



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01J 3/02 (2023.05); G01N 21/25 (2023.05)

(21)(22) Заявка: 2022131265, 30.11.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.11.2022

Дата регистрации:  
16.08.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.11.2022

(45) Опубликовано: 16.08.2023 Бюл. № 23

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦИС для Амелиной  
К.Е.

(72) Автор(ы):

Хорохоров Алексей Михайлович (RU),  
Ивашкина Елена Сергеевна (RU),  
Гурылева Анастасия Валентиновна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный исследовательский  
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

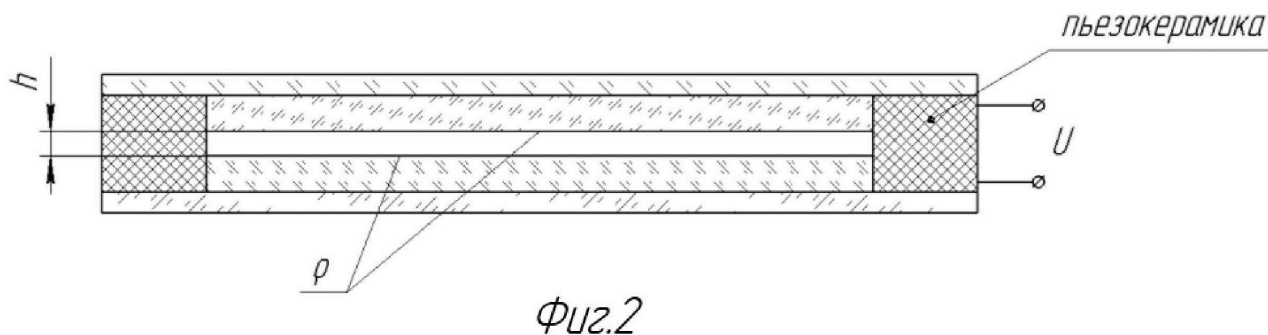
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2716454 C1, 11.03.2020. RU 158856  
U1, 20.01.2016. RU 130698 U1, 27.07.2013. EA  
24777 B1, 31.10.2016. EA 24759 B1, 31.10.2016.  
DE 102014117023 A1, 03.06.2015.

(54) Быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптического приборостроения и касается быстродействующего гиперспектрометра с управляемым спектральным фильтром. Гиперспектрометр включает в себя управляемый спектральный фильтр на основе интерферометра Фабри-Перо, объектив, матричный приемник излучения и электронный блок обработки сигналов. В гиперспектрометре использован выигрыш Фелжета, основанный на

одновременной регистрации нескольких спектральных изображений одним приемником излучения и последующей математической обработке сигнала приемника для выделения информации о распределении интенсивности в отдельных каналах. Технический результат - повышение отношения сигнал/шум и быстродействия прибора. 7 ил.





FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01J 3/02* (2006.01)  
*G01N 21/25* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

*G01J 3/02 (2023.05); G01N 21/25 (2023.05)*(21)(22) Application: **2022131265, 30.11.2022**(24) Effective date for property rights:  
**30.11.2022**

Registration date:  
**16.08.2023**

Priority:

(22) Date of filing: **30.11.2022**(45) Date of publication: **16.08.2023** Bull. № 23

Mail address:

**105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,  
MG TU im. N.E. Baumana, TSIS dlya Amelinoj  
K.E.**

(72) Inventor(s):

**Khorokhorov Aleksei Mikhailovich (RU),  
Ivashkina Elena Sergeevna (RU),  
Guryleva Anastasiia Valentinovna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniia "Moskovskii gosudarstvennyi  
tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana  
(natsionalnyi issledovatel'skii universitet)"  
(MG TU im. N.E. Baumana) (RU)**

(54) **FAST HYPERSPECTROMETER WITH CONTROLLED SPECTRAL FILTER**

(57) Abstract:

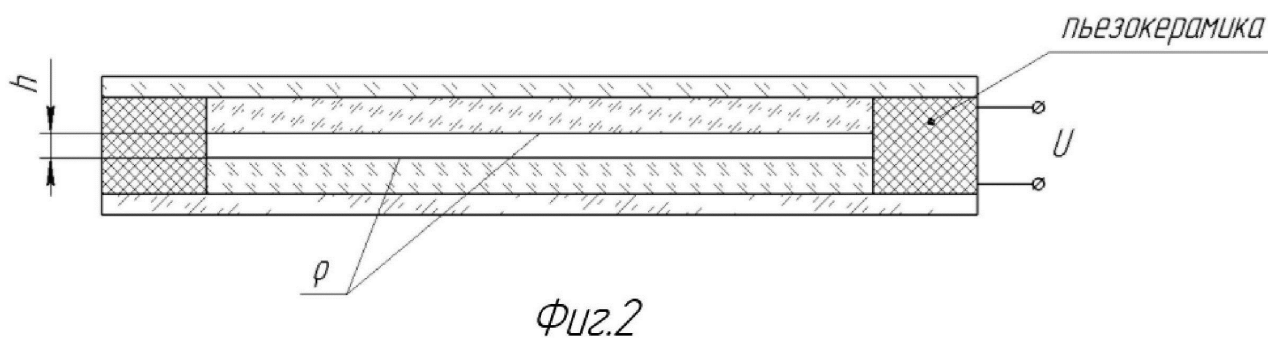
FIELD: optical instrumentation.

SUBSTANCE: invention relates to a high-speed hyperspectrometer with a controlled spectral filter. The hyperspectrometer includes a controlled spectral filter based on a Fabry-Perot interferometer, a lens, a matrix radiation receiver, and an electronic signal processing unit. The hyperspectrometer uses the Felget gain based on the simultaneous registration of several spectral

images by one radiation detector and subsequent mathematical processing of the receiver signal to extract information about the intensity distribution in individual channels.

EFFECT: increased signal-to-noise ratio and the speed of the device.

1 cl, 7 dwg



Область техники

Изобретение относится к одной из важнейших областей оптического приборостроения - спектрометрии.

Уровень техники

5 Спектрометры предназначены для определения спектров излучения и поглощения различных сред. Особое место среди спектрометров различного назначения занимают изображающие спектрометры - приборы, регистрирующие пространственное  
10 распределение спектральных характеристик объекта по всему полю зрения [1]. Такие приборы широко применяются в авиационных и космических системах экомониторинга и изучения атмосферных процессов, в технологиях контроля состояния посевов и готовой продукции агропромышленного, в медицинской диагностической практике и других областях науки и техники.

Изображающие спектрометры формируют куб информации (2d - пространственной и 1d - спектральной), для получения которого в них используют последовательное  
15 сканирование по спектру в пределах рабочего спектрального диапазона полосой, ширина которой определяется техническими требованиями спектрального разрешения.

Гиперспектрометрами называют изображающие спектрометры, полоса пропускания спектрального канала, или спектральное разрешение, которых не превышает 10 нм, а каналы равномерно распределены по рабочему спектральному диапазону с малым  
20 шагом.

Для выделения канала в гиперспектрометрах используют либо диспергирующие системы на основе призм или дифракционных решеток ([2]; Патент РФ №2635841, МПК G01J3/36, G02B27/10 опубл. 20.11.2017), либо специальные узкополосные фильтры: интерференционные ([3]; Патент №2518366, МПК G01B 9/02, МПК G01J 3/26, МПК  
25 G02B 5/28, опубл. 10.06.2014) или акустооптические ([4]; Патент РФ 2258206C1, МПК G01J3/12, опубл. 10.08.2005) с возможностью перемещения выделенного участка в пределах рабочего-спектрального диапазона.

Главным недостатком перечисленных систем является их низкое быстродействие, возникающие вследствие того, что на последовательное сканирование участком  
30 рабочего спектрального диапазона, требуется время, зачастую во много раз превосходящее время формирования одного кадра исследуемого объекта.

В спектрометрии известен прием, позволяющий в несколько раз уменьшить время регистрации спектра, сохраняя при этом высокую разрешающую способность. Он называется выигрышем Фелжета и основан на том, что приемник излучения  
35 спектрометра регистрирует одновременно весь рабочий спектральный диапазон излучения, а информацию о распределении интенсивности в пределах этого диапазона получают при последующей математической обработке сигнала приемника. К таким спектрометрам относятся Фурье-спектрометры и спектрометры Адамара [5].

В Фурье-спектрометре используется интерферометр Майкельсона с перемещающимся  
40 зеркалом, а исследуемый спектр излучения получают путем Фурье-преобразования интерферограммы - выходного сигнала приемника излучения.

В спектрометрах Адамара в области формирования спектра находится специальная кодирующая маска, пропускание которой изменяется по определенному закону. Получаемый при этом сигнал приемника излучения подвергают специальному  
45 преобразованию, преобразованию Адамара, позволяющему вычислить функциональную зависимость интенсивности излучения от длины волны.

К недостаткам указанных спектрометров следует отнести конструктивную сложность их реализации в применении к гиперспектральным измерениям.

Наиболее близким к предполагаемому изобретению является гиперспектрометр с управляемым интерференционным фильтром на основе интерферометра Фабри-Перо [6], выделяющего узкую спектральную полосу и производящего сканирование в рабочем спектральном диапазоне за счет перестройки центральной длины волны узкой

5 спектральной полосы при изменении коэффициента пропускания фильтра  $\tau$ . Последний описывается функцией:

$$\tau = \frac{1}{1 + F \sin^2 \delta'}$$

10 где  $F$  - параметр интерферометра, определяющий ширину полосы пропускания и зависящий от коэффициента отражения  $\rho$  зеркал (фиг. 2):

$$F = \frac{4\rho}{(1 - \rho)^2},$$

15  $\delta$  - параметр, определяемый расстоянием  $h$  между зеркалами:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} h.$$

20 Изменение коэффициента пропускания фильтра  $\tau$  и, как следствие, смещение длины волны, соответствующей максимальному пропусканию, производится путем изменения расстояния между зеркалами интерферометра. Последнее достигается изменением напряжения  $u$ , подаваемого на пьезокерамическую шайбу с закреплёнными на ней зеркалами.

25 Недостатком этого прибора, как отмечалось, является низкое быстродействие, не более 20 спектральных линий в секунду, возникающее из-за того, что при узкой полосе спектральной линии, для получения сигнала, во много раз превосходящего шумы приемника излучения, приходится увеличивать время его накопления на каждой выделенной линии рабочего диапазона прибора.

