

УДК 681.785.574.065

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-06-42-47

Статические фурье-спектрометры на основе призм-склеек

© 2018 г. **Л. В. Егорова, канд. техн. наук; В. Д. Стариченкова, канд. техн. наук; О. К. Таганов, канд. физ.-мат. наук**

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: tagol45@soi.spb.ru

Поступила в редакцию 12.03.2018

В 80-х годах прошлого века в нашей стране и за рубежом, наряду с традиционной сканирующей по разности хода техникой фурье-спектрометрии, появилось новое направление, основу которого составили статические фурье-спектрометры. Последние характеризовались возможностью получения спектра источника в результате регистрации и последующей обработки пространственно локализованной интерферограммы. Возможность замены зеркал, светоделителей и диэдров в интерферометрах этих устройств одним оптическим модулем в виде призм-склеек обеспечивает одновременно высокие эксплуатационные качества жёсткости и нерасстраиваемости. Опыт создания и эксплуатации статических фурье-спектрометров на основе призм-склеек обуславливает интерес к их систематизации и сравнительному анализу.

Ключевые слова: статические фурье-спектрометры, интерферометры, призмы-склейки.

Коды OCIS: 120.6200, 230.5480, 300.6300.

ВВЕДЕНИЕ

Разработкой и исследованием статических фурье-спектрометров (СФС) специалисты Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) занимаются достаточно давно [1–7].

Вполне продвинутой к тому времени техника фурье-спектрометрии со сканированием по разности хода широко использовала интерферометры типа Майкельсона различных модификаций, в том числе и с диэдрами в качестве концевых отражателей [8]. В таких приборах концевые диэдры выставляются без какого бы ни было поперечного сдвига, приводящего к потере контраста интерференционной картины и, как следствие, к потере значения сигнала, регистрируемого одноплоскостным фотоприёмником в процессе изменения продольной величины разности хода.

Толчком к пониманию возможности получения интерферограммы спектра источника, локализованной в пространстве, для отечественных разработчиков послужила статья французского исследователя Ролана Пра [9], в которой он представил всесторонний анализ некоторых схем интерферометров «поперечного сдвига», в частности, на основе известного интерферометра Саньяка [3].

Спектрометрические приложения данных устройств оказались вне поля зрения его работы. Идеи, связанные с возможностью получения спектра источника в процессе регистрации пространственно локализованной интерферограммы, были одновременно сформулированы в нашей стране и в Японии в работах [1, 10]. Очень быстро пришло понимание того, что как интерферометр Саньяка по обратно-круговой схеме (ОКС), содержащий светоделитель и пару зеркал, так и интерферометр Майкельсона с диэдрами в качестве концевых отражателей, могут быть заменены соответствующими призмами-склеяками. Эффект этой замены выражается в уменьшении габаритов и массы этих устройств и придании им максимально возможной жёсткости и нерасстраиваемости. Особенностью, ограничивающей область применения СФС на основе призм-склеек, является невозможность изменения в процессе работы величины поперечного сдвига [3] и, следовательно, шага интерференционных полос, а значит, и спектрального разрешения.

В настоящее время существует несколько вариантов оптических схем СФС на основе призм-склеек, сравнительный анализ которых приводится ниже.

1. ПРИЗМЫ С ОБРАТНО-КРУГОВЫМ ХОДОМ ЛУЧЕЙ

Особенностью призм данного типа является возможность изготовления (склейки) без визуального контроля качества интерференционной картины.

Такие призмы вносят только поперечный сдвиг (shear), поэтому создаваемая ими интерферограмма — двухсторонняя с нулевой разностью хода на оптической оси. В случае регистрации двухсторонней интерферограммы нулевая разность хода (ахроматическая интерференционная полоса равного наклона) находится на оптической оси фурье-объектива.

