

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-12-13-18

УДК 53.082.53; 681.785.24

Измерение показателя преломления с помощью гониометрической системы в автоматизированном режиме

Александр Игоревич Юрин¹✉, Геннадий Николаевич Вишняков²,
Владимир Леонидович Минаев³

^{1,3}Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

^{1,2,3}Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

¹ayurin@hse.ru <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>

²vish@vniiofi.ru <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

³minaev@vniiofi.ru <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

Аннотация

Предмет исследования. Метод измерения показателя преломления с помощью автоматизированной автоколлимационной гониометрической системы. **Цель работы.** Упрощение процедуры прецизионных измерений показателя преломления прозрачных твёрдых и жидких оптических материалов. **Метод.** Для измерения показателя преломления трёхгранных призм часто используют гониометрические методы, основанные на измерении углов преломления света веществом. Предложен метод, позволяющий определять показатель преломления путём измерения угла отклонения света призмой после отражения от внутренней грани в автоматизированном режиме. **Основные результаты.** Приведены результаты измерений показателя преломления двух трёхгранных призм, изготовленных из различных марок стекла — N-BK7 и SF-1 с помощью предложенного метода на автоколлимационной гониометрической системе. Погрешность измерений при этом не превысила $1,5 \times 10^{-4}$ при сравнении с номинальным значением для данных призм на длине волны источника излучения автоколлиматора, что доказывает перспективу применения подобного метода для высокоточных измерений показателя преломления. **Практическая значимость.** Предложенный в статье метод можно применять для измерения показателя преломления трёхгранных призм из оптически прозрачных материалов с различными по величине преломляющими углами с помощью гониометрической системы в автоматизированном режиме. Метод также можно использовать для жидких оптически прозрачных веществ, помещённых в полую трёхгранную призму.

Ключевые слова: гониометр, показатель преломления, рефрактометрия, автоматизация измерений

Ссылка для цитирования: Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. Измерение показателя преломления с помощью гониометрической системы в автоматизированном режиме // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 12. С. 13–18. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-12-13-18>

Коды OCIS: 120.4640, 120.3930.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение показателя преломления является важнейшим направлением оптико-физических измерений, позволяющим определять

состав веществ, чистоту материалов, качество продуктов и т.д. [1].

Для измерения показателя преломления широко используют методы рефрактометрии,

основанные на свойствах отражения и преломления света, проходящего через образец. Эти методы могут применяться как для твёрдых тел, так и для жидкостей. В качестве образцов чаще всего используют трёхгранные призмы, изготовленные из исследуемого материала либо заполняемые исследуемым веществом. Для измерения углов отклонения света призмой обычно используют специальные приборы — гониометры [2].

Разработаны и широко применяются различные методы измерений показателя преломления для трёхгранных призм, в том числе хорошо известные методы автоколлимации (метод Литтрова–Аббе) и наименьшего отклонения (метод Фраунгофера) [3]. Однако для обеспечения высокой точности крайне желательна автоматизация измерительного эксперимента и термостабилизация, чтобы исключить влияние оператора и тепловыделяющих элементов на результат, поэтому разработка методов, позволяющих проводить дистанционные автоматизированные измерения показателя преломления является актуальной задачей. В работе [4] описан пример применения динамического гониометра с кольцевым лазером для автоматизации измерений методом наименьшего отклонения. Подобный способ отличается высокой точностью, однако использует весьма дорогостоящее оборудование и предполагает существенные затраты времени, поскольку для определения угла наименьшего отклонения проводят серию из 16 измерений для 12 угловых положений призмы.

Цель данной работы — описание нового способа измерения показателя преломления трёхгранных призм с помощью гониометрической системы с оптическим автоколлиматором, предназначенной для измерения углов многогранных призм в ручном и автоматизированном режимах.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД

В предыдущей работе [5] был рассмотрен вариант применения гониометрической системы для измерения показателя преломления трёхгранной призмы на основе модифицированного метода Литтрова–Аббе.

Основным недостатком подобного метода является невысокая мощность отражённого

сигнала, поскольку от выходной грани отражается очень малая часть излучения. Это обстоятельство приводит к необходимости индивидуальной настройки усиления чувствительности камеры автоколлиматора и ручной корректировки идентификации автоколлимационной марки, что затрудняет процесс автоматизации измерений и приводит к увеличению среднего квадратического отклонения (СКО) результатов.

Указанный недостаток можно устранить с помощью неподвижного зеркала, расположенного перпендикулярно преломлённому лучу под углом ε относительно направления падающего луча (рис. 1). При этом не нужно добиваться перпендикулярного падения луча на выходную грань, поэтому можно использовать фиксированный угол ε , обеспечивающий автоколлимацию и достаточную мощность отражённого луча при повороте призмы.

Подробнее рассмотрим ход луча в случае отражения от противоположной грани. Пусть α , β и γ — преломляющие углы призмы, φ_1 и ψ_1 — углы падения и преломления на первой (входной) грани призмы, δ — угол падения и отражения на второй грани, φ_2 и ψ_2 — углы падения и преломления на третьей (выходной) грани (рис. 1).

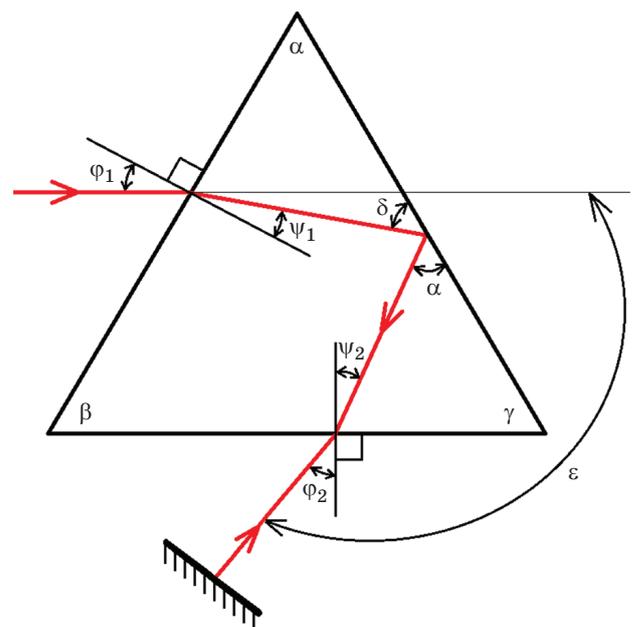


Рис. 1. Ход преломления и отражения луча в предложенном методе. Пояснения в тексте

Если обозначить угол отклонения луча как ε , то исходя из закона отражения света [6] и основных свойств углов, получим

$$\varepsilon = \varphi_1 - \psi_1 + 2\delta + \varphi_2 - \psi_2, \quad (1)$$

$$\delta = \pi/2 - \alpha + \psi_1, \quad (2)$$

$$\delta = \pi/2 - \gamma + \psi_2. \quad (3)$$

Тогда

$$\varepsilon = \varphi_1 + \varphi_2 + \beta. \quad (4)$$

Используя закон преломления света [6], можно найти зависимость $\varphi_2(\varphi_1)$:

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \text{asin}(n \sin \psi_2) = \\ &= \text{asin}[n \sin(\gamma - \alpha + \text{asin}(\sin \varphi_1 / n))], \end{aligned} \quad (5)$$

и в этом случае можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi_1) &= \varphi_1 + \\ &+ \text{asin}[n \sin(\gamma - \alpha + \text{asin}(\sin \varphi_1 / n))] + \beta, \end{aligned} \quad (6)$$

где n — относительный показатель преломления материала призмы.

Поскольку значение ε изначально известно, то измерив угол падения при достижении автоколлимации φ_1 , можно определить показатель преломления из решения уравнения (6). Отметим, что предложенный метод нельзя использовать при равенстве углов при входной и выходной гранях, т.е. для призм с $\alpha = \gamma$, поскольку в этом случае ε перестает зависеть от n .