30 Раскрытие изобретения

Задачей и техническим результатом заявляемого изобретения является создание быстродействующего гиперспектрометра с высоким отношением сигнал/шум на основе использования выигрыша Фелжета.

35 Для решения задачи и достижения технического результата разработан быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром, содержащий последовательно установленные управляемый фильтр на основе интерферометра Фабри-Перо, объектив, матричный приемник излучения и электронный блок обработки сигналов.

40 При этом использован выигрыш Фелжета, обеспечиваемый регистрацией  $p$  одновременно выделяемых фильтром спектральных линий со спектральным разрешением  $\delta\lambda$ , значения которых связаны с конструктивными параметрами фильтра соотношениями:

$$p = \frac{2h_{\text{ср}}(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_{\text{ср}}^2}, \quad \delta\lambda = \frac{1 - \rho}{\pi\sqrt{\rho}} \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{p},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - границы рабочего спектрального диапазона,

$\lambda_{\text{ср}}$  - среднее значение длины волны рабочего диапазона,

$h_{\text{ср}}$  - среднее расстояние между зеркалами интерферометра Фабри-Перо,  
 $\rho$  - коэффициент отражения зеркал интерферометра Фабри-Перо,  
 диапазон перемещения зеркал  $\Delta h$ , выражается зависимостью:

$$\Delta h = \left( \frac{h_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{ср}}} + 1 \right) \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{p}.$$

Спектр излучения объекта  $L(\lambda)$  определяется в электронном блоке обработки сигналов из решения системы интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_i(u, \lambda) L(\lambda) d\lambda = I_i(u), \quad i = 1..m,$$

где  $m$  - число спектральных каналов приемника излучения,

$I_i(u)$  - выходной сигнал  $i$ -го канала в зависимости от величины напряжения  $u$ , приложенного к пьезоэлектрической шайбе фильтра,

$K_i(u, \lambda)$  - ядро интегрального уравнения  $i$ -го канала, определяемое спектральной чувствительностью  $S_i(\lambda)$   $i$ -го канала и спектральным пропусканием  $\tau(u, \lambda)$

управляемого фильтра:

$$K_i(u, \lambda) = S_i(\lambda) \tau(u, \lambda).$$

Преимущество заявляемого изобретения по сравнению с прототипом заключается в большем быстродействии при сохранении высокого отношения сигнал/шум, поскольку использование выигрыша Фелжета позволяет даже для спектральных полос шириной в несколько нм увеличить в разы отношение сигнал/шум прибора, что приводит к снижению требуемого времени накопления кадра.

Краткое описание фигур

На фиг.1 представлены графики пропускания управляемого фильтра - интерферометра Фабри-Перо при различных значениях  $h$  - расстояние между зеркалами с коэффициентом пропускания  $\rho = 0.75$ .

На фиг.2 представлена конструкция управляемого фильтра.

На фиг.3 представлена обобщенная схема гиперспектрометра.

На фиг.4 представлены графики чувствительности 8-ми канального матричного приемника излучения ( $m = 8$ ).

На фиг.5 представлены графики чувствительности приемников цветной RGB-матрицы ( $m = 3$ ).

На фиг.6 представлен график распределения спектральной яркости объекта, полученный предлагаемым изобретением. Объект - спектральный дублет:  $\delta\lambda = 4$  нм.

На фиг.7 представлен график распределения спектральной яркости объекта, Объект - область с гауссовой формой спектральной плотности яркости: а) исходная, б) восстановленная методом предлагаемого изобретения.

Осуществление изобретения

Сущность изобретения заключается в следующем. Управляемый интерференционный фильтр, установленный во входном зрачке гиперспектрометра выделяет одновременно несколько узких спектральных линий в рабочей области гиперспектрометра. Количество

этих линий  $p$  определяется выражением:

$$p = \frac{2h_{\text{ср}}(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_{\text{ср}}^2},$$

где  $h_{\text{ср}}$  и  $\lambda_{\text{ср}}$  - средние значения расстояния между зеркалами и длины волны рабочей области, соответственно,

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - границы рабочей области спектра.

При среднем значении расстояния между линиями, описываемым соотношением:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{p},$$

ширина этих линий  $\delta\lambda$ , определяющая спектральное разрешение гиперспектрометра в зависимости от коэффициента отражения зеркал фильтра  $\rho$ , выражается следующим образом:

$$\delta\lambda = \frac{1 - \rho}{\pi\sqrt{\rho}} \Delta\lambda.$$

На фиг.1 представлены графики пропускания управляемого фильтра - интерферометра Фабри-Перо при различных значениях  $h$  - расстояние между зеркалами с коэффициентом пропускания  $\rho = 0.75$ .

На фиг.2 показаны форма и изменение полос пропускания спектрометра Фабри-Перо со значением  $\rho = 0.75 (F = 48)$ . Наличие многих линий пропускания позволяет в  $p$  раз увеличить отношение сигнал/шум прибора, что в свою очередь повышает его точностные и динамические характеристики. Отметим также, что для получения информации о спектре излучения объекта во всей рабочей области спектра достаточно обеспечить смещение спектральных линий в пределах расстояния  $\Delta\lambda$  между полосами.

При изменении напряжения  $u$  на пьезоэлектрической шайбе происходит изменение расстояния  $h$  и, следовательно, коэффициента пропускания фильтра  $\tau(u, \lambda)$ . Выходной сигнал  $I(u)$  приемника излучения определяется следующим образом:

$$I(u) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) S(\lambda) \tau(u, \lambda) d\lambda,$$

где  $L(\lambda)$  - спектральная плотность яркости объекта,

$S(\lambda)$  - чувствительность приемника излучения.

Приведенное уравнение относится к классу интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) K(u, \lambda) d\lambda = I(u),$$

где  $K(u, \lambda) = S(\lambda) \tau(u, \lambda)$  - ядро уравнения.

При наличии в плоскости изображения матричного приемника излучения, например, цветной RGB-матрицы или другого многоканального приемника излучения, искомая



спектральная яркость объекта  $L(\lambda)$  определяется из решения системы интегральных уравнений:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) K_i(u, \lambda) d\lambda = I_i(u), \quad i = 1..m,$$

где  $m$  - число спектральных каналов приемника излучения,

$K_i(u, \lambda)$  - ядро уравнения  $i$  - го канала:

$$K_i(u, \lambda) = S_i(\lambda) \tau(u, \lambda),$$

где  $S_i(\lambda)$  - спектральная чувствительность приемника излучения  $i$ -го канала

Решение этих уравнений хорошо известно, в настоящее время оно входит составной частью в различные математические пакеты автоматизированного проектирования, например, Matlab, и легко реализуется без каких-либо технических затруднений.

В качестве примера конкретного выполнения на фиг.3 представлена обобщенная схема заявляемого изобретения. Прибор работает следующим образом: объектив ОБ направляет излучение от объекта исследования на матричный приемник излучения, сигнал с которого поступает в электронный блок обработки сигналов, осуществляющий дальнейшие вычисления. Во входном зрачке объектива размещен фильтр  $\Phi$ , пропускание которого  $\tau(u, \lambda)$  управляется переменным напряжением  $u$ , подающимся на пьезокерамическую шайбу. Конструкция управляемого фильтра приведена на фиг.2. Рабочий спектральный диапазон прибора-400 нм ( $\lambda_1 = 500$  нм,  $\lambda_2 = 900$  нм). Фильтр одновременно выделяет  $p = 10$  спектральных линий шириной  $\delta\lambda \approx 3.7$  нм. При этом используются зеркала интерферометра с коэффициентом отражения  $\rho = 0.75$ . Среднее расстояние между зеркалами  $h_{\text{ср}} = 6$  мкм, диапазон перемещения зеркал для смещения одной полосы в пределах  $\Delta\lambda = 40$  нм – 350 нм. В приборе использован 8-ми канальный матричный приемник излучения ( $m = 8$ ), спектральные чувствительности пикселей приемника изображены на фиг.4.

На фиг.5 представлены графики чувствительности приемников цветной RGB-матрицы ( $m = 3$ ).

В качестве примеров, иллюстрирующих возможности заявленного изобретения на фиг.6 представлен график функции  $L(\lambda)$  демонстрирующий спектральную разрешающую способность прибора. На рисунке показано, что прибор надежно разрешает 2 спектральные линии, расстояние между которыми составляет  $\delta\lambda = 4$  нм. На фиг.7 приведен результат моделирования измерения (б) спектральной яркости объекта с гауссовой формой спектральной яркости (а).

Список литературы

1. Imaging Spectrometry / ed. Meer F.D. van der, Jong S.M. de. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002. Vol. 4.
2. Feng L. et al. Hyperspectrometer based on curved prism fabrication for space application // <https://doi.org/10.1117/12.2317851>. SPIE, 2018. Vol. 10692. P. 247-251.
3. Carmo J.P. et al. A review of visible-range Fabry-Perot microspectrometers in silicon for the industry // Opt Laser Technol. Elsevier, 2012. Vol. 44, № 7. P. 2312-2320.
4. Korablev O.I. et al. Acousto-optic tunable filter spectrometers in space missions [Invited]

// Appl Opt. Appl Opt, 2018. Vol. 57, № 10. P. C103.

5. Зайдель А.В., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М. Наука. 1976. 375 с.

6. Monarch II Camera - Unispectral [Electronic resource]. URL: <https://www.unispectral.com/product/monarch-ii-camera/> (дата обращения: 25.09.2022).

### (57) Формула изобретения

Быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром, содержащий последовательно установленные управляемый фильтр на основе интерферометра Фабри-Перо, объектив, матричный приемник излучения и электронный блок обработки сигналов, отличающийся тем, что использован выигрыш Фелжета, обеспечиваемый регистрацией  $p$  одновременно выделяемых фильтром спектральных линий со спектральным разрешением  $\delta\lambda$ , значения которых связаны с конструктивными параметрами фильтра соотношениями:

$$p = \frac{2h_{cp}(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_{cp}^2}, \quad \delta\lambda = \frac{1 - \rho}{\pi\sqrt{\rho}} \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{p},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы рабочего спектрального диапазона,

$\lambda_{cp}$  – среднее значение длины волны рабочего диапазона,

$h_{cp}$  – среднее расстояние между зеркалами интерферометра Фабри-Перо,

$\rho$  – коэффициент отражения зеркал интерферометра Фабри-Перо,

при этом диапазон перемещения зеркал  $\Delta h$ , выражается зависимостью:

$$\Delta h = \left( \frac{h_{cp}}{\lambda_{cp}} + 1 \right) \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{p},$$

а спектр излучения объекта  $L(\lambda)$  определяется в электронном блоке обработки сигналов из решения системы интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_i(u, \lambda) L(\lambda) d\lambda = I_i(u), \quad i = 1..m,$$

где  $m$  – число спектральных каналов приемника излучения,

$I_i(u)$  – выходной сигнал  $i$ -го канала в зависимости от величины напряжения  $u$ ,

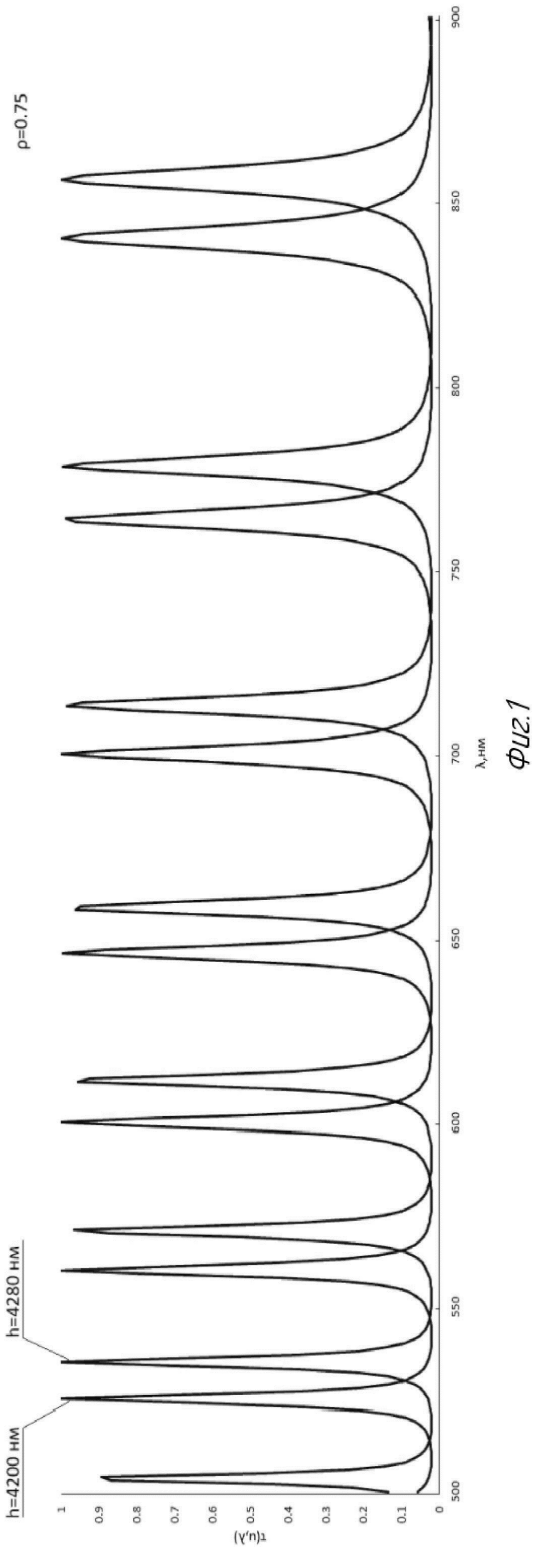
приложенного к пьезоэлектрической шайбе фильтра,

$K_i(u, \lambda)$  – ядро интегрального уравнения  $i$ -го канала, определяемое спектральной чувствительностью  $S_i(\lambda)$   $i$ -го канала и спектральным пропусканием  $\tau(u, \lambda)$  управляемого фильтра:

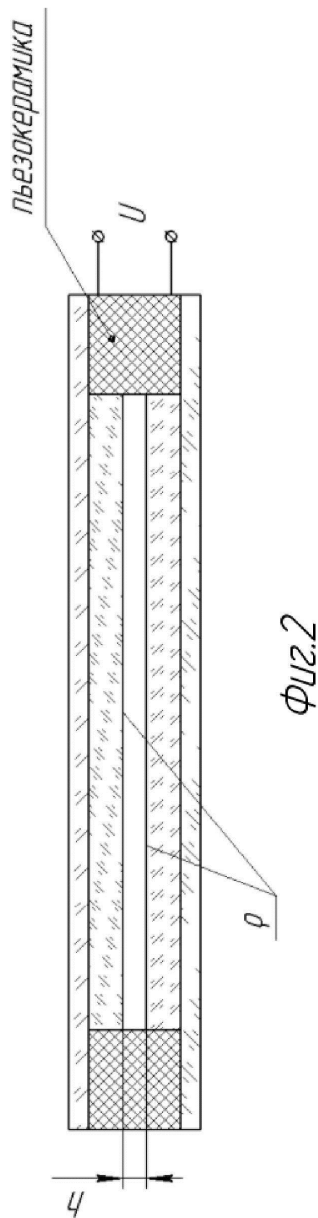
$$K_i(u, \lambda) = S_i(\lambda) \tau(u, \lambda).$$