1.1. СФС на основе склейки половинок призмы Кестерса (рис. 4в в обзоре [6])

На рис. 1 приведена оптическая схема призмы-склейки, функционирование которой аналогично интерферометру Саньяка (показанному, например, на рис. 3 в работе [6]). Две полупризмы с углами при вершинах 90° , 60° и 30° склеиваются по их гипотенузным граням, на часть AO одной из которых наносится светоделительное покрытие. Грани, соответствующие большим катетам полупризм, алюминированы.

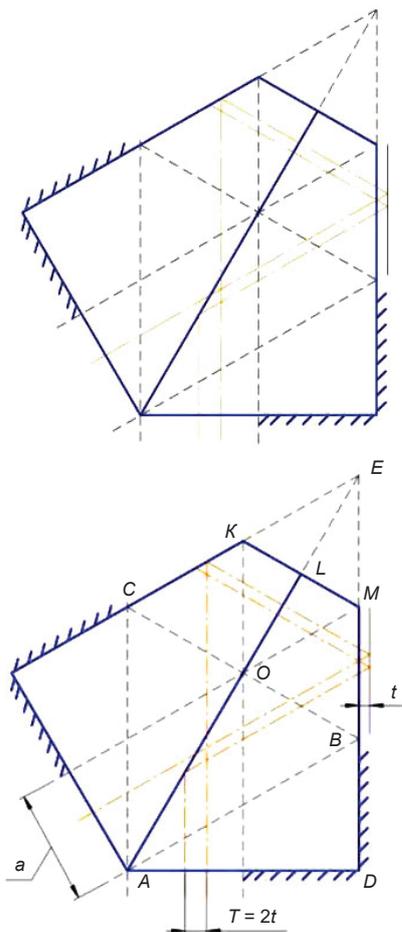


Рис. 1. Эскиз призмы-склейки на основе двух 30° -призм.

Штриховкой отмечены нерабочие участки катетов. a — ширина действующего параллельного пучка; t — изменение длины катета AD , вносящее поперечный сдвиг $T = 2t$ между интерферирующими фронтами.

Ниже приведены основные геометрические соотношения для данной призмы-склейки пока без учёта поперечного сдвига

$$\frac{AD}{DE} = \operatorname{tg}30^\circ;$$

$$ED = \frac{AD}{\operatorname{tg}30^\circ} = 1,732AD; \quad ED = AD\sqrt{3},$$

$$AB = BE, \quad OE = AD, \quad BD = OB, \quad AB + BO = ED.$$

Длина хода осевого луча в стекле равна $(AB + BC + CA) = 2(AB + BO) = 2ED = 3,464AD$, т.е. два больших катета. AO — светоделитель, $AO = OE$ равно половине гипотенузы.

Ширина параллельного пучка лучей — $a = AD/2$. KM — габаритная грань (только шлифуется).

$OL = OE/2 = AO/2$, так что габаритный размер $AL = 3AE/4$, $EM = MB$, $AE = 2AD$, отсюда $AL = 3/4(2AD) = 1,5AD$.

Для внесения поперечного сдвига грань AD увеличивается на величину t , связанную со значением поперечного сдвига T как $T = 2t$. Указанное увеличение грани t реализуется либо за счёт некоторого взаимного смещения полупризм по их гипотенузным граням, либо путём приклеивания плоскопараллельной пластинки соответствующей толщины на участок грани одной из полупризм, обозначенный на рис. 1 как BM .

1.2. СФС на основе пента-призмы и призмы-ромба [1, 2]

На рис. 2 приведена оптическая схема второго варианта призмы-склейки с обратным круговым ходом лучей.

Две полупризмы с углами при вершинах 45° , $112,5^\circ$, $112,5^\circ$ и 90° склеиваются, как показано на рис. 2. При этом, на участок AF длинной грани AM одной из полупризм наносится светоделительное покрытие. Части призм, помеченные как FM , прозрачны. Две грани CD и BE , выполняющие функции зеркал, алюминированы. Участки CK и BN граней AB и AC покрываются светопоглощающим лакокрасочным покрытием. Грань ED только шлифуется.

