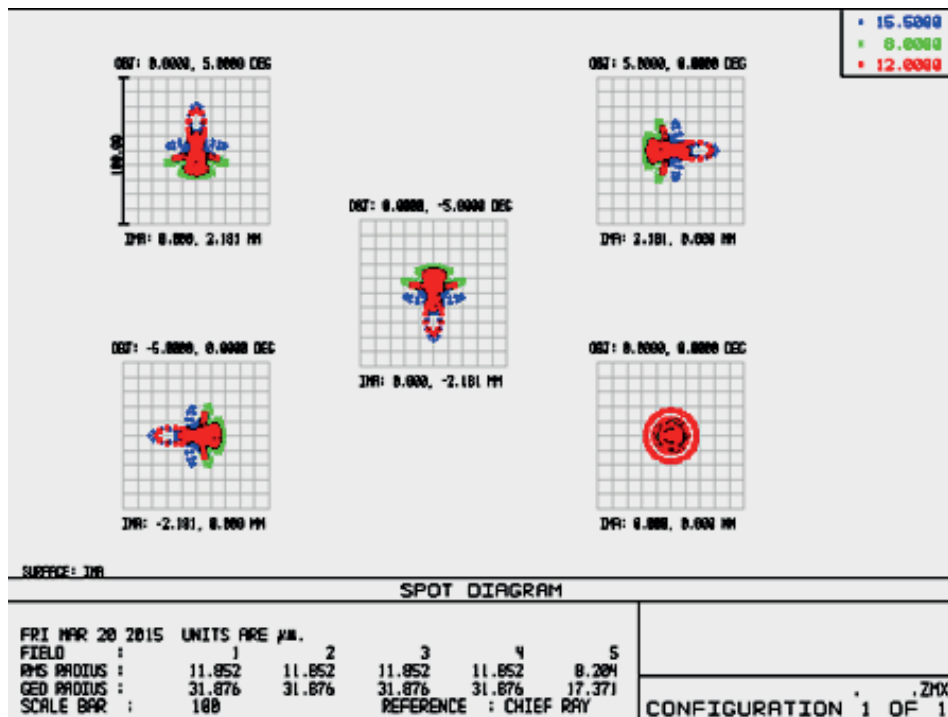


Рис. 6. Диаграмма пятна рассеяния объектива фурье-спектрометра с расширенным спектральным диапазоном

Зависимости коэффициентов пропускания объектива регистрирующей ветви ИКФС-3 и объектива с расширенным спектральным диапазоном, определенные с помощью программы Zemax, приведены на рис. 7. Коэффициент пропускания объектива с расширенным спектральным диапазоном увеличился в 3 раза по сравнению с коэффициентом объектива регистрирующей ветви ИКФС-3.

Заключение. Объектив с расширенным спектральным диапазоном удовлетворяет всем требованиям технического задания и имеет более широкий спектральный диапазон, устойчив к повышенной влажности, а также имеет коэффициент пропускания, в 3 раза больший по сравнению с коэффициентом объектива регистрирующей ветви ИКФС-3. Применение этого объектива позволит повысить точность измерения

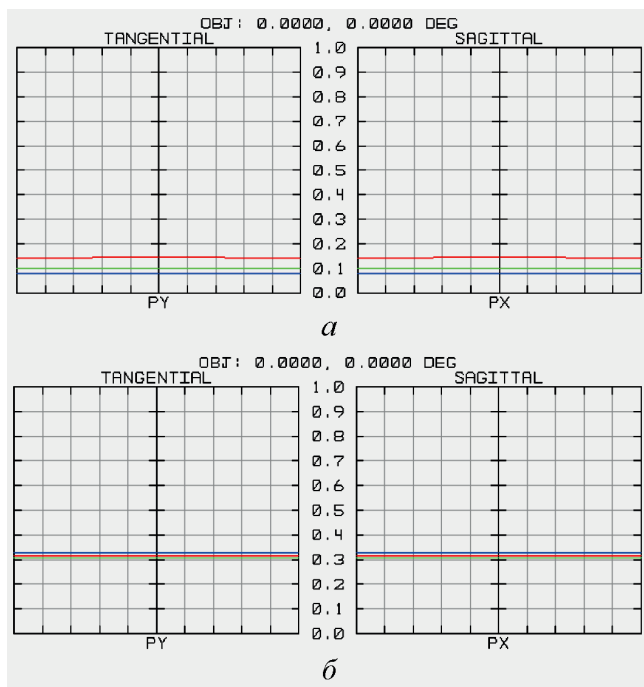


Рис. 7. Зависимости коэффициентов пропускания объектива регистрирующей ветви ИКФС-3 (а) и объектива фурье-спектрометра с расширенным спектральным диапазоном (б)

