

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА, ПОЗВОЛЯЮЩЕГО УЛУЧШИТЬ РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДИФРАКЦИОННОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА

Д.С. Михайлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

### Аннотация

В ряде случаев разрешающая способность имеющихся в наличии спектрометров недостаточна. В данном сообщении описано устройство интерференционной приставки к дифракционному спектрометру, позволяющей увеличить его разрешение и чувствительность при спектроскопии адсорбированных молекулярных слоёв. Приставка преобразует промышленный прибор в комбинированный дифракционно-интерференционный монохроматор. Приведены расчеты величины разрешающей способности, и экспериментально показано, что устройство позволяет увеличить разрешающую способность дифракционного спектрометра на порядок. Увеличение разрешающей способности достигается установкой перестраиваемого многолучевого интерферометра по ходу излучения дифракционного спектрометра, проходящего исследуемый образец, что позволяет производить дополнительное сканирование выделенного спектрометром участка спектра. В статье приведены экспериментальные данные по перестройке интерферометра его наклоном относительно направления излучения, предусмотрена возможность перестройки устройства при помощи пьезоуправления. Чувствительность комбинированного устройства позволяет использовать его в качестве анализатора спектра адсорбированных веществ. В конструкции приставки предусмотрен легко устанавливаемый штуцер для ввода исследуемого газообразного вещества.

**Ключевые слова:** разрешающая способность, свободная спектральная область, многолучевая интерференция.

**Цитирование:** Михайлова, Д.С. Разработка метода, позволяющего улучшить разрешающую способность дифракционного спектрофотометра / Д.С. Михайлова // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 850-854. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-850-854.

### Введение

В ряде случаев необходимо спектроскопически исследовать адсорбированные на поверхности объектов мономолекулярные слои, при этом чувствительность и разрешающая способность промышленного спектрометра может оказаться недостаточной для анализа [1, 2, 3].

Спектральные исследования адсорбированных веществ представляют интерес в связи с возможностью образования поверхностных соединений [4, 5], при исследовании адсорбционных явлений [6], при исследовании молекулярных фотопроцессов на границе раздела газ – твёрдое тело [7, 8], при исследовании резонансных гетерогенных процессов в лазерном поле [9, 10, 11] и др.

Традиционно для получения высокого разрешения используются интерференционные спектральные приборы, но они обладают малым значением свободной спектральной области. Одновременное достижение высокого разрешения и широкой области перестройки спектрометра по спектру может решаться комбинированием дифракционного и интерференционного устройств [12, 13], при этом дисперсии устройств «скрещиваются». Под скрещиванием в указанных работах понимается такое расположение интерферометра, что спектральные линии дифракционного монохроматора пересекают интерференционную картину.

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования варианта комбинированного дифракционно-интерференционного монохроматора, рассмотренного в работах [14, 15], в котором перестройка по широкой области спектра ре-

ализуется при поворотах дифракционной решетки, а высокое разрешение даёт перестраиваемый многолучевой интерферометр, спектральная полоса пропускания которого сканирует по полосе спектра, пропускаемой дифракционной частью устройства. Увеличение чувствительности при исследовании адсорбированных слоёв предполагается обеспечить за счёт установки в кюветное отделение дифракционного спектрофотометра на пути излучения, проходящего через исследуемый образец, короткой интерференционной газовой ячейки, представляющей собой плоский многолучевой интерферометр с расстоянием между зеркалами порядка 100 мкм, обеспечивающим интерферометру значение свободной спектральной области больше спектральной ширины спектра дифракционного монохроматора; поверхности зеркал внутри интерферометра являются поверхностями адсорбции исследуемых паров химических соединений, пропускаемых через камеру интерферометра в проточном режиме. При настройке интерферометра в резонанс со спектральной полосой поглощения адсорбированного слоя добротность интерферометра падает и интенсивность прошедшего интерферометр излучения уменьшается. В связи с многократностью прохождения излучения между зеркалами интерферометра эффект поглощения света в адсорбированном слое многократно усиливается.

### 1. Устройство перестраиваемого многолучевого интерферометра

В статье описаны результаты экспериментального исследования метода улучшения разрешающей способности промышленного дифракционного спектро-

метра. Метод реализован при помощи разработанной автором приставки к спектрофотометру, выполненной в виде перестраиваемого многолучевого интерферометра.

На рис. 1 изображена оптическая схема интерференционной приставки, включающая камерный объектив и интерферометр, установленные по ходу светового потока, выходящего из выходной щели дифракционного монохроматора. Интерференционная приставка помещается в кюветное отделение спектрофотометра СФ-56.