AM — плоскость склейки. Штриховкой обозначены нерабочие зоны. Приращение t геометрического размера одной из полупризм вызывает поперечный сдвиг T между интерферирующими фронтами.

Ниже приведены основные геометрические соотношения для данной призмы-склейки вначале без учёта поперечного сдвига.

Длина хода осевого луча в стекле — $(AB + BC + AC) = AB(2 + \sqrt{2}) = 3,414AB$.

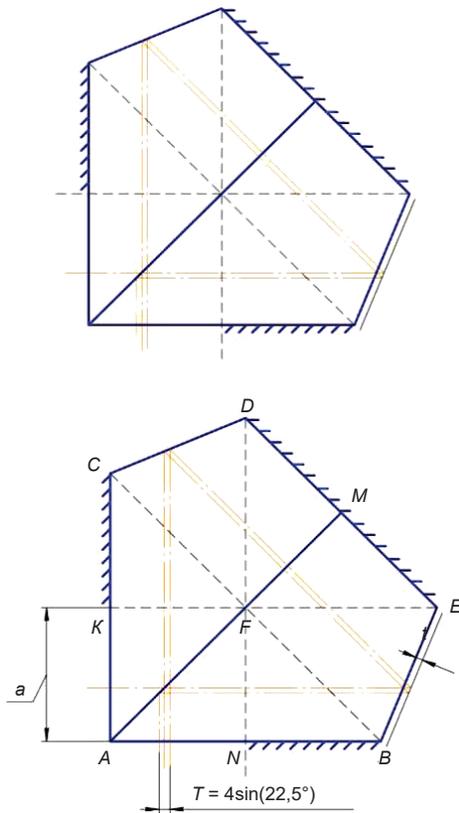


Рис. 2. Эскиз призмы-склейки на основе двух половинок пента-призмы.

Ширина параллельного пучка лучей — $a = AK = 1/2(AB) = 1/2(AC)$.

ED — габаритная грань. Можно показать, что $AB = AC = ED$, а $FM = ME = AB/2$, так что габаритный размер $AM = AF + FM = a(1 + \sqrt{2})$. Габаритный размер $BC = 2a\sqrt{2}$.

После внесения поперечного сдвига связь между приращением t габаритного размера BC и поперечным сдвигом T между интерферирующими лучами

$$T = 4t \sin 22,5^\circ = 1,5307t.$$

2. ПРИЗМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Особенностью СФС на основе призм-склеек по схеме интерферометра Майкельсона является возможность внесения кроме поперечного сдвига продольного сдвига и, следовательно, создание псевдоодносторонней интерферограммы спектра источника. В случае псевдоодносторонней интерферограммы в интерферометре вводится продольная разность хода таким образом, что ахроматическая интерференционная полоса смещается с оптической оси фурье-объектива на край интерференционного поля, а разность хода в пределах фотоприёмного устройства изменяется от $-\Delta_{\min}$

до $+\Delta_{\max}$, при этом Δ_{\min} должна быть достаточно для извлечения информации о фазовом спектре исследуемого источника.

При этом в процессе склейки необходим визуальный контроль совпадения выходных зрачков и, следовательно, соответствующие юстировки одной из склеиваемых половинок.

2.1. СФС типа Майкельсона на основе призмы-склейки с крышами (рис. 46 в обзоре [6])

На рис. 3 приведена оптическая схема интерферометра с поперечным сдвигом на основе интерферометра Майкельсона, в котором светоделитель, компенсатор и концевые зеркала заменены двумя полупризмами с углами 45° , 135° , 90° и 90° . AD — плоскость светоделения и склейки. Все грани призмы — рабочие. d — приращение геометрического размера полупризмы, вносящее поперечный сдвиг T , t — продольный сдвиг интерферирующих фронтов. Тип схемы — Майкельсон с концевыми диэдрами. Ширина пучка a равна ширине входной грани в плоскости чертежа минус величина сдвига T . Длина хода в стекле составляет $3a$. Геометрическая разность длин граней призм в плоскости чертежа равна $T = d\sqrt{2}$. Поперечный сдвиг — $T = (AC - AB) = d\sqrt{2}$.