Таким образом, суть предложенного в данной работе метода состоит в следующем. Для определения показателя преломления в автоматизированном режиме измеряют углы $\varphi_{0\alpha\beta}$, $\varphi_{0\gamma\alpha}$, $\varphi_{0\beta\gamma}$ при которых достигается автоколлимация после отражения от входных граней, а также углы $\varphi_{1\alpha\beta}$, $\varphi_{1\gamma\alpha}$, $\varphi_{1\beta\gamma}$, соответствующие моментам автоколлимации от неподвижного зеркала.

Преломляющие углы призмы вычисляют по формулам

$$\alpha = \pi - (\varphi_{0\gamma\alpha} - \varphi_{0\alpha\beta}), \quad (7)$$

$$\beta = \pi - (\varphi_{0\alpha\beta} - \varphi_{0\beta\gamma}), \quad (8)$$

$$\gamma = \pi - (\varphi_{0\beta\gamma} - \varphi_{0\gamma\alpha}). \quad (9)$$

Подставляя значения $\varphi_{1\alpha\beta}$, $\varphi_{1\gamma\alpha}$, $\varphi_{1\beta\gamma}$ и соответствующих углов в уравнение (6), определяют значения n_1 , n_2 , n_3 и рассчитывают относительный показатель преломления призмы n_{meas} как среднее арифметическое из полученных значений.

Значение абсолютного показателя преломления n_{abs} вычисляют по формуле [8]

$$n_{\text{abs}} = n_{\text{meas}} n_{\text{air}} - \beta(t - 20), \quad (10)$$

где n_{air} — показатель преломления воздуха, β — температурный коэффициент показателя преломления материала призмы, t — температура призмы.

Для определения n_{air} используется формула Эдлена [9], коэффициент β можно узнать из [10] либо каталога производителя материала.

Таким образом, поскольку неподвижное зеркало обеспечивает достаточную яркость автоколлимационной марки, применение предложенного метода позволяет проводить измерения в автоматизированном режиме, что может существенно уменьшить погрешность измерений.

ПРИМЕНЕНИЕ ГОНИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для реализации предложенного метода в работе использована гониометрическая система [11], позволяющая измерять углы, образованные плоскими поверхностями объектов в автоматизированном режиме с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,25''$ (рис. 2).

Исследуемую призму 1 устанавливают на поворотном предметном столике 2 так, чтобы центр входной грани находился на визирной оси автоколлиматора 3 перпендикулярно падающему лучу 4 и фиксируют значение начального угла, совмещая изображение автоколлимационной марки с перекрестьем в центре экрана. Для автоматизации измерений используется компьютер с установленным специализированным программным обеспечением GonioScan, предназначенным для управления гониометрической системой, вывода на экран автоколлимационной марки в реальном времени и записи результатов. После настройки и запуска автоматизированного режима столик с призмой поворачивается вокруг вертикальной оси с помощью двигателя, при этом

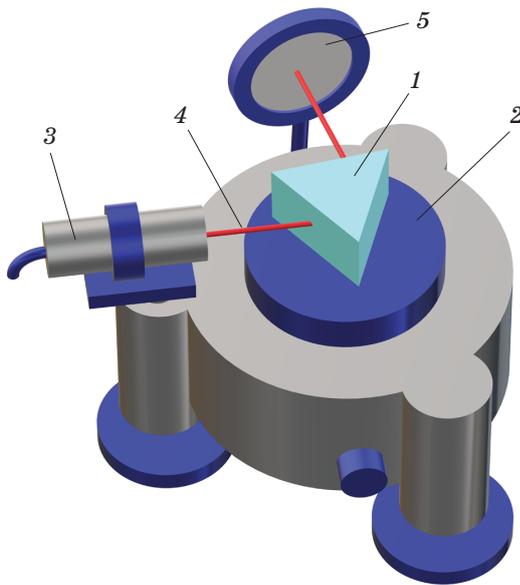


Рис. 2. Гониометрическая система с установленным неподвижным зеркалом. 1 — призма, 2 — поворотный предметный стол, 3 — автоколлиматор, 4 — луч, 5 — неподвижное зеркало