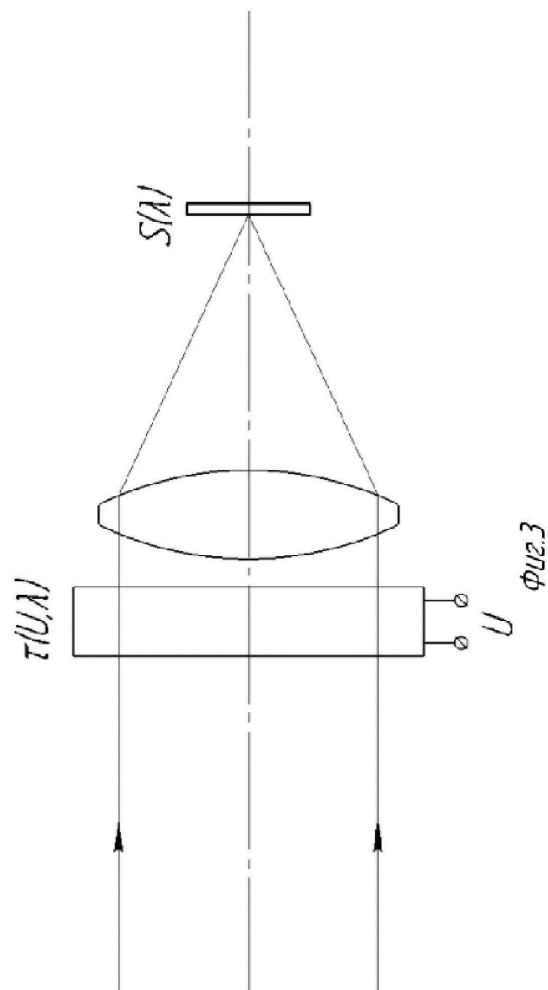
1



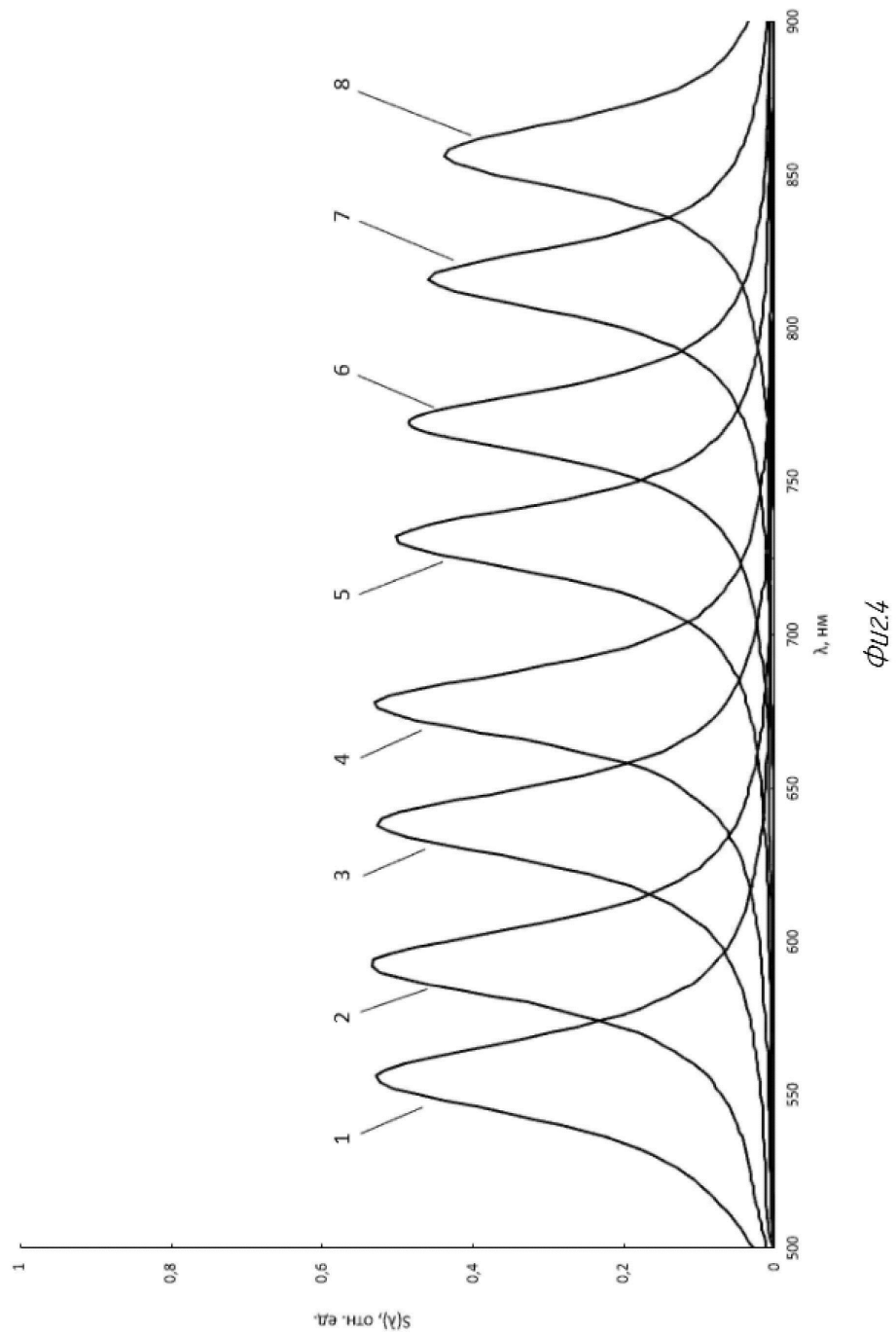
2