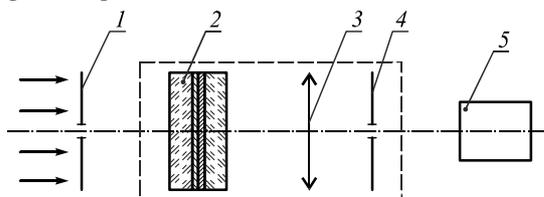


Рис. 1. Схема интерференционной приставки: 1 – щель спектрофотометра, 2 – многолучевой интерферометр, 3 – объектив, 4 – диафрагма, 5 – фотоприёмное устройство

Излучение из выходной щели 1 спектрофотометра падает на интерферометр 2. Интерферометр выполнен в виде проточной кюветы с воздушным зазором между зеркалами. Зеркала представляют собой круглые кварцевые пластины с нанесенным тонким полупрозрачным слоем алюминия. Диаметр зеркал – 22 мм, толщина – 5 мм. Прошедшее через интерферометр излучение попадает в камерный объектив 3, в фокальной плоскости которого находится диафрагма 4, выполняющая роль пространственного фильтра, и затем на фотоприёмное устройство 5 спектрофотометра.

Между зеркалами интерферометра установлены тонкие прокладки, задающие величину зазора между зеркалами. Толщина прокладок варьируется от 10 до 100 мкм. Перед проведением измерений проводилась юстировка интерферометра – обеспечение параллельности поверхностей зеркал регулировочными винтами с контролем путем наблюдения интерференционной картины. Зеркала интерферометра устанавливаются в корпус интерферометра (рис. 2).

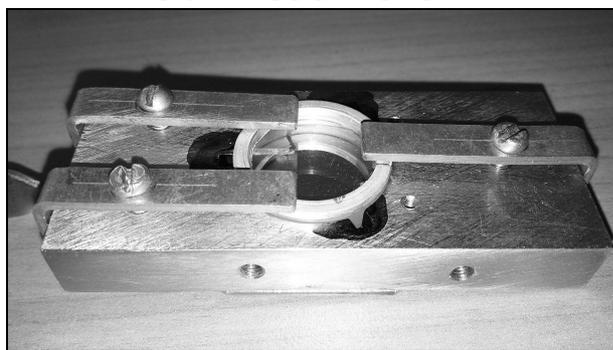


Рис. 2. Интерферометр помещённый в металлический корпус

Три прижимные «лапки» 1 необходимы для настройки параллельности зеркал. Нажим «лапок» регулируется при помощи винтов 3. Перестройка интерферометра по длине волны может осуществляться как

путём его наклона относительно направления излучения, так и при помощи пьезоэлектрического управления. Для этого в пазы 7 корпуса помещаются пьезоэлементы, которые приклеиваются к поверхности кварцевой подложки 2, затем прижимные «лапки» 1 убираются.

На рис. 3 представлен интерферометр, собранный в корпусе с прижимными «лапками» и регулировочными винтами.

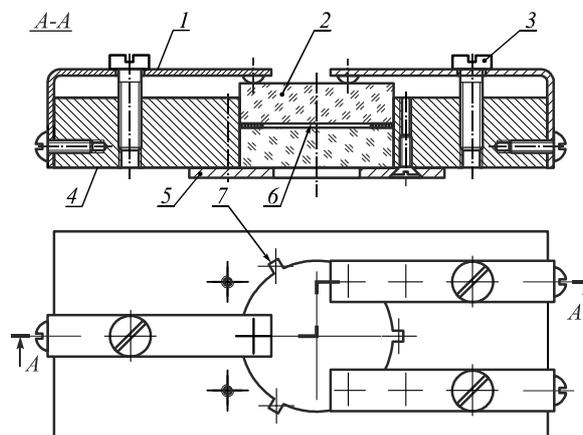


Рис. 3. Конструкция интерферометра: 1 – прижимные «лапки», 2 – зеркала, 3 – регулировочный винт, 4 – корпус крепления интерферометра, 5 – прижимная пластинка, 6 – воздушный зазор между зеркалами, 7 – отверстие для установки пьезоэлемента

Интерферометр может быть использован в качестве измерительной кюветы анализатора газа к спектрофотометру. Преимуществом применения интерференции в спектральных газоанализаторах является возможность для каждого светового луча многократно воздействовать на каждую точку анализируемой поверхности, увеличивая тем самым чувствительность анализатора. Этот эффект уже был использован нами ранее с целью исследования спектров поглощения адсорбированных веществ [14, 15]. Исследование мономолекулярных слоев является востребованной задачей [16, 17, 18]. Исследуемое вещество в виде парогазовой смеси поступает в интерферометр через штуцер 1 (рис. 4).