измеряются углы между гранями ($\varphi_{0\alpha\beta}$, $\varphi_{0\gamma\alpha}$, $\varphi_{0\beta\gamma}$) и углы достижения автоколлимации после отражения луча от неподвижного зеркала 5 ($\varphi_{1\alpha\beta}$, $\varphi_{1\gamma\alpha}$, $\varphi_{1\beta\gamma}$), значения которых определяются с помощью оптического энкодера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объектов для экспериментального исследования был использован комплект эталонных мер показателя преломления [12], изготовленных компанией Schott AG (Германия) из стёкол оптических бесцветных различных марок — N-BK7 и SF-1. Показатель преломления данных призм известен в широком спектральном диапазоне, благодаря международным сличениям [13], что позволяет оценить погрешность измерений предложенным методом.

Для определения номинального значения показателя преломления призмы n_0 необходимо знать длину волны, на которой производят измерения, поэтому спектр источника излучения автоколлиматора гониометрической системы был предварительно исследован с помощью мини-спектрометра Hamamatsu C10083CA [14]. Максимальное значение интенсивности сигнала спектрометра соответ-

Таблица 1. Результаты измерений преломляющих углов и углов достижения автоколлимации после отражения от неподвижного зеркала для призмы из стекла N-BK7

Угол	Среднее значение, рад	СКО
α	0,959007615	$9,5 \times 10^{-6}$
β	1,135397474	$6,2 \times 10^{-6}$
γ	1,047187564	$1,1 \times 10^{-5}$
$\varphi_{1\alpha\beta}$	0,230989266	$2,1 \times 10^{-5}$
$\varphi_{1\gamma\alpha}$	0,484867119	$1,5 \times 10^{-5}$
$\varphi_{1\beta\gamma}$	0,395214177	$1,5 \times 10^{-5}$

Таблица 2. Результаты измерений преломляющих углов и углов достижения автоколлимации после отражения от неподвижного зеркала для призмы из стекла SF-1

Угол	Среднее значение, рад	СКО
α	0,924427552	$5,6 \times 10^{-6}$
β	1,047179613	$9,1 \times 10^{-6}$
γ	1,169985488	$8,5 \times 10^{-6}$
$\varphi_{1\alpha\beta}$	0,148736702	$1,1 \times 10^{-5}$
$\varphi_{1\gamma\alpha}$	0,417657631	$1,5 \times 10^{-5}$
$\varphi_{1\beta\gamma}$	0,544195908	$1,2 \times 10^{-5}$

ствует длине волны около 650 нм, n_0 был рассчитан для этой длины волны с помощью формулы Селлмейера [15].

В табл. 1 приведены результаты измерений углов для призмы из стекла N-BK7, а в табл. 2 — для призмы SF-1. Измерения углов выполнялись с помощью гониометрической системы в автоматизированном режиме при нормальных условиях [16], каждый угол измерялся многократно с усреднением результатов. Неподвижное зеркало было установлено под углом $1,7879985 \pm 0,0000065$ рад.

Значение n_{meas} , рассчитанное по результатам измерений для первой и второй призмы составило 1,514529 и 1,710669 соответственно, абсолютная погрешность Δn при этом не превышает $1,5 \times 10^{-4}$ при сравнении с номинальным значением n_0 , что является очень хорошим результатом и доказывает перспективу применения предложенного метода для высокоточных измерений показателя преломления в автоматизированном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье модифицированный метод измерения показателя преломления можно применять для трёхгранных призм из оптически прозрачных материалов с различными по

