

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-XX-XX

УДК 53.082.53; 681.785.24

Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода Литтрова–Аббе

Александр Игоревич Юрин^{1✉}, 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

^{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. Модификация метода Литтрова–Аббе для измерения показателя преломления. **Цель работы.** Расширение возможности реализации прецизионных измерений показателя преломления прозрачных твердых и жидких оптических материалов путем модификации метода Литтрова–Аббе. Модифицированный метод можно применять для объектов в виде трехгранных призм, изготовленных из исследуемого материала либо заполняемых исследуемым веществом. **Метод.** Для измерения показателя преломления трехгранных призм часто используют метод автоколлимации (метод Литтрова–Аббе). В этом случае добиваются совпадения направлений падающего луча и отраженного от выходной грани. Предложена модификация данного метода, позволяющая применять призмы с большими преломляющими углами. **Основные результаты.** Приведены результаты измерений показателя преломления двух трехгранных призм, изготовленных из различных марок стекла — N-BK7 и SF-1 с помощью предложенного метода на 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 гониометрической системы, что доказывает перспективу применения подобного метода для высокоточных измерений показателя преломления. **Практическая значимость.** Предложенный в статье метод измерения показателя преломления можно применять для трехгранных призм из оптически прозрачных материалов с различными преломляющими углами в тех случаях, когда применение метода Литтрова–Аббе невозможно из-за явления полного внутреннего отражения. Метод также можно использовать для жидких оптически прозрачных веществ, помещенных в полую трехгранную призму.

Ключевые слова: гониометр, показатель преломления, рефрактометрия, метод Литтрова–Аббе

Ссылка для цитирования: 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. XX–XX. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-XX-XX

Коды OCIS: 120.4640, 120.3930

ВВЕДЕНИЕ

Показатель преломления вещества зависит от многих параметров — его агрегатного состояния, химического состава компонентов, дли-

ны волны света, температуры и др. Важным направлением оптико-физических измерений является рефрактометрия — измерение значения показателя преломления, позволяющее

определять состав материалов, концентрацию компонентов в растворах, качество оптических деталей и др. [1].

Для измерения показателя преломления широко используют гониометрические методы, основанные на измерении углов отклонения света, проходящего через образец. Эти методы могут применяться как для твердых тел, так и для жидкостей и газов. В качестве образцов чаще всего используют трехгранные призмы, изготовленные из исследуемого материала либо заполняемые исследуемым веществом. Для измерения углов призмы обычно используют специальные приборы — гониометры [2].

Известны различные методы измерения показателя преломления для трехгранных призм, в том числе хорошо изученный метод наименьшего отклонения [3]. Другим широко распространенным методом является метод автоколлимации (метод Литтрова–Аббе, рис. 1а) [4]. В этом случае добиваются совпадения направлений падающего луча и отраженного от выходной грани, а показатель преломления n определяют по формуле

$$n = \sin \varphi / \sin \alpha, \quad (1)$$

где φ — угол падения, α — угол между рабочими гранями призмы.

Однако такой метод можно использовать только для призм с относительно небольшим углом между рабочими гранями (преломляющим углом призмы α) поскольку с его увеличением возрастает необходимый для автоколлимации угол падения φ (рис. 1б), который составляет $\pi/2$ в случае достижения угла полного внутреннего отражения (рис. 1в) [5].

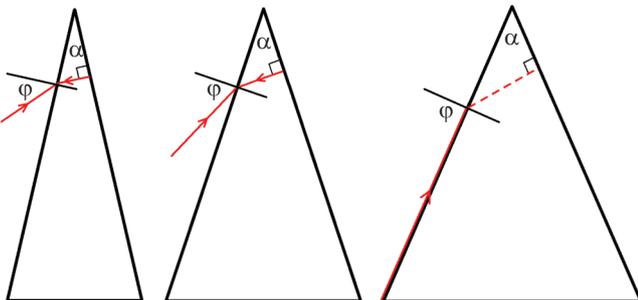


Рис. 1. Ход луча в методе Литтрова–Аббе при увеличении преломляющего угла. Пояснения в тексте

Например, для призмы с $n = 1,7$ максимальное возможное значение α составляет около 36° .

Метод Литтрова–Аббе прост в реализации, его удобно применять для измерения дисперсии и температурных коэффициентов [6], однако большинство мер показателя преломления, выполненных в виде трехгранных призм, имеют достаточно большие преломляющие углы, близкие к $\pi/3$, что ограничивает применение данного метода.

Цель данной работы — описание нового способа измерения показателя преломления трехгранных призм с большими преломляющими углами, основанного на модифицированном методе Литтрова–Аббе. Способ был реализован с помощью гониометрической системы, предназначенной для измерения углов многогранных призм.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД

Рассмотрим суть предложенной модификации метода измерения показателя преломления трехгранной призмы. В предложенном методе автоколлимация происходит после отражения луча от противоположной грани. Пусть α , β и γ — преломляющие углы призмы, φ и ψ — углы падения и преломления на первой (входной) грани призмы (рис. 2).