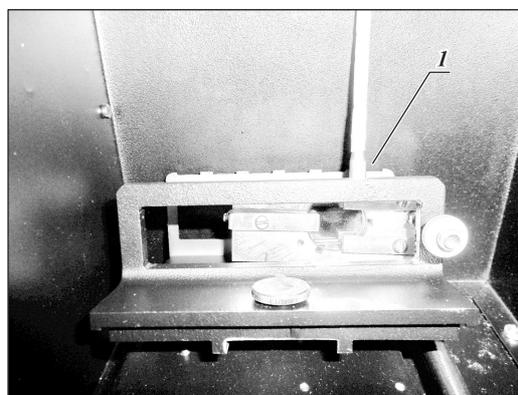


Рис. 4. Интерферометр, установленный в кюветном отделении спектрофотометра: 1 – штуцер для подачи исследуемого газа

Световой поток, прошедший через интерферометр, проецируется на диафрагму с круглым отверстием. Размер отверстия определяет разрешающую способность интерферометра.

**2. Спектральные характеристики комбинированного устройства**

Значение свободной спектральной области многолучевого интерферометра определяется формулой [13]:

$$\Delta\lambda_u = \lambda / m = \lambda^2 / 2nL, \tag{1}$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $n$  – показатель преломления среды между зеркалами,  $L$  – ширина воздушного зазора,  $m = 2nL / \lambda$  – порядок интерференции.

Ширину полосы пропускания определим по формуле [13]:

$$\delta\lambda_u = \lambda^2 / 2N_{эф}nL, \tag{2}$$

где  $N_{эф}$  – эффективное число лучей в интерферометре.

При значениях коэффициента отражения зеркал  $R$ , близких к единице,  $N_{эф}$  определяется формулой:

$$N_{эф} \approx \pi / (1 - R). \tag{3}$$

Разрешающую способность комбинированного устройства можно определить по следующей формуле [19]:

$$R = \lambda / \delta\lambda_u. \tag{4}$$

В табл. 1 приведены расчетные величины спектральных характеристик спектрофотометра СФ-56 при использовании интерференционной приставки, полученные для двух значений  $\Delta\lambda_u$  спектральной ширины выходной щели дифракционного монохроматора, причём расстояние между зеркалами интерферометра выбиралось таким, чтобы свободная спектральная область интерферометра была не уже спектральной ширины щели.

Табл. 1. Результат расчета спектральных характеристик спектрофотометра СФ-56 при использовании интерференционной приставки

$\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_u$ , нм	$L$ , мкм	$N_{эф}$	$\delta\lambda_u$ , нм
0,3	1	45	15	0,06
			30	0,03
	6	7,5	15	0,4
			30	0,2
0,656	1	215	15	0,07
			30	0,03
	2,5	85	10	0,25
	6	36	15	0,14
			30	0,07

Параметры экспериментально исследуемого интерферометра соответствовали седьмой строке таблицы.

Экспериментальная проверка оптических параметров приставки проведена путём исследования контура спектральной линии излучения дейтериевой лампы излучателя спектрофотометра (рис. 5). Угол наклона интерферометра изменялся в диапазоне от 0 до 22°. Спектральная ширина щели спектрофотометра

равна  $\Delta\lambda = 6$  нм. Путем наклона интерферометра осуществлялась перестройка по длине волны пропускания в пределах диапазона спектра, определяемого шириной выходной щели дифракционного монохроматора, в окрестности линии 656 нм спектра излучения дейтериевой лампы. На рис. 6 представлен график зависимости пропускания комбинированного дифракционно-интерференционного монохроматора от длины волны спектральной линии пропускания наклоняемого интерферометра. Наклон интерферометра осуществлялся электромеханически.