Продольный сдвиг может быть реализован за счёт взаимного смещения полупризм по плоскости

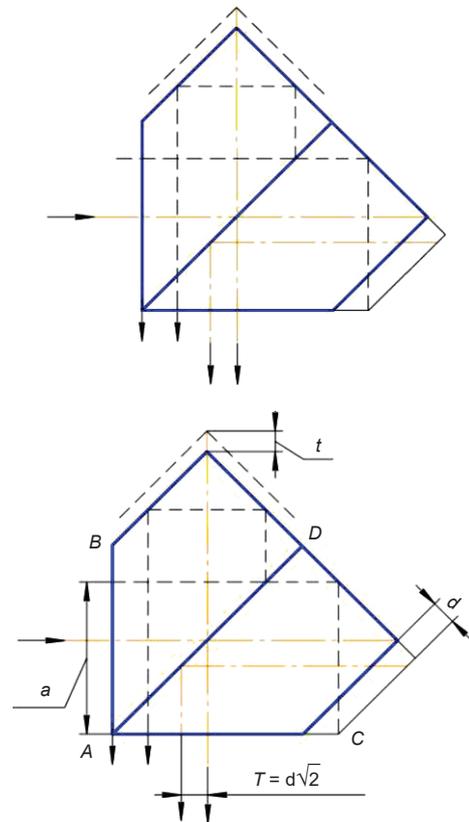


Рис. 3. Эскиз призмы-склейки ГОИ на основе двух прямоугольных полупризм с «крышей».

светоделителя. Если указанное смещение обозначить через t , то оптическая разность хода вдоль оси

$$\Delta = 2t(n - 1),$$

где n — показатель преломления материала призмы.

2.2. СФС на основе призмы-склейки ГОИ

На рис. 4 приведена оптическая схема СФС на основе оригинальной призмы-склейки, предложенной сотрудниками ГОИ [11].

Тип схемы — Майкельсон с концевыми диэдрами.

Углы полупризм — 90° , 90° , $67,5^\circ$ и $112,5^\circ$. CE — плоскость светоделения и склейки. Все грани призмы — рабочие. d — приращение геометрического размера одной из полупризм, вносящее поперечный сдвиг фронтов T и продольный сдвиг t .

Ширина пучка a равна ширине входной грани в плоскости чертежа.

Длина хода в стекле при любом значении поперечного сдвига T не зависит от d и составляет величину $a(1 + \sqrt{2}) = 2,41a$.

Поперечный сдвиг — $T = d\sqrt{2}$. Продольный сдвиг — $\Delta = 2t(n - 1)$.

2.3. СФС на основе интерференционного кубика [12, 13]

В СФС на основе рассмотренных выше типов призм-склеек интерференционная картина представляет собой полосы равного наклона, локали-

зованные на бесконечности. Размеры телесного угла входного отверстия в этом случае ограничиваются только виньетированием наклонных пучков в самой призме. Однако в обычном интерферометре Майкельсона возможно наблюдение как полос равного наклона, локализованных на бесконечности, так и полос равной толщины, локализованных на зеркалах интерферометра в случае наличия некоторого угла между интерферирующими фронтами. При этом имеет место обычное ограничение телесного угла входного отверстия — обратная пропорциональность величине разности хода максимального по зрачку значения разрешающей способности, что несущественно при небольших реальных значениях последней. Следовательно, склейка двух обычных полупризм с углами 45° , 90° и 45° с некоторым взаимным их разворотом на угол ε в процессе склейки вокруг оси, перпендикулярной плоскости гипотенузных граней, позволит получить СФС, отличающийся от рассмотренных выше и аналогичный интерферометру Майкельсона с некоторым клином между зеркалами.

Тип схемы — Майкельсон с заклоненными зеркалами (рис. 5). Неперпендикулярность концевых зеркал оптической оси обозначим через ε . Ширина пучка лучей на входе интерферометра равна ширине входной грани.