величине преломляющими углами в тех случаях, когда требуется обеспечение автоматизации измерений. Метод также можно использовать для жидких оптически прозрачных веществ, помещённых в полую трёхгранную призму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Конопелько Л.А. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях. М.: Триумф, 2020. 208 с. <https://doi.org/10.32986/978-5-907052-08-03-2020-208>
2. Tilton L.W. Prism refractometry and certain goniometrical requirements for precision // Bureau of Standards Journal of Research. 1929. V. 2. № 5. 909 p. Research Paper 64. <https://doi.org/10.6028/jres.002.030>
3. ISO 21395-1:2020. Optics and photonics — Test method for refractive index of optical glasses. Part 1: Minimum deviation method. 06.2020. Geneva, International Organization for Standardization. 21 p.
4. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Корнышева С.В., Зюзев Г.Н., Людомирский М.Б., Павлов П.А., Филатов Ю.В. Измерение показателя преломления на гониометре в динамическом режиме // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 12. С. 53–58.
Vishnyakov G.N., Levin G.G., Kornysheva S.V., Zyuzev G.N., Lyudomirskii M.B., Pavlov P.A., Filatov Yu.V. Measuring the refractive index on a goniometer in the dynamic regime // Journal of Optical Technology. 2005. V. 72. Iss. 12. P. 929–933. <https://doi.org/10.1364/JOT.72.000929>
5. Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода Литтрова–Аббе // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 11. С. 39–43. <http://orcid.org/10.17586/1023-5086-2022-89-11-39-43>
Yurin A.I., Vishnyakov G.N., Minaev V.L. Measuring of the refractive index using the modified Littrov–Abbe method // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. № 11.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
7. Лейкин М.В., Молочников Б.И., Морозов В.Н., Шакарян Э.С. Отражательная рефрактометрия. Л.: Машиностроение, 1983. 223 с.
8. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974. 343 с.
9. Edlen B. The refractive index of air // Metrologia. 1966. V. 2. № 2. P. 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>
10. ГОСТ 13659-78 Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры
11. Электронный ресурс URL: <http://inertech-ltd.com/> (ООО «Инертех» / Оптические измерительные приборы)
12. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Корнышева С.В. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления // Измерительная техника. 2004. № 11. С. 3–6.
Vishnyakov G.N., Levin G.G., Kornysheva S.V. The state primary standard for the unit of refractive index // Measurement Techniques. 2004. T. 47. № 11. P. 1039–1043. <https://doi.org/10.1007/s11018-004-0001-0>
13. Vishnyakov G.N., Fricke A., Parkhomenko N.M., Hori Y., Pisani M. COOMET.PR-S3 Supplementary comparison refractive index (COOMET project 438/RU/08) // Metrologia. 2016. V. 53 № 1A P. 1–45. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/02001>
14. Электронный ресурс URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/spectrometers/mini-spectrometer/C10083CA.html> (Компания Hamamatsu Photonics К.К. / Каталог продукции)
15. Sellmeier W. Ueber die durch die Aetherschwingungen erregten Mitschwingungen der K rpertheilchen und deren Rück-wirkung auf die ersteren, besonders zur Erkl rung der Dispersion und ihrer Anomalien (II. Theil) // Annalen der Physik und Chemie. 1872. 223 (11): P. 386–403. <https://doi.org/10.1002/andp.18722231105>
16. ГОСТ 8.050-73 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений

АВТОРЫ

Александр Игоревич Юрин — канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, Россия; Scopus ID: 15756657400, <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>; ayurin@hse.ru

Геннадий Николаевич Вишняков — доктор техн. наук, начальник лаборатории, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, 119361, Москва, Россия; Scopus ID: 7003644474, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>, vish@vniiofi.ru

Владимир Леонидович Минаев — доктор техн. наук, начальник научно-исследовательского отделения голографии, оптической томографии, нанотехнологий и наноматериалов, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, 119361, Москва, Россия; Scopus ID: 7007026957, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>, minaev@vniiofi.ru

AUTHORS

Alexander I. Yurin — Candidate of Science, Docent, HSE University, 101000, Moscow, Russia; Scopus ID: 15756657400, <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>, ayurin@hse.ru

Gennady N. Vishnyakov — Dr.Sc., Head of Laboratory, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, 119361, Moscow, Russia; Scopus ID: 7003644474, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>, vish@vniiofi.ru

Vladimir L. Minaev — Dr.Sc., Head of Department, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, 119361, Moscow, Russia; Scopus ID: 7007026957, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>, minaev@vniiofi.ru

Статья поступила в редакцию 07.09.2022, одобрена после рецензирования 06.10.2022, принята к печати 00.00.2022