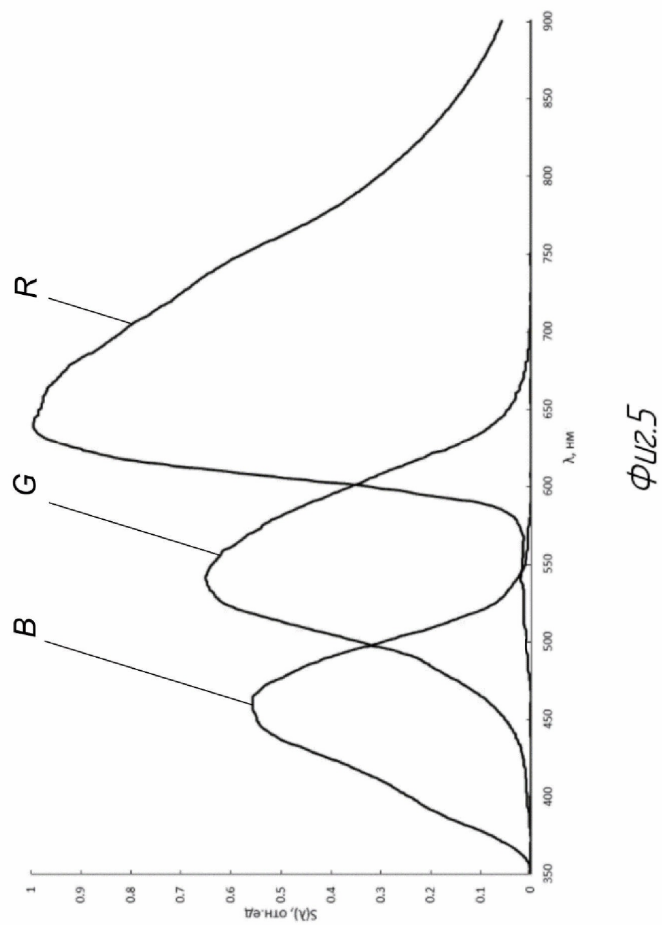


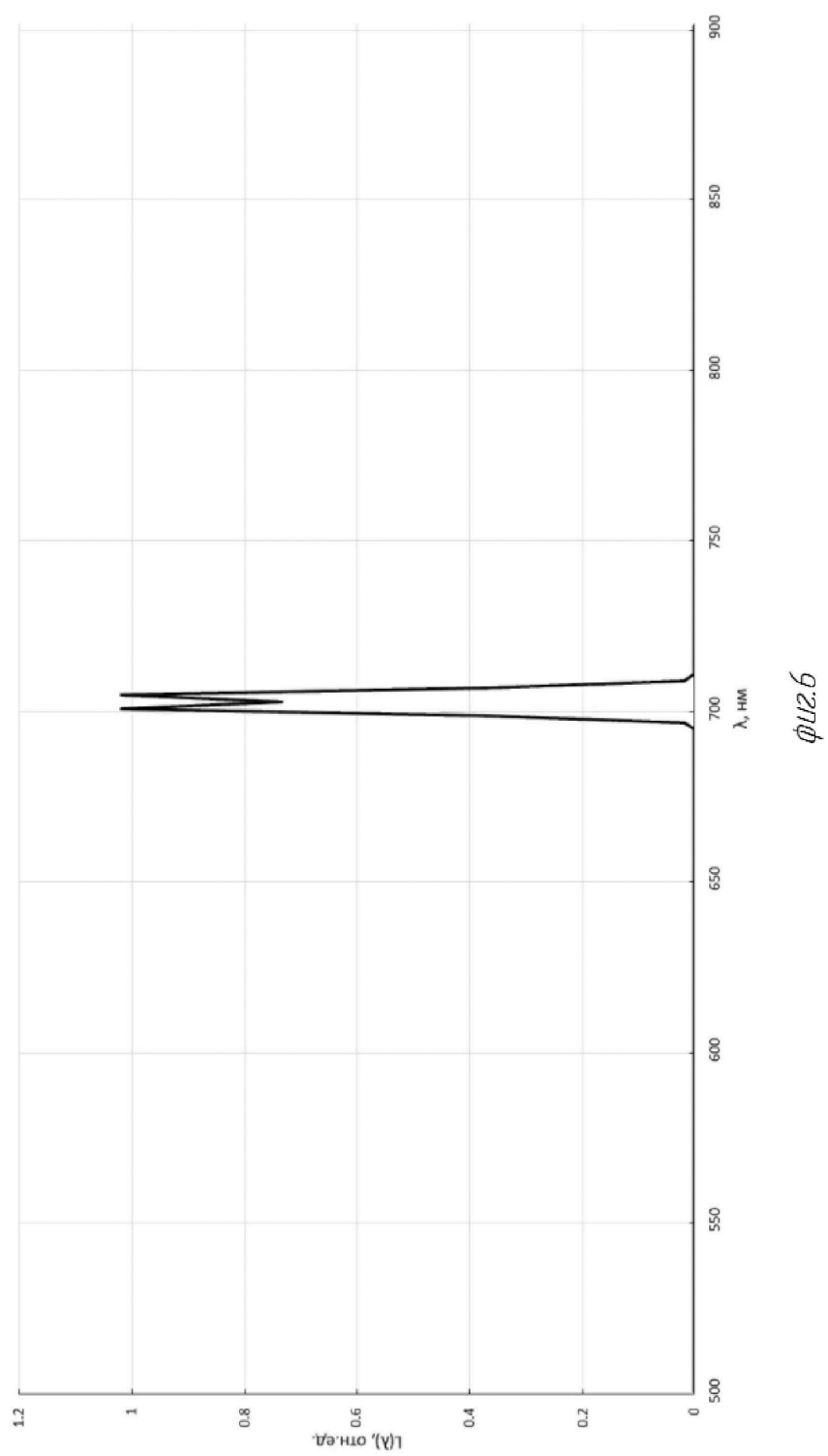
Фиг. 2