Геометрическая длина хода осевого луча в призме — $L = 2a$. AC — плоскость светоделения

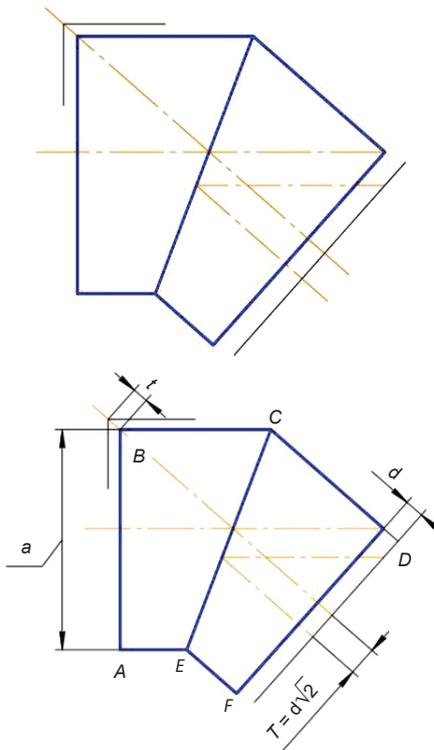


Рис. 4. Эскиз наиболее перспективной призмы-склейки ГОИ.

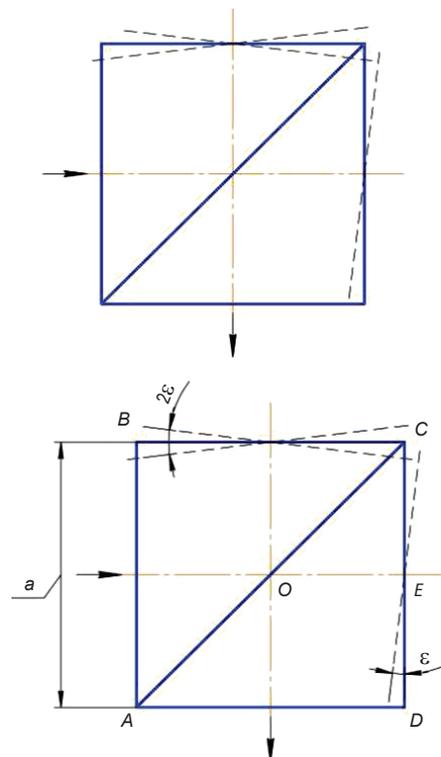


Рис. 5. Эскиз призмы-склейки на основе двух 45° -полупризм.

«Светосила» призм-склеек на основе интерферометров Майкельсона и с обратным круговым ходом лучей

Призмы-склейки	Ширина пучка	Длина хода в стекле	«Светосила» призмы
№ 1	0,5AB	3,464AB	1:6,928
№ 2	0,5AB	3,414AB	1:6,828
№ 3	AB	3AB	1:3
№ 4	AB	2,41AB	1:2,41
№ 5	AB	2AB	1:2

и склейки. Все грани — рабочие. BC — плоскость локализации полос равной толщины.

Поперечный сдвиг в схеме отсутствует. Величина продольного сдвига изменяется с координатой a зрчка в плоскости чертежа до максимальных значений от $(a \cdot \varepsilon, n)$ до $(2a \cdot \varepsilon, n)$ в зависимости от места локализации на зрчке ахроматической полосы, соответствующей нулевой разности хода.

3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Для характеристики и выбора среди приведённых выше типов призм-склеек можно ввести следующий количественный критерий. Будем называть «светосилой» призм-склейки отношение ширины параллельного пучка a , выраженной в долях ширины входной грани, к оптической длине хода осевого луча в стекле, также связанного с шириной входной грани. Тогда для приведённых выше пяти типов СФС на основе призм-склеек выбор может быть сделан на основе следующей итоговой таблицы.

Таким образом, из таблицы видно, что призм-склейки на основе интерферометра Майкельсона на первый взгляд существенно более светосильны по сравнению с обратными круговыми схемами. Это справедливо без ограничений для призм № 3 и 4. Однако для призмы № 5 требуется перепроектировать интерференционную картину с зеркал в плоскость матричного фотоприёмника, как правило, с существенным уменьшением. Это требует применения проектирующей оптики с большим передним отрезком, что в итоге ухудшит реальную «светосилу» схемы. Кроме того, призм-склейки на основе интерферометра Майкельсона, как было отмечено, требуют визуального контроля совпадения выходных зрчков в процессе склейки (в работе [14] описано устройство для склейки интерференционных кубиков пятого типа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени известны практические реализации призм-склеек. Например, на основе

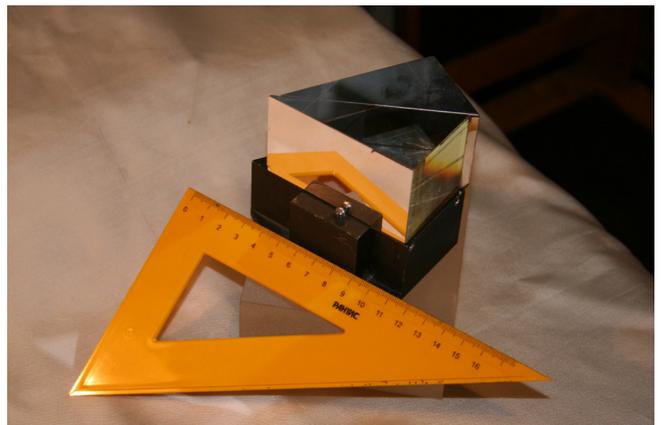


Рис. 6. Фотография макета СФС ГОИ на основе склейки двух 30°-полупризм. Вариант призм-склейки № 1.

склейки с гипотенузными гранями двух половинок призмы Кестерса (вариант призм-склейки с обратным круговым ходом лучей № 1) создан и исследован СФС [3], фотография оптического блока которого представлена на рис. 6. Впервые представленная в [1] схема № 2 СФС на основе призмы с обратным круговым ходом лучей, изображенная на рис. 2, использована в многочисленных разработках бортовых СФС фирмы Кестрел. В частности, для СФС второго поколения, установленного на спутнике МАЙТИСЭТ-2 [15], достигнуты следующие основные реальные параметры спектрометра:

- спектральный диапазон — 475–1050 нм;
- спектральное разрешение — $84,4 \text{ см}^{-1}$;
- точность шкалы волновых чисел — $0,1 \text{ см}^{-1}$;
- число используемых каналов — 146;
- поле зрения — 3° ;
- мгновенное поле зрения — до $0,0029^\circ$;
- пространственное разрешение — 30 м.

Та же схема № 2 использована, например, и в СФС, описанном в [16].

Несколько модифицированная схема № 3 Майкельсона с «крышами» описана в работе [17]. Однако в этом случае «крыши» не составляют единого блока со светоделителем, но зато появляется возможность внесения продольной разности хода.

Использование призм-склейки № 4, по нашему мнению, представляет наибольший интерес. В настоящее время изготовлены полупризмы, подлежащие склейке, и работа переходит в стадию проектирования оптико-механической части спектрометра.

Наиболее широко в разных странах в силу своей простоты используется схема № 5 интерференционного кубика. В частности, она легла в основу толщиномеров ГОИ [18], а в настоящее время широко используется в разработках газоанализаторов в МГТУ им. Баумана [19, 20].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егорова Л.В.* Интерференционный спектрометр. Призма-склейка с обратно-круговым ходом лучей (Саньяк) // А.с. № 845548. Бюл. изобр. 1992. № 20. С. 1
2. *Tyo J.S., Turner T.S.* Variable-retardance, Fourier-transform imaging spectropolarimeters for visible spectrum remote sensing // *Applied Optics*. 2001. V. 40. № 9. P. 1450–1458.
3. *Гиль С.В., Егорова Л.В., Лещева И.Е., Строганова А.Ю.* Исследование интерференционного поля статического фурье-спектрометра // *ОМП*. 1988. № 1. С. 10–14.
4. *Егорова Л.В., Лещева И.Е., Попов Б.Н., Строганова А.Ю.* Статический быстродействующий фурье-спектрометр с линейным ПЗС-формирователем изображения // *ОМП*. 1989. № 4. С. 27–28.
5. *Егорова Л.В., Лещева И.Е., Попов Б.Н.* Использование статического фурье-спектрометра для контроля толщины тонких пленок // *Электронная промышленность*. 1990. № 1. С. 44–45.
6. *Егорова Л.В., Ермаков Д.С., Кувалкин Д.Г., Таганов О.К.* Фурье-спектрометры статического типа // *ОМП*. 1992. № 2. С. 3–14.
7. *Егорова Л.В., Ермаков Д.С., Крюков Н.В., Кувалкин Д.Г., Робачевский М.В., Таганов О.К.* Многоканальный УВИ-спектрофотометр с преобразованием Хартли // *Оптический журнал*. 1995. № 7. С. 10–14.
8. *Fellgett P.* A propos de la theorie du spectrometer interferential multiplex // *Journal Phys. et le Radium*. 1958. V. 19. P. 187.
9. *Prat R.* Spectrométrie et spectrographie interférentielles par dédoublement achromatique transversal de la source // *I Opt. Acta*. 1971. V. 18. № 3. P. 213–244.
10. *Okamoto T., Kawata S., Minami S.* Fourier transform spectrometer with a self-scanning photodiode array // *Applied Optics*. 1984. V. 23. № 2. P. 269–273.
11. *Егорова Л.В., Кувалкин Д.Г., Таганов О.К., Яковлев В.Б.* Интерференционный спектрометр // Патент России № 2083960. 1997.
12. *Saunders J.* A simple interferometric method for workshop testing of optics // *Applied Optics*. 1970. V. 9. № 7. P. 1623–1629.
13. *Murty M.* A compact lateral shearing interferometer based on the Michelson interferometer // *Applied Optics*. 1970. V. 9. № 5. P. 1146–1148.
14. *Бирюлева В.И., Бушев Ю.А., Гершун М.А., Егорова Л.В.* Приспособление для склейки светоделительного кубика // *ОМП*. 1983. № 11. С. 52–53.
15. *Otton L.J., Meigs A.D., Jones B.A., Prinzing P., Fronterhouse D.S., Sellar R.G., Rafert B., Hodge C.* The engineering model for the MightySat II. I. Hyperspectral imager // *Proc. SPIE*. 1997. V. 3221. P. 412–420.
16. *Hirschberg J.G., Kohen E.* Pentaferometer: a solid Sagnac interferometer // *Applied Optics*. 1999. V. 38. № 1. P. 136–138.
17. *Ferrec Y., Taboury J., Sauer H., Chavel P., Fournet Pierre., Coudrain C., Deschamps J., Primot J.* Experimental results from an airborne static fourier transform imaging spectrometer // *Applied Optics*. 2011. V. 50. № 30. P. 5894–5904.
18. *Гершун М.А., Павлова А.Е., Поспелов Г.В.* Измерение толщин тонких прозрачных пленок с помощью интерферометра, не содержащего подвижных оптических элементов // *ОМП*. 1984. № 8. С. 42–44.
19. *Бойко А.Ю., Голяк И.С., Голяк И.С., Дворук С.К., Доровских А.М., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Косенко Д.В., Кочкиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е.* Статический фурье-спектрометр видимого и ближнего ультрафиолетового диапазонов спектра // *Вестник МГТУ им. М.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2009. № 3 (34). С. 11–27.
20. *Голяк И.С.* Применение статического фурье-спектрометра для беспробоотборного анализа химических соединений // Автореф. канд. дис. М.: НТИЦ УП РАН, 2015. 16 с.