температуры и влажности атмосферы. Использование менее дорогих материалов позволяет снизить стоимость прибора в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов С.А., Орешкин А.П., Титов Е.И.* Доклады научно-технической конференции “Гиперспектральные приборы и технологии”: Сб. тезисов. Красногорск: ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, 2013. 145 с.
2. *Коломийцев Ю.В.* Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
3. *Тарасевич Б.Н.* Основы ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. М.: МГУ им. Ломоносова, 2012. 22 с.
4. *Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н.* Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
5. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
6. *Слюсарев Г.Г.* Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 671 с.
7. *Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д.* Вычислительная оптика. Справочник. М.: Либроком, 2009. 424 с.
8. *Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В.* Оптические материалы. Ч. 2. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 248 с.
9. *Новицкий Л.А., Степанов Б.М.* Оптические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1980. 271 с.
10. *Аскоченский А.А.* Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Машиностроение, 1995. 310 с.

REFERENCES

- [1] Arkhipov S.A., Oreshkin A.P., Titov E.I. Doklady nauchn.-tekhn. konf. "Giperspektral'nye pribory i tekhnologii" [Proceedings of the Scientific and Technical Conference "Hyperspectral Instruments and Technology"]. *Sb. Tezisev* [Abstracts]. Krasnogorsk, OAO "Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva", 2013. 145 p.
- [2] Kolomiytsev Yu.V. Interferometry [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 296 p.
- [3] Tarasevich B.N. Osnovy IK-spektroskopii s preobrazovaniem Fur'e [Basics of IR spectroscopy with Fourier Transform]. Moscow, MGU im. Lomonosova Publ., 2012. 22 p.
- [4] Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. Teoriya optiko-elektronnykh system [The Theory of Electro-Optical Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 432 p.
- [5] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Teoriya opticheskikh system [The Theory of Optical Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 448 p.
- [6] Slyusarev G.G. Raschet opticheskikh system [Calculation of Optical Systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1975. 671 p.
- [7] Rusinov M.M., Grammatin A.P., Ivanov P.D. Vychislitel'naya optika. Spravochnik [Computational Optics. Handbook]. Moscow, Librokom Publ., 2009. 424 p.
- [8] Zverev V.A., Krivopustova E.V., Tochilina T.V. Opticheskie materialy. Ch. 2 [Optical Materials. Part 2.]. St. Petersburg, NIUTMO Publ., 2013. 248 p.
- [9] Novitskiy L.A., Stepanov B.M. Opticheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh [Material Optical Properties at Low Temperatures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 271 p.
- [10] Askochenskiy A.A. Opticheskie materialy dlya infrakrasnoy tekhniki [Optical Materials for Infrared Technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 310 p.

Статья поступила в редакцию 12.08.2015

Кулакова Надежда Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры "Лазерные и оптико-электронные приборы и системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области расчета оптических систем оптико-электронных приборов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kulakova N.N. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of the Laser and Optic-Electronic Systems Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of optoelectronic system design. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Пермяков Иван Александрович — студент кафедры "Лазерные и оптико-электронные приборы и системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области инфракрасного фурье-спектрометра с объективом Петцваля. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Permyakov I.A. — student of the Laser and Optic-Electronic Systems Department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the infrared Fourier spectrometer with Petzval lens. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Тышкунов Николай Викторович — начальник отдела ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”. Автор более пяти научных работ в области проектирования оптико-электронных приборов.

ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, Российская Федерация, 143403, Московская обл., Красногорск, Речная ул., д. 8.

Tyshkunov N.V. — head of the department at ОАО “Krasnogorsky Zavod n.a. S.A. Zverev”. Author of more than five publications in the field of optoelectronic system design. “Krasnogorsky Zavod n.a. S.A. Zverev”, Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143403 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кулакова Н.Н., Пермяков И.А., Тышкунов Н.В. Объектив Петцваля с расширенным спектральным диапазоном для регистрации интерференционной картины в инфракрасном фурье-спектрометре // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 3. С. 116–126.

Please cite this article in English as:

Kulakova N.N., Permyakov I.A., Tyshkunov N.V. Petzval lens with extended spectral range for registering interference patterns in the infrared fourier spectrometer. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 3, pp. 116–126.