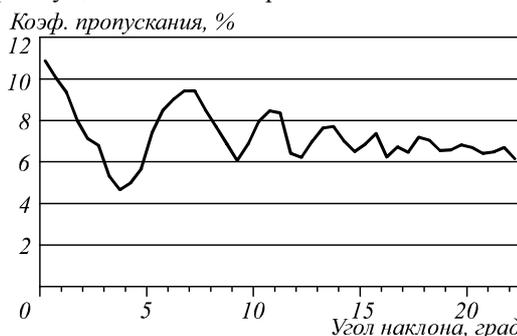


Рис. 5. Зависимость пропускания комбинированного устройства от угла наклона интерферометра (угол наклона от 0° до 22°)

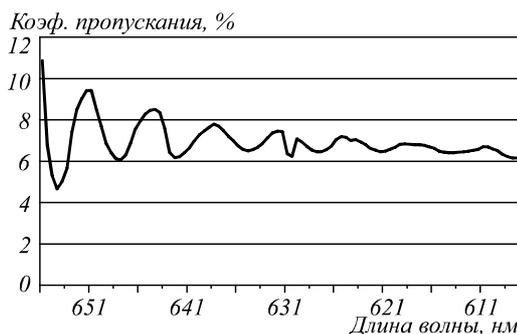


Рис. 6. Зависимость пропускания комбинированного устройства от длины волна линии пропускания перестраиваемого интерферометра

Существование нескольких максимумов на графиках объясняется тем, что сканируемая наклонами интерферометра ширина спектра включает несколько свободных спектральных областей интерферометра. Из графика рис. 6 следует, что ширина интерференционного максимума, ближайшего к значению длины волны спектральной линии водорода (примыкающего к началу координат) на уровне полувысоты составляет ~1 нм, что примерно соответствует известному значению ширины этой линии в дейтериевой лампе. Интерферометр в данном модельном эксперименте улучшил разрешение дифракционного монохроматора (спектральная ширина щели 6 нм) на порядок.

**Выводы**

Для реализации поставленной задачи была разработана конструкция приставки к спектрофотометру, выполненной в виде перестраиваемого многолучевого интерферометра. Расчетом величины разрешающей способности и экспериментально показано, что разрешение

стандартного дифракционного спектрометра может быть улучшено более чем на порядок (табл. 1).

В статье приведены экспериментальные данные по перестройке интерферометра его наклоном относительно направления излучения.

Конструкция приставки позволяет использовать ее для анализа спектра адсорбированных веществ.

На следующих этапах работы планируется исследовать чувствительность приставки при измерениях спектра поглощения адсорбированных слоёв.

### Литература

1. **Waasem, N.** High-sensitivity photoacoustic absorption spectroscopy of non-linear optical materials / N. Waasem, K. Buse, F. Kühnemann // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8621. – 862109 (8 p). – DOI: 10.1117/12.2005871.
2. **Domaradzki, J.** Investigations of reversible optical transmission in gasochromic (Ti-V-Ta)Ox thin film for gas sensing applications / J. Domaradzki, D. Kaczmarek, D. Wojcieszak, M. Mazur // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. – Vol. 201. – P. 420-425. – DOI: 10.1016/j.snb.2014.04.084.
3. **Котликов, Е.Н.** Исследование оптических пленок  $VA_xMg_{1-x}F_2$  / Е.Н. Котликов, Ю.А. Новикова // *Оптика и спектроскопия*. – 2014. – Т. 117, № 3. – С. 396-400.
4. **Морозов, А.Н.** Статистическая оценка вероятности правильного обнаружения веществ в ИК Фурье-спектрометрии / А.Н. Морозов, И.В. Кочиков, А.В. Новгородская, А.А. Сологуб, И.Л. Фуфурин // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 614-621. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-614-621.
5. **Киселев, А.В.** Инфракрасные спектры поверхностных соединений адсорбированных веществ / А.В. Киселев, В.И. Лыгин. – М.: Наука, 1972. – 459 с.
6. **Полунин, К.Е.** Исследование состава адсорбционных слоев стибенов на TiO<sub>2</sub> методом ИК-спектроскопии / К.Е. Полунин, Д.В. Дзарданов, Н.П. Соколова, А.М. Горбунов, Р.А. Булгакова, И.А. Полунина // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2008. – Т. 8, Вып. 5. – С. 796-806.
7. **Акопян, М.Е.** Молекулярные фотопроцессы на границе раздела газ – твердое тело / М.Е. Акопян // *Соросовский образовательный журнал*. – 1998. – №2. – С. 115-120.
8. **Civiš, S.** The application of high-resolution IR spectroscopy and isotope labeling for detailed investigation of TiO<sub>2</sub>/gas interface reactions / S. Civiš, M. Ferus, M. Zukalová, L. Kavan, Z. Zelinger // *Optical Materials*. – 2013. – Vol. 36, Issue 1. – P. 159-162. – DOI: 10.1016/j.optmat.2013.04.009.
9. **Лазнева, Э.Ф.** Лазерная десорбция / Э.Ф. Лазнева, под ред. П.П. Кононова. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 200 с. – ISBN: 5-288-00478-1.
10. **Комолов, А.С.** Лазерно-стимулированная десорбция атомных и молекулярных фрагментов с поверхности диоксида олова, модифицированной тонким органическим покрытием фталоцианина меди / С.А. Комолов, Э.Ф. Лазнева, А.М. Туриев // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, Вып. 1. – С. 48-52.
11. **Кравченко, В.А.** Резонансные гетерогенные процессы в лазерном поле / В.А. Кравченко, А.Н. Орлов, Ю.Н. Петров, А.М. Прохоров, под ред. Ю.Н. Петрова. – М.: Наука, 1988. – 160 с.
12. **Ежевская, Т.** ИК фурье-спектрометры со специализированными приставками (НПВО, ИК-микроскоп и др.). Особенности измерений / Т. Ежевская, А. Бубликов // *Аналитика*. – 2012. – № 1(2). – С. 38-45.
13. **Лебедева, В.В.** Экспериментальная оптика / В.В. Лебедева. – 4-е изд. – М.: Издательство Московского университета, 2005. – 352 с.
14. **Чесноков, В.В.** Интерференционные газовые спектроанализаторы / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.С. Михайлова // *Интерэкспо ГеоСибирь*. – 2012. – Т. 1, № 5. – С. 66-70.
15. **Чесноков, В.В.** Спектральные характеристики комбинированных спектральных устройств с интерферометром Фабри-Перо / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.С. Михайлова // *Интерэкспо ГеоСибирь*. – 2012. – Т. 1, № 5. – С. 166-175.
16. **Гаррисон, Дж.** Практическая спектроскопия / Дж. Гаррисон, Р. Лорд, Дж. Луфбуров. – пер. с англ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1950. – 652 с.
17. **Грибов, Л.А.** Определение гистограмм концентрационного состава смесей веществ спектральными методами / Л.А. Грибов // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 292-296.
18. **Sperling, B.A.** Time-resolved surface infrared spectroscopy during atomic layer deposition / B. Sperling, J. Hoang, W.A. Kimes, J.E. Maslar // *Applied Spectroscopy*. – 2013. – Vol. 67(9). – P. 1003-1012. – DOI: 10.1366/13-06995.
19. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970. – 855 с.

### Сведения об авторе

**Михайлова Дарья Сергеевна**, 1983 г. рождения, окончила Сибирскую государственную геодезическую академию (СГГА) в 2006 г., защитив магистерскую диссертацию по теме «Разработка приставки к спектрофотометру СФ-26», работает старшим преподавателем на кафедре физики. Область научных интересов: многолучевая интерференция, спектроскопия. E-mail: [daria-83@mail.ru](mailto:daria-83@mail.ru).

ГРНТИ 29.31.26

Поступила в редакцию 1 августа 2016 г. Окончательный вариант – 21 октября 2016 г.

## A METHOD TO IMPROVE THE RESOLUTION OF THE DIFFRACTION SPECTROPHOTOMETER

D.S. Mikhailova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russia

### Abstract

In a number of situations, the resolution of modern spectrometers may be not high enough. This communication describes the use of an auxiliary interferometer together with a diffraction spectrometer, thus enabling its resolution and sensitivity to be enhanced during spectroscopy of

adsorbed molecular layers. In this way, the industrial device is turned into a combined diffraction-interference monochromator. Numerical calculations and experiments show that the resolution of the combined diffraction spectrometer can be enhanced by an order of magnitude. In addition, the described device is a tunable multi-beam interferometer, allowing scanning through the spectrum. Scanning is done by turning the multi-beam interferometer. The article provides experimental data on adjusting the interferometer by tilting it with respect to incident radiation. Provision is made for the adjustment of the device by using a piezo plate. The increased sensitivity of the combined device allows it to be used as a spectrum analyzer of adsorbed substances. The design of the attachment provides an easy-to-install fitting for the input of the substance under test.

**Keywords:** resolving power, free spectral region, multibeam interference.

**Citation:** Mikhailova DS. A method to improve the resolution of the diffraction spectrophotometer. *Computer Optics* 2016; 40(6): 850-854. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-850-854.

### References

- [1] Waasem N, Buse K, Kühnemann F. High-sensitivity photoacoustic absorption spectroscopy of non-linear optical materials. *Proc SPIE* 2013; 8621: 862109. DOI: 10.1117/12.2005871.
- [2] Domaradzki J, Kaczmarek D, Wojcieszak D, Mazur M. Investigations of reversible optical transmission in gasochromic (Ti-V-Ta)Ox thin film for gas sensing applications. *Sensors and Actuators B* 2014; 201: 420-425. DOI: 10.1016/j.snb.2014.04.084.
- [3] Kotlikov EN, Novikova YuA. Investigation of the optical films  $BA_xMg_{1-x}F_2$ . *Optics and Spectroscopy* 2014; 117(3): 396-400.
- [4] Morozov AN, Kochikov IV, Novgorod AV, Sologub AA, Fufurin IL. A statistical evaluation of the probability of correct detection of substances in Fourier transform infrared spectrometry [In Russian]. *Computer Optics* 2015; 39(4): 614-621. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-614-621.
- [5] Kiselev AV, Lygin VI. Infrared spectra of surface compounds adsorbed substance [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1972.
- [6] Polunin KE, Dzardanov DV, Sokolova NP, Gorbunov AM, Bulgakova RA, Polunina IA. Study of the composition of the adsorption layers on TiO<sub>2</sub> stilbenes by the method of IR-spectroscopy [In Russian]. *Sorption and chromatographic processes* 2008; 8(5): 796-806.
- [7] Akopyan ME. Molecular photoinduced processes on the gas-solid boundary [In Russian]. *Soros Educational Journal* 1998; 2: 115-120.
- [8] Civiš S, Ferus M, Zukalová M, Kavan L, Zelinger Z. The application of high-resolution IR spectroscopy and isotope labeling for detailed investigation of TiO<sub>2</sub>/gas interface reactions. *Optical Materials* 2013; 36(1): 159-162.
- [9] Lazneva EF. *Lazernaia desorbtsiia* [In Russian]. Leningrad: LGU Publishing house; 1990.
- [10] Komolov AS, Lazneva EF, Turiyev AM. Laser-induced desorption of atomic and molecular fragments from a tin dioxide surface modified by a thin organic covering of copper phthalocyanine. *Semiconductors* 2012; 46(1): 45-48. DOI: 10.1134/S1063782612010125.
- [11] Petrov YuN, ed., Kravchenko VA, Orlov AN, Prokhorov AM. Resonant heterogeneous processes in a laser field [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1988.
- [12] Ezhevskaja T, Bublikov A. FTIR spectrometers with special prefixes (FTIR, IR microscope etc.). *Measurement Features* [In Russian]. *Analytics* 2012; 1(2): 38-45.
- [13] Lebedeva VV. *Experimental optics* [In Russian]. Moscow: Moscow University Publisher; 2005.
- [14] Chesnokov VV, Chesnokov DV, Syrneva AS, Mikhailova DS. Interference gas spectrum analyzers [In Russian]. *Interexpo GeoSibir* 2012; 1(5): 66-70.
- [15] Chesnokov VV, Chesnokov DV, Syrneva AS, Mikhailova DS. Spectral characteristics of the combined spectral devices Fabry-Perot interferometer [In Russian]. *Interexpo GeoSibir* 2012; 1(5): 166-175.
- [16] Harrison GR, Lord RC, Loofbourow JR. *Practical spectroscopy*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Glasgow: Blackie & Son Ltd.; 1949.
- [17] Gribov LA. Obtaining Concentration Histograms of Mixtures by Spectral Methods. *J Appl Spectrosc* 2014; 81(2): 288-292. DOI: 10.1007/s10812-014-9923-8.
- [18] Sperling BA, Hoang J, Kimes WA, Maslar JE. Time-resolved surface infrared spectroscopy during atomic layer deposition. *Appl Spectrosc* 2013; 67(9): 1003-1012. DOI: 10.1366/13-06995.
- [19] Born M, Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 4<sup>th</sup> ed. Oxford, New York: Pergamon Press; 1969. ISBN: 978-0-080-13987-6.

### Authors' information

**Daria S. Mikhailova**, 1983, graduated from Siberian State Geodetic Academy (SSGA) in 2006, defended his master's thesis: "Development of attachment to the spectrophotometer SF-26", senior lecturer at the Physics department. Area of scientific interests: multiple-beam interference, spectroscopy. E-mail: [daria-83@mail.ru](mailto:daria-83@mail.ru).

*Received August 1, 2016. The final version – October 21, 2016.*