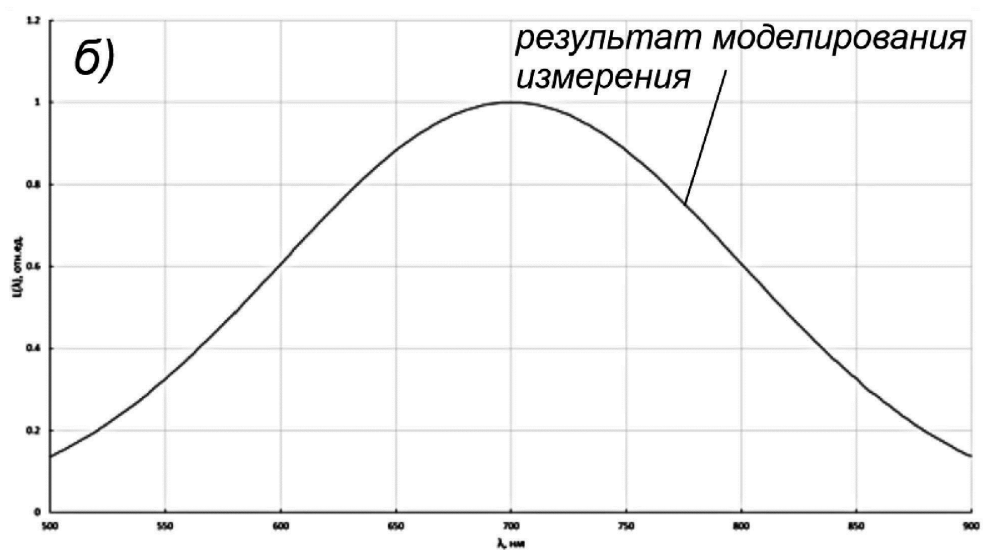
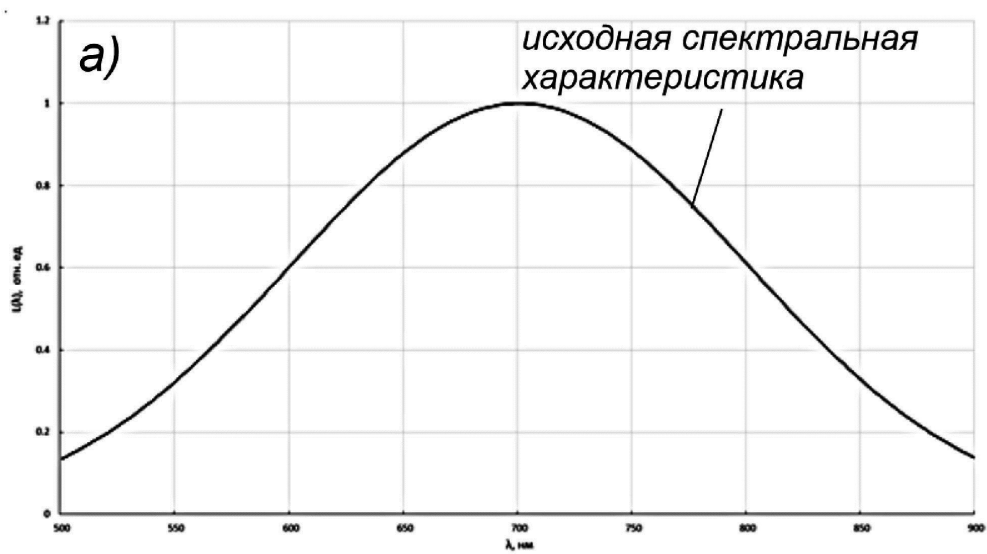


Фиг. 3









Фиг. 7