Если обозначить углы падения и отражения на второй грани призмы как δ , то исходя из основных свойств треугольника получим

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

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

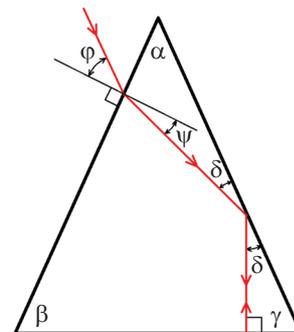


Рис. 2. Автоколлимация луча после отражения от противоположной грани. Пояснения в тексте

Из выражений (2) и (3) можно найти угол преломления ψ

$$\psi = \gamma - \alpha. \quad (4)$$

Тогда относительный показатель преломления призмы согласно закону Снелла [7] определяется как

$$n = \sin \varphi / \sin(\gamma - \alpha). \quad (5)$$

Отметим, что подобный метод нельзя использовать при равенстве преломляющего и противоположного углов, т.е. для призм с $\alpha = \gamma$.

Таким образом, суть модификации метода Литтрова–Аббе, предложенной в данной работе, состоит в следующем. Для определения показателя преломления выполняют следующие операции:

1. Проводят измерение преломляющих углов призмы α , β и γ .

2. Измеряют углы $\varphi_{\alpha\gamma}$, $\varphi_{\alpha\beta}$, $\varphi_{\beta\alpha}$, $\varphi_{\beta\gamma}$, $\varphi_{\gamma\alpha}$, $\varphi_{\gamma\beta}$, при которых достигается автоколлимация после отражения от противоположной грани.

3. Рассчитывают значения n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_5 , n_6 по формуле (5) для соответствующих граней.

4. Определяют относительный показатель преломления призмы n_{meas} как среднее арифметическое из полученных значений

$$n_{\text{meas}} = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6) / 6. \quad (6)$$

Значение абсолютного показателя преломления n_{abs} вычисляется по формуле [2]

$$n_{\text{abs}} = n_{\text{meas}} n_{\text{air}} - \beta(t - 20), \quad (7)$$

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

Для определения n_{air} можно применить формулы Эдлена [8] или Сиддора [9], либо использовать справочные данные [6].

Таким образом, применение модифицированного метода позволяет использовать призмы с большими преломляющими углами, чем это возможно в методе Литтрова–Аббе.

ПРИМЕНЕНИЕ ГОНИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

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

Исследуемая призма устанавливается на поворотном столике, площадка которого юстируется так, чтобы нормали к граням призмы находились в плоскости падающего луча, а одна из отражающих граней находилась в поле зрения автоколлиматора. Столик с призмой может поворачиваться вокруг вертикальной оси с помощью двигателя либо ручки ручного вращения. Перемещением винта регулировки высоты визирную ось автоколлиматора совмещают с геометрическим центром отражающей грани призмы. С помощью автоколлиматора измеряют углы между гранями (α , β , γ) и углы достижения автоколлимации после отражения луча от противоположной грани ($\varphi_{\alpha\gamma}$, $\varphi_{\alpha\beta}$, $\varphi_{\beta\alpha}$, $\varphi_{\beta\gamma}$, $\varphi_{\gamma\alpha}$, $\varphi_{\gamma\beta}$), значения которых фиксируются датчиком угла. Значения углов вычисляются по разности показаний на измеряемых гранях. Для получения показаний используется компьютер с установленным специализированным программным обеспечением GonioScan, предназначенным

Таблица 1. Основные технические и метрологические характеристики гониометрической системы

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений углов в горизонтальной плоскости, градусы	0–360
Диапазон показаний углов в вертикальной плоскости, угловые минуты	±15
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений углов, угловые секунды	±0,25
Диаметр поворотного столика, мм	100
Габаритные размеры, мм	650×380×370
Масса, кг	47

для настройки гониометрической системы, вывода на экран автоколлимационной марки в реальном времени и измерения углов в ручном или автоматизированном режимах.

Стоит отметить, что от выходной грани отражается очень малая часть излучения, поэтому для измерения углов $\varphi_{\alpha\gamma}$, $\varphi_{\alpha\beta}$, $\varphi_{\beta\alpha}$, $\varphi_{\beta\gamma}$, $\varphi_{\gamma\alpha}$, $\varphi_{\gamma\beta}$ необходимы ручная корректировка идентификации автоколлимационной марки и настройка усиления сигнала камеры автоколлиматора.

