

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ГОНИОМЕТРЕ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

© 2005 г. **Г. Н. Вишняков***, доктор техн. наук; **Г. Г. Левин***, доктор техн. наук; **С. В. Корнышева***,
Г. Н. Зюзев**; **М. Б. Людомирский****; **П. А. Павлов*****, канд. физ.-мат. наук;
Ю. В. Филатов***, доктор техн. наук

* ВНИИ оптико-физических измерений, Москва
E-mail: vish@vniiofi.ru

** Учебно-методический центр “Диагностика”, Москва
E-mail: diagopt@aha.ru

*** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
Санкт-Петербург
E-mail: YVFilatov@mail.eltech.ru

Гониометры с кольцевыми лазерами и другие автоматизированные гониометры работают в динамическом режиме, т. е. при непрерывно вращающемся предметном столе с призмой. Статья посвящена новому способу измерения показателя преломления материалов на динамическом гониометре по методу наименьшего отклонения. Материальным носителем единицы показателя преломления является образец в виде трехгранной призмы или жидкость, помещенная в кювету в виде полый трехгранной призмы. Приведена принципиальная оптическая схема метода измерений и рассмотрены его метрологические характеристики. Предложенный способ измерений реализован в Государственном первичном эталоне единицы показателя преломления.

Коды OCIS: 120.3930, 120.5710.

Поступила в редакцию 23.03.2005.

Введение

Гониометры предназначены в первую очередь для измерения углов, например плоских углов при вершинах многогранных призм. Однако гониометры также широко используются и для высокоточных измерений показателя преломления твердых и жидких веществ. Для этого были разработаны специальные методы, которые в рефрактометрии известны как методы призмы [1]: автоколлимации, наименьшего отклонения и постоянных отклонений. Наивысшая точность измерений достигается при использовании метода наименьших отклонений (МНО) [2].

Наиболее распространены визуальные гониометры, в которых в качестве датчика угла используется лимб с угловыми делениями. Для высокоточных измерений показателя преломления (с точностью до 6-го знака) требуется хорошая термостабилизация измерительного объема. Поэтому присутствие оператора и/или любых других тепловыделяющих элементов в непосредственной близости к гониометру недопустимо. Следовательно, измерения должны быть дистанционными и автоматизированными. По этой причине визуальные (ручные) гониометры не пригодны для таких измерений.

Наивысшей точностью и возможностью автоматизации измерений обладает гониометр с кольцевым лазером. Именно такой лазер создает угловую

шкалу, точность которой определяется длиной волны лазерного излучения [3–6]. Однако в отличие от обычных гониометров с этим прибором все измерения проводятся в динамическом режиме при непрерывном вращении предметного стола. Поэтому простой перенос методов измерений, хорошо разработанных для визуальных гониометров, на такие динамические гониометры невозможен. Отсюда возникает необходимость разработки новых способов измерений показателя преломления с помощью динамических гониометров.

Ранее в работах ЦКБ “Арсенал” были предложены несколько вариантов использования динамического гониометра-спектрометра ГС-1Л для измерения показателя преломления многогранной призмы [7, 8]. Основным недостатком схем измерения, предложенных в этих работах, состоит в том, что в них используется излучение, отраженное как от грани призмы (около 4%), так и от автоколлимационного зеркала (около 100%). Поэтому интенсивности отраженных излучений сильно различаются, и выходные сигналы с фотоэлектрического автоколлиматора будут разными по амплитуде, что создает большие трудности при их дальнейшей обработке и сказывается на точности измерений.

Цель настоящей работы – описание нового способа измерения показателя преломления с использованием динамического гониометра в автоматическом режиме. Способ основан на модифицирован-

ном МНО. Приведена принципиальная оптическая схема способа измерений и рассмотрены его метрологические характеристики.

Модифицированный метод наименьших отклонений

Суть метода наименьших отклонений заключается в нахождении наименьшего угла отклонения луча, прошедшего через призму. Вначале определим, как угол отклонения зависит от угла падения луча на рабочую грань призмы. Рассмотрим ход луча в призме (рис. 1). Используя закон преломления и геометрические соотношения, можно записать следующую систему уравнений [1]:

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_1 &= n \sin \psi_1, \\ \sin \varphi_2 &= n \sin \psi_2, \\ \psi_1 + \psi_2 &= \alpha, \\ \varphi_1 + \varphi_2 &= \varepsilon + \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где n – относительный показатель преломления призмы; α – преломляющий угол призмы; φ_1, ψ_1 – углы падения и преломления на первой грани призмы; φ_2, ψ_2 – углы падения и преломления на второй грани призмы, ε – искомый угол отклонения падающего луча от своего первоначального направления. Исключив из этой системы уравнений φ_2, ψ_2 , получим решение в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi_1) &= \\ &= \varphi_1 - \alpha + \arcsin \left[n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\sin \varphi_1 / n \right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 2 приведен график зависимости угла отклонения ε от угла падения луча φ_1 . Угол наименьшего отклонения находится как минимум функции (2) по углу падения φ_1 :

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

Отсюда следует известная формула для вычисления показателя преломления по методу наименьших отклонений [1]:

$$n = \sin((\alpha + \varepsilon_{\min})/2) / \sin(\alpha/2). \quad (4)$$

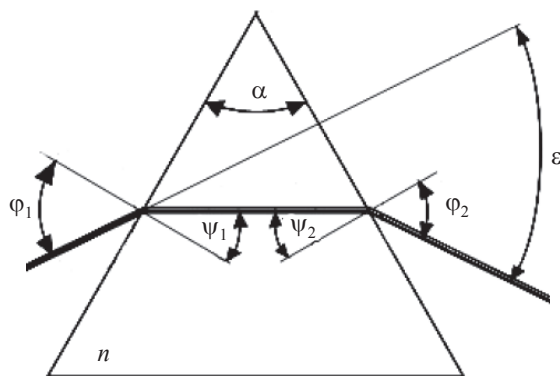


Рис. 1. Преломление луча на гранях призмы.

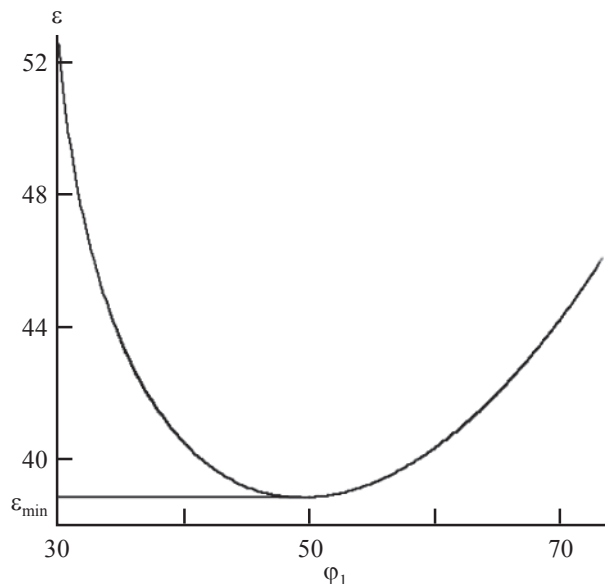


Рис. 2. График зависимости угла отклонения от угла падения луча на грань призмы.

Из графика на рис. 2 видно, что при увеличении угла падения φ_1 угол отклонения ε вначале уменьшается, а после прохождения минимума растет. Именно на таком поведении угла отклонения луча, прошедшего через призму, и основана методика измерения угла наименьшего отклонения с визуальным гониометром [1, 2]. Оператор последовательно поворачивает призму относительно неподвижного луча, тем самым увеличивая угол падения луча на первую рабочую грань призмы, и наблюдает в окуляр зрительной трубы гониометра луч света, прошедший через призму. Смена направления смещения луча происходит при достижении угла наименьшего отклонения. Этот момент зрительно фиксирует оператор и проводит отсчет угла по лимбу гониометра. Как видно, описанный способ измерения угла наименьшего отклонения является интерактивным и поэтому его автоматизация не представляется возможным.

Суть модификации МНО, которая предлагается в настоящей работе, состоит в следующем. Для нахождения угла наименьшего отклонения $\varepsilon_{\min}$ в автоматическом режиме выполняется следующая последовательность операций:

1. Проводится серия автоматических измерений угла отклонения ε при различных угловых положениях призмы относительно неподвижного луча, т. е. при разных углах падения φ_1 .
2. Строится экспериментальная зависимость $\varepsilon(\varphi_1)$.
3. Полученная зависимость аппроксимируется полиномом, по которому с помощью численного метода находится $\varepsilon_{\min}$.

Оператор из такой схемы измерений исключен, поэтому измерения можно проводить в автоматическом режиме.

Были проведены исследования влияния степени полинома на точность аппроксимации. Эти исследования показали, что полиномы третьей и более высоких степеней лишь детализируют аппроксимирующую функцию. В результате увеличивается погрешность определения значения величины $\varepsilon_{\min}$. Зависимость $\varepsilon(\varphi_1)$ измеряется вблизи ее минимума в малом диапазоне углов $\pm 30''$. Известно, что при разложении любой функции в ряд Маклорена вблизи ее минимума после постоянного члена сразу следует слагаемое, зависящее от квадрата аргумента функции. Поэтому были выбраны полиномы второй степени. По результатам численного моделирования было получено, что погрешность определения угла наименьшего отклонения $\varepsilon_{\min}$ составляет $0,03''$.

Измерение угла наименьшего отклонения с помощью динамического гониометра

Схема реализации метода наименьших отклонений приведена на рис. 3. Схема включает в себя следующие основные оптические элементы и устройства.

В качестве нуля-индикатора 1 используется интерференционный или фотоэлектрический автоколлиматор. Он необходим для угловой привязки всех отражающих элементов схемы. Нуль-индикатор 1 формирует и направляет на призму плоский пучок монохроматического света, а затем вырабатывает электрический сигнал в тот момент времени, когда отраженный назад световой пучок распространяется строго по направлению освещающего пучка света.

На непрерывно вращающейся платформе 7, связанной с кольцевым лазером, установлены два зеркала 2 и 6. Плоское зеркало 2 расположено под углом 45° к освещающему пучку и плоскости платформы.

Основным элементом этой схемы является плоское двустороннее зеркало 6. Отражающие поверх-

ности зеркала 6 перпендикулярны к освещающему пучку и плоскости платформы.

На поворотном столе 5 установлены трехгранная призма 4 и плоские зеркала 3. Этот стол механически не связан с вращающейся платформой 7. С помощью стола 5 выполняется дискретный поворот призмы для изменения угла падения освещающего пучка света на ее первую рабочую грань. Зеркала 3 жестко связаны со столом 5 и служат для измерения относительного угла поворота призмы 4.

Рассмотрим принцип работы такой схемы в динамике.

При включении гониометра начинается непрерывное вращение платформы 7 с зеркалами 2 и 6. Поворотный стол 5 с призмой неподвижен. Первый сигнал автоколлимации с нуля-индикатора возникает при отражении луча от внешней по отношению к оси вращения зеркальной поверхности двустороннего зеркала (рис. 3а). Он задает начало отсчета угловых измерений. Второй сигнал возникает от луча, прошедшего через призму и отраженного назад от внутренней поверхности зеркала 6 (рис. 3б). По этому сигналу определяется первоначальный угол отклонения луча ε_0 по отношению к падающему лучу. Третий сигнал с нуля-индикатора возникает при отражении назад падающего луча системой зеркал 2, 3 (рис. 3в). Данный сигнал задает некоторое начальное угловое положение призмы φ_0 относительно падающего пучка, но этот угол не совпадает с углом падения луча на рабочую грань призмы. Таким образом, за один оборот вращающейся платформы 7 автоматически измеряются три угла. Обычно один цикл таких измерений проводится за 16 оборотов, по которому происходит усреднение данных.

Далее с помощью шагового двигателя дискретно поворачивают поворотный стол 5, вследствие чего призма 4 и система зеркал 3 занимают новые угловые положения и изменяется угол падения луча

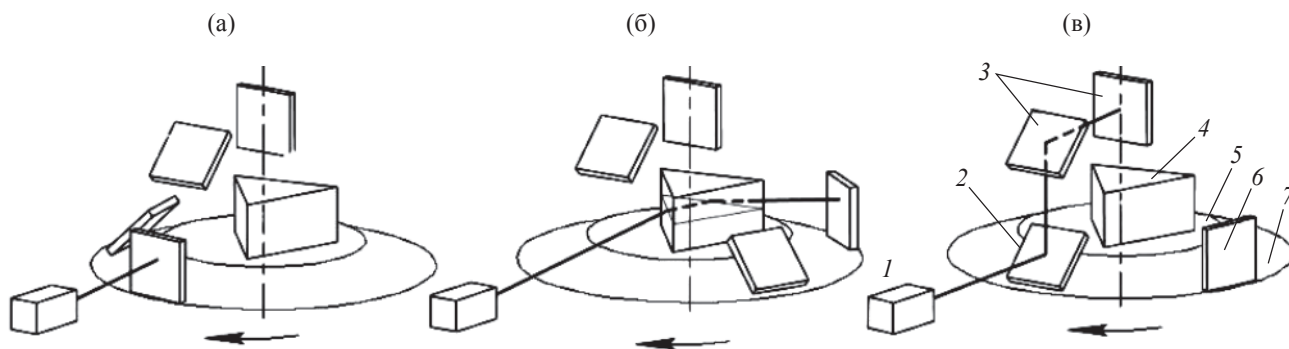


Рис. 3. Схема измерения угла отклонения. 1 – нуль-индикатор; 2, 3 – зеркала, 4 – трехгранная призма, 5 – поворотный стол, 6 – двустороннее зеркало, 7 – вращающаяся платформа. а – первый автоколлимационный сигнал от внешней поверхности двустороннего зеркала 6. б – второй автоколлимационный сигнал от внутренней поверхности двустороннего зеркала 6. в – третий автоколлимационный сигнал от системы зеркал 2, 3.

на рабочую грань призмы на некоторую величину $\Delta\varphi_{10}$. Повторяют весь цикл измерений, описанный выше. Получают новые значения угла отклонения луча призмой ε_1 и углового положения призмы φ_1 относительно падающего луча. Величина угла $\Delta\varphi_{10}$, на который повернулась призма относительно своего первоначального положения, определяется как разность между измеренными угловыми положениями зеркала 3, т. е. $\Delta\varphi_{10} = \varphi_1 - \varphi_0$.

Повторяют измерения неоднократно. Число измерений определяет количество точек на кривой экспериментальной зависимости $\varepsilon(\varphi_1)$. Обычно достаточно 6–12 измерений вблизи угла наименьшего отклонения.

Из описанного принципа работы видно, что все сигналы с нуля-индикатора возникают от излучения, отраженного от зеркальных покрытий зеркал. Коэффициент отражения этих зеркал близок к 100%. В данной схеме измерения угла наименьшего отклонения не используются сигналы от излучения, отраженного от непокрытых граней призмы. Поэтому все сигналы будут одинаковой амплитуды, что позволяет повысить точность измерений.

Источники погрешности

Погрешность измерения показателя преломления по МНО зависит от многих факторов, в первую очередь от погрешности измерения углов призм и углов преломления на гониометре с кольцевым лазером. Среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов измерений углов на динамическом гониометре не превышает $S_\alpha = 0,03''$, неисключенная систематическая погрешность (НСП) измерения углов на гониометре составляет $\Delta\alpha = 0,2''$ [6, 9].

Дополнительные погрешности возникают из-за качества изготовления призм и других оптических элементов. Так, величина преломляющего угла призмы зависит от неплоскостности ее рабочих граней и пирамидальности [10]. Клиновидность подложки двустороннего зеркала 6 (рис. 3) может также приводить к дополнительной погрешности измерений, если не принять меры к учету и компенсации этой клиновидности.

Ошибка пирамидальности заключается в перпендикулярности рабочих граней относительно основания призмы. В результате луч, отраженный от грани, отклоняется относительно оптической оси коллиматора в вертикальном направлении, что приводит к виньетированию отраженного пучка и влияет на его интенсивность. Как показали исследования, с увеличением показателя преломления влияние пирамидальности граней призмы на точность измерения уменьшается. В эталонной установке пирамидальность призм не должна превышать $1''$.

Наличие неплоскостности рабочих граней призмы приводит к тому, что преломляющий угол призмы будет отличен от номинального значения. Вследствие этого угол отклонения также будет отличаться от расчетного значения. Исследования влияния неплоскостности показали, что отклонение, равное $\lambda/20$, приводит к изменению угла на $0,04''$. Поэтому к качеству изготовления призм предъявлены следующие требования: допуск на плоскостность граней $\lambda/20$, допуск на пирамидальность граней $1''$.

На точность измерения угла отклонения луча влияет также качество изготовления двустороннего зеркала, а именно такой дефект, как клиновидность подложки. Однако эту клиновидность можно измерить на динамическом гониометре и внести соответствующие поправки.

Для измерения угла клина подложки двустороннего зеркала из схемы измерения (рис. 3) исключают все элементы, кроме самого зеркала 6. Таким образом, нуля-индикатор фиксирует два сигнала: первый сигнал в момент, когда луч отражается от наружной поверхности зеркала, второй сигнал в момент, когда луч отражается от внутренней поверхности зеркала. В идеальном случае измеренный угол должен составлять 180° , но из-за клиновидности подложки он отличен от теоретического значения на величину, равную углу клина ξ .

В зависимости от ориентации зеркала, имеющего клиновидность, относительно луча измеренный угол $\varphi_{\text{изