

Измерение показателя преломления с помощью гониометрической системы

© А.И. Юрин^{1,2}, Г.Н. Вишняков^{2,3}, В.Л. Минаев^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 101000 Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ФГУП „ВНИИОФИ“), 119361 Москва, Россия

³ Университет „МГТУ им. Н.Э. Баумана“, 105005 Москва, Россия
e-mail: ayurin@hse.ru

Поступила в редакцию 08.09.2022 г.

В окончательной редакции 08.09.2022 г.

Принята к публикации 09.11.2022 г.

Предложен метод измерения показателя преломления с помощью гониометрической системы, не требующий измерения преломляющего угла призмы, что упрощает процесс измерений по сравнению с широко распространенными методами наименьшего отклонения (Фраунгофера), и автоколлимации (Литтрова-Аббе). Данный метод может применяться для измерения показателя преломления образцов в виде трехгранных призм в видимом, ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах. Для реализации метода применялась гониометрическая система, предназначенная для измерения углов, образованных плоскими поверхностями объектов. Для получения отражения преломленного луча было использовано неподвижное зеркало, а показатель преломления материала призмы рассчитывался из решения системы уравнений. Приведены результаты экспериментального исследования трехгранной призмы из оптического стекла марки N-BK7 с помощью предложенного метода и их сравнение с показаниями, полученными на Государственном первичном эталоне единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021.

Ключевые слова: гониометр, показатель преломления, метод призмы.

DOI: 10.21883/OS.2022.12.54098.4103-22

Введение

Измерение показателя преломления веществ является важнейшим видом оптико-физических измерений. Поскольку показатель преломления зависит от многих параметров — агрегатного состояния и химического состава вещества, температуры, длины волны излучения и т. д., то его значение позволяет получить информацию о различных свойствах исследуемых образцов. Точные и достоверные измерения показателя преломления необходимы в оптической промышленности для контроля качества деталей, в химической промышленности при производстве сырья, определении качества нефтепродуктов, в фармацевтической промышленности и медицине при контроле состава и качества медикаментов, в пищевой промышленности при производстве соков, масел, напитков и т. д.

Для измерения показателя преломления применяют рефрактометрические методы, основанные на измерении угла преломления света веществом, интерференционные методы, основанные на измерении фазовой задержки световой волны, методы лазерной спектроскопии и т. д. При реализации указанных методов применяют законы оптики, на основании которых производят расчет параметров света при его отражении, преломлении и поглощении средой. При этом широкое распростране-

ние получили гониометрические методы, основанные на измерении углов отклонения света, проходящего через образец, благодаря своей универсальности и простоте реализации. Эти методы могут применяться как для твердых тел, так и для жидкостей. В качестве образцов, как правило, используют трехгранные призмы, изготовленные из исследуемого материала либо заполняемые исследуемым веществом [1].

Точные измерения углов, необходимые для определения показателя преломления, производят на специальных приборах — гониометрах. Гониометр имеет неподвижный коллиматор, поворотный предметный стол и служит для измерения углов отклонения лучей, преломленных или отраженных исследуемой призмой [2].

Методы призмы

Методы призмы получили большую популярность для определения показателя преломления веществ благодаря простоте и высокой точности измерений. Кроме того, методы призмы позволяют производить измерения и в невидимых областях спектра — ультрафиолетовой (УФ) и инфракрасной (ИК).

Суть любого из методов призмы заключается в измерении углов падения и преломления луча на гранях, по

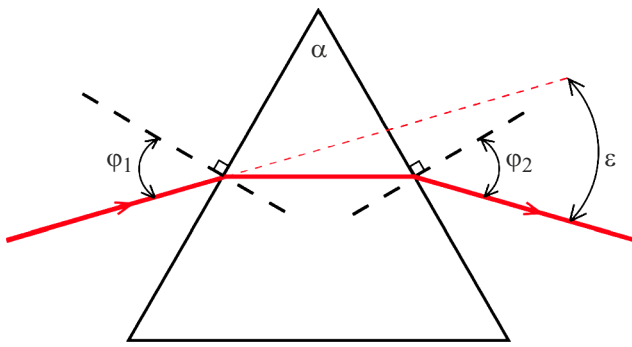


Рис. 1. Преломление луча при прохождении через трехгранную призму.

которым вычисляют показатель преломления материала призмы.

Луч света, падающий на грань трехгранной призмы с углом α между рабочими гранями под углом φ_1 , преломляется сначала на входной грани, а затем на выходной грани на угол выхода φ_2 и отклоняется на некоторый угол ε от первоначального направления (рис. 1), который можно рассчитать по формуле [3]:

$$\varepsilon = \varphi_1 - \alpha + \arcsin[n \sin(\alpha - \arcsin(\sin \varphi_1/n))], \quad (1)$$

где n — показатель преломления материала призмы.

Показатель преломления n может быть рассчитан по результатам измерений трех углов — α , φ_1 и φ_2 по формуле [4]:

$$n = \sqrt{\sin^2 \varphi_1 + \frac{(\sin \varphi_2 + \cos \alpha \sin \varphi_1)^2}{\sin^2 \alpha}}. \quad (2)$$

Обычно на практике производят измерения только двух углов, накладывая на величину третьего некоторое условие. В зависимости от конкретной реализации такого условия различают различные методы измерения показателя преломления трехгранных призм — метод наименьшего отклонения Фраунгофера [5], метод автоколлимации Литтрова-Аббе и метод постоянного отклонения.

Чаще всего применяют метод наименьшего отклонения (МНО), который основан на определении минимально возможного угла отклонения луча ε_{\min} . В таком случае можно измерить только углы ε_{\min} и α , а уравнение для расчета показателя преломления при этом становится намного проще [6]:

$$n = \sin((\alpha + \varepsilon_{\min})/2) / \sin(\alpha/2). \quad (3)$$

Широкое распространение МНО обусловлено высокой точностью измерений показателя преломления с помощью данного метода [7].

В методе автоколлимации добиваются совпадения направлений падающего луча и отраженного назад от

выходной грани, и в этом случае показатель преломления определяют по формуле [5]:

$$n = \sin \varphi_1 / \sin \alpha. \quad (4)$$

В некоторых случаях применяют метод постоянного отклонения, когда величине ε придают некоторое постоянное значение. Тогда кроме преломляющего угла α необходимо измерить угол выхода φ_2 , а расчет показателя преломления осуществляют по формуле (2) с учетом того, что $\varphi_1 = \varepsilon - \varphi_2 + \alpha$.

Таким образом, для расчета показателя преломления рассмотренными методами преломляющий угол призмы должен быть предварительно измерен с высокой точностью. Поэтому разработка новых методов, позволяющих произвести измерения показателя преломления без априорной информации о призме, является актуальной задачей.

В работе [8] был предложен метод измерения показателя преломления трехгранной призмы с помощью гониометра и зеркала. При этом на пути луча, выходящего через грань призмы, устанавливают зеркало и измеряют углы падения, при которых происходит автоколлимация от зеркала, а также преломляющий угол призмы, по которым вычисляют показатель преломления. Данный метод можно модифицировать таким образом, чтобы избавиться от необходимости измерения α , измеряя углы падения при достижении автоколлимации от неподвижного зеркала на всех трех гранях призмы и определяя величину n из решения системы уравнений.

Таким образом отпадает необходимость измерения преломляющего угла призмы. Кроме того, предложенный метод можно применять для измерения показателя преломления в УФ и ИК диапазонах. В этом случае вместо неподвижного зеркала нужно установить фотоприемник, что устраняет необходимость использования автоколлиматора со светоделительным кубом [9], который ограничивает спектральный диапазон излучения.

Гониометрическая система

Для реализации предложенного метода в работе использована гониометрическая система производства ООО „Инертех“ (Россия) [10], предназначенная для измерения углов, образованных плоскими поверхностями объектов (рис. 2). Основные технические и метрологические характеристики данной системы приведены в табл. 1.

Перед началом измерений исследуемую призму I необходимо установить на поворотном предметном столе 2, площадка которого юстируется так, чтобы нормали к граням призмы находились в плоскости падающего луча, а одна из отражающих граней находилась в поле зрения автоколлиматора 3. Перемещением винта регулировки высоты визирную ось автоколлиматора совмещают с геометрическим центром входной грани призмы.

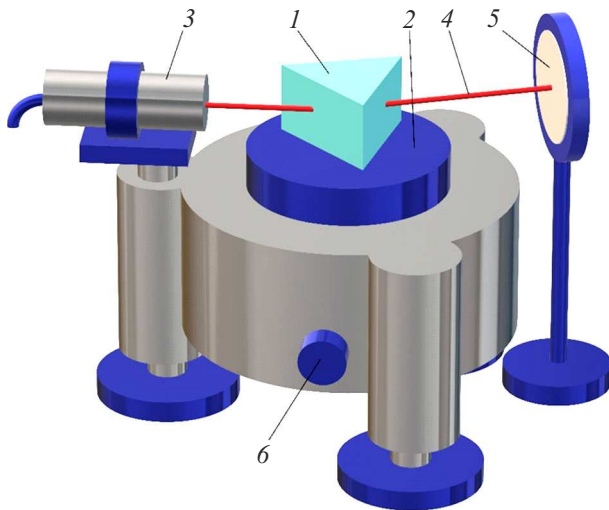


Рис. 2. Гониометрическая система. 1 — призма, 2 — поворотный предметный стол, 3 — автоколлиматор, 4 — луч излучения, 5 — неподвижное зеркало, 6 — ручка вращения стола.

Таблица 1. Основные характеристики гониометрической системы

Название характеристики	Значение
Диапазон измерений углов в горизонтальной плоскости	0–360°
Диапазон показаний углов в вертикальной плоскости	±15′
Пределы допускаемой абсолютной погрешности	±0.25″
Диаметр поворотного стола	100 mm
Габаритные размеры	650 × 380 × 370 mm
Масса	47 kg
Длина волны излучения*	650 nm

Примечание. * Длина волны источника излучения автоколлиматора гониометрической системы в документации не указана, поэтому его спектр был предварительно исследован с помощью мини-спектрометра Hamamatsu C10083CA [13].

Предметный стол может поворачиваться вокруг вертикальной оси с помощью двигателя либо ручки ручного вращения 6. На пути преломленного луча 4 устанавливают неподвижное зеркало 5 под углом ε_1 относительно исходного направления луча, причем $\varepsilon_1 > \varepsilon_{\min}$. Таким образом, при изменении углового положения призмы можно дважды получить изображение автоколлимационной марки для каждой рабочей грани (рис. 3). При этом измеряют углы φ_{11} (рис. 3, а) и φ_{12} (рис. 3, б), соответствующие моментам отражения луча от зеркала при повороте предметного стола для каждой рабочей грани призмы и преломляющих углов α , β и γ .

Так как начальное угловое положение призмы неизвестно, значение φ_{11} можно использовать как начало отсчета, тогда $\varphi_{12} = \varphi_{11} + \Delta\varphi$, где угол $\Delta\varphi$ необходимо измерить. Далее составляем систему уравнений (5)

на основании формулы (1) и свойства суммы углов треугольника:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varphi_{11\alpha} - \alpha + \arcsin \left[n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{11\alpha}}{n} \right) \right) \right], \\ \varepsilon_1 = \varphi_{11\alpha} + \Delta\varphi_\alpha \\ - \alpha + \arcsin \left[n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin(\varphi_{11\alpha} + \Delta\varphi_\alpha)}{n} \right) \right) \right], \\ \varepsilon_1 = \varphi_{11\beta} - \beta + \arcsin \left[n \sin \left(\beta - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{11\beta}}{n} \right) \right) \right], \\ \varepsilon_1 = \varphi_{11\beta} + \Delta\varphi_\beta \\ - \beta + \arcsin \left[n \sin \left(\beta - \arcsin \left(\frac{\sin(\varphi_{11\beta} + \Delta\varphi_\beta)}{n} \right) \right) \right], \\ \varepsilon_1 = \varphi_{11\gamma} - \gamma + \arcsin \left[n \sin \left(\gamma - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{11\gamma}}{n} \right) \right) \right], \\ \varepsilon_1 = \varphi_{11\gamma} + \Delta\varphi_\gamma - \gamma \\ + \arcsin \left[n \sin \left(\gamma - \arcsin \left(\frac{\sin(\varphi_{11\gamma} + \Delta\varphi_\gamma)}{n} \right) \right) \right], \\ \alpha + \beta + \gamma = \pi. \end{cases} \quad (5)$$

В системе из 7 уравнений получается 7 неизвестных — n , α , β , γ , $\varphi_{11\alpha}$, $\varphi_{11\beta}$, $\varphi_{11\gamma}$ и существует однозначное решение, которое можно найти с помощью пакетов математического программного обеспечения. Из решения данной системы уравнений находят значения преломляющих углов, а также относительного показателя преломления материала призмы n .

Так как при проведении измерений призма находится в воздухе, значение абсолютного показателя преломления n_{abs} вычисляют по формуле [11]:

$$n_{\text{abs}} = n n_{\text{air}}, \quad (6)$$

где n_{air} — показатель преломления воздуха, $n_{\text{air}} \approx 1.00027$.

Экспериментальные исследования

Для подтверждения возможности применения предложенного метода было проведено экспериментальное исследование трехгранной призмы, изготовленной компанией Schott AG (Германия) из стекла марки N-BK7. Данная призма была задействована в международных сличениях COOMET.PR-S3 [12] и значение её показателя преломления на различных длинах волн известно с очень высокой точностью.

Для получения результатов измерений углов гониометрическая система подключается к персональному компьютеру с установленным специализированным программным обеспечением GonioScan, предназначенным для настройки режимов работы, вывода на экран автоколлимационной марки и отображения показаний.

В табл. 2 приведены значения, полученные в результате многократных измерений разницы между углами достижения автоколлимации для трех граней призмы. Значение угла отклонения луча ε_1 также было предварительно измерено с помощью вертикального зеркала,

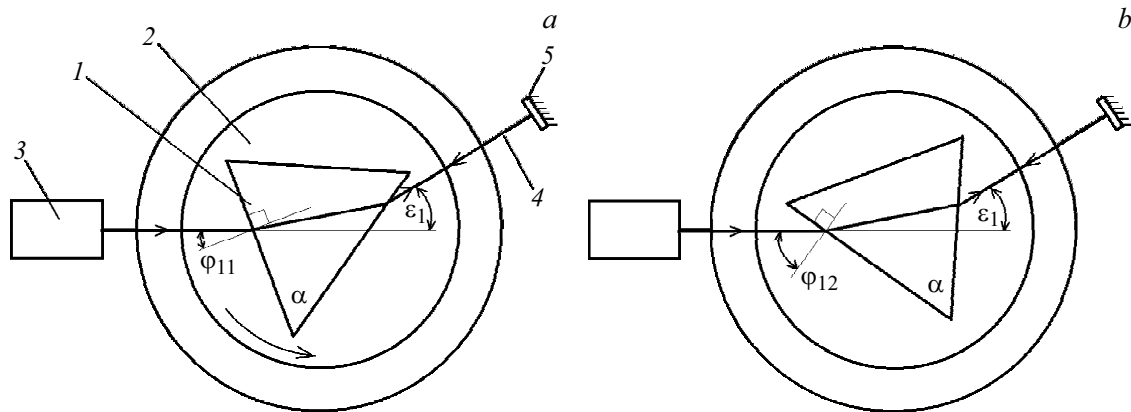


Рис. 3. Схема измерений. 1 — призма, 2 — поворотный предметный стол, 3 — автоколлиматор, 4 — луч излучения, 5 — неподвижное зеркало.

Таблица 2. Результаты измерений угла отклонения и разницы между углами достижения автоколлимации для трех граней призмы из стекла марки N-BK 7 с помощью гониометрической системы

Параметр	Измеренное значение	СКО
ε_1 , rad	0.769094	$1.7 \cdot 10^{-5}$
$\Delta\varphi_\alpha$, rad	0.912044	$5.8 \cdot 10^{-5}$
$\Delta\varphi_\beta$, rad	0.054550	$1.3 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\varphi_\gamma$, rad	0.632308	$5.2 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3. Результаты расчета абсолютного показателя преломления и преломляющих углов для призмы из стекла марки N-BK 7

Параметр	Рассчитанное значение	Номинальное значение	Абсолютная погрешность
n_{abs}	1.515147	1.515082	$6.5 \cdot 10^{-5}$
α , rad	0.958908	0.959008	$-1.0 \cdot 10^{-4}$
β , rad	1.135440	1.135397	$4.2 \cdot 10^{-5}$
γ , rad	1.047245	1.047186	$5.7 \cdot 10^{-5}$

установленного на поворотный стол гониометрической системы.

Отметим, что из-за дисперсионных свойств материала призмы происходит размытие изображения автоколлимационной марки, что затрудняет процесс автоматизации измерений и приводит к увеличению среднего квадратического отклонения (СКО) результатов измерений. Поэтому для снижения случайной погрешности желательно использовать лазерные источники излучения с дискретной длиной волны.

В табл. 3 приведены значения, полученные в результате решения системы (5) с помощью надстройки „Поиск решений“ в Microsoft Excel.

Для оценки абсолютной погрешности измерений было рассчитано номинальное значение показателя преломления исследуемой призмы на длине волны источника излучения автоколлиматора гониометрической системы 650 nm. Для расчета использовалась формула Селлмейера [13]:

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{A_1\lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3\lambda^2}{\lambda^2 - B_3}, \quad (7)$$

где $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ — экспериментально определенные коэффициенты Селлмейера для данной призмы, λ — длина волны в μm .

Таким образом, экспериментально достигнутая погрешность измерений показателя преломления не превышает $6.5 \cdot 10^{-5}$, что подтверждает возможность применения предложенного метода для высокоточных измерений показателя преломления в тех случаях, когда углы призмы неизвестны. Важным достоинством предложенного метода является то, что его можно применять для измерения показателя преломления в УФ и ИК диапазонах. В этом случае вместо неподвижного зеркала необходимо установить приемник излучения, а источник — вместо автоколлиматора, что устраняет необходимость применения светоделительных элементов, ограничивающих спектральный диапазон.

Выводы

Предложенный в работе метод позволяет определить показатель преломления и преломляющие углы призмы по результатам измерений разности углов достижения автоколлимации луча от неподвижного зеркала для трех граней. Данный метод можно применять для трехгранных призм из оптически прозрачных материалов, а также для жидких оптически прозрачных веществ, помещенных в полую трехгранную призму.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.А. Конопелько. *Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях* (Триумф, М., 2020), 208 с. DOI: 10.32986/978-5-907052-08-03-2020-208
- [2] G.N. Vishnyakov, G.G. Levin, S.V. Kornysheva, G.N. Zyuzev, M.B. Lyudomirskii, P.A. Pavlov, Yu.V. Filatov. *J. Optical Technology*, **72** (12), 929–933 (2005). DOI: 10.1364/JOT.72.000929
- [3] L.W. Tilton. *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision* (Classic Reprint). Forgotten Books, 2017.
- [4] Б.В. Иоффе. *Рефрактометрические методы химии* (Химия, Л., 1974).
- [5] ГОСТ 28869-90. Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления.
- [6] ISO 21395-1:2020. Optics and photonics — Test method for refractive index of optical glasses — Part 1: Minimum deviation method.
- [7] G.N. Vishnyakov, G.G. Levin, S.V. Kornysheva. *Measurement Techniques*, **47** (11), 1039–1043 (2004).
- [8] В.Ю. Демчук. Способ измерения показателя преломления оптического стекла. А.с. № 1511647, Кл. G 01 N 21/41, 1987.
- [9] Г.Н. Вишняков, В.Л. Минаев, С.С. Бочкарева. *Измерительная техника*, **5**, 4–9 (2022).
- [10] ООО Инерттех [Электронный ресурс] URL: <http://inerttech-ltd.com/>
- [11] Л. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1973).
- [12] G.N. Vishnyakov, A. Fricke, N.M. Parkhomenko, Y. Hori, M. Pisani. *Metrologia*, **53** (1A), 1–45 (2016). DOI: 10.1088/0026-1394/53/1A/02001
- [13] W. Sellmeier. *Annalen der Physik und Chemie*, **223** (11), 386–403 (1872). DOI: 10.1002/andp.18722231105