Измерения преломляющих углов выполнялись с помощью гониометрической системы в автоматическом режиме, а углов автоколлимации — в ручном режиме, каждый угол измерялся трехкратно с усреднением результатов. В качестве объектов исследования использован комплект мер показателя преломления [11], состоящий из трехгранных призм, изготовленных из стекол оптических бесцветных различных марок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 2 приведены результаты измерений преломляющих углов двух трехгранных призм, изготовленных компанией *Schott AG* (Германия) из стекол различных марок – N-BK7 и SF-1. Данные призмы участвовали в международных сличениях [12] и значение их показателя преломления на различных длинах волн известно с высокой точностью.

Спектр источника излучения автоколлиматора гониометрической системы, полученный с помощью мини-спектрометра *Hamamatsu C10083CA* [13], имеет максимум на длине волны 653 нм.

В табл. 3 и 4 приведены результаты измерений углов автоколлимации после отражения от противоположной грани трех разных граней призм, по значениям которых вычислен относительной показатель преломления.

Среднее значение n_{meas} для первой и второй призмы составило 1,514491 и 1,710434 соот-

Таблица 2. Результаты измерений преломляющих углов трехгранных призм из стекол различных марок

Марка стекла	α , град	β , град	γ , град
N-BK7	54° 56' 49,5"	65° 03' 12,6"	59° 59' 57,9"
SF-1	52° 57' 56,9"	67° 02' 06,8"	59° 59' 56,3"

Таблица 3. Результаты измерений углов автоколлимации после отражения от противоположной грани для призмы из стекла N-BK7

Угол	φ , рад	n
$\varphi_{\alpha\beta}$	0,268980787	1,514441
$\varphi_{\alpha\gamma}$	0,133781669	1,514584
$\varphi_{\beta\gamma}$	0,133826417	1,514575
$\varphi_{\gamma\alpha}$	0,133767221	1,514422
$\varphi_{\beta\alpha}$	0,269006386	1,514582
$\varphi_{\gamma\beta}$	0,133805865	1,514344

Таблица 4. Результаты измерений углов автоколлимации после отражения от противоположной грани призмы из стекла SF-1

Угол	φ , рад	n
$\varphi_{\alpha\beta}$	0,428772565	1,710238
$\varphi_{\alpha\gamma}$	0,210979182	1,710312
$\varphi_{\beta\gamma}$	0,211068484	1,710279
$\varphi_{\gamma\alpha}$	0,211002259	1,710496
$\varphi_{\beta\alpha}$	0,428802623	1,710351
$\varphi_{\gamma\beta}$	0,211087877	1,710434

ветственно, абсолютная погрешность измерений Δn при этом не превышает $1,5 \times 10^{-4}$ при сравнении с номинальным значением на длине волны 653 нм, что является очень хорошим результатом и доказывает перспективу применения предложенного метода для высокоточных измерений показателя преломления.

Воспроизводимость результатов измерений можно оценить по среднему квадратическому отклонению, которое составляет менее $1,0 \times 10^{-4}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье модифицированный метод измерения показателя преломления можно применять для трехгранных призм из оптически прозрачных материалов с различными преломляющими углами в тех случаях, когда применение метода Литтрова–Аббе невозможно из-за явления полного внутреннего отражения. Метод также можно использовать для жидких оптически прозрачных веществ, помещенных в полую трехгранную 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. 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.
3. 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 // JOT. 2005. V. 72. Iss. 12. P. 929–933. <https://doi.org/10.1364/JOT.72.000929>
4. 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.
5. Tilton L.W. Prism refractometry and certain goniometrical requirements for precision (Classic Reprint). Forgotten Books, 2017. <https://doi.org/10.6028/jres.002.030>
6. Лейкин М.В., Молочников Б.И., Морозов В.Н., Шакарян Э.С. Отражательная рефрактометрия. Л.: Машиностроение, 1983. 223 с.
7. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974. 343 с.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 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. Ciddór P.E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared // Appl. Opt. 1996. V. 35. Iss. 9. P. 1566–1573. <https://doi.org/10.1364/AO.35.001566>
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.
13. Vishnyakov G.N., Levin G.G., Kornysheva S.V. The state primary standard for the unit of refractive index // Measurement Techniques. 2004. V. 47. № 11. P. 1039–1043. <https://doi.org/10.1007/s11018-004-0001-0>
14. 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>
15. Электронный ресурс URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/spectrometers/mini-spectrometer/C10083CA.html> (Компания Hamamatsu Photonics К.К. / Каталог продукции).

АВТОРЫ

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

Геннадий Николаевич Вишняков — доктор технических наук, начальник лаборатории, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, 119361, Россия; Scopus ID 7003644474; <https://orcid.org/0000-0003-0237-47381>; vish@vniiofi.ru

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

AUTHORS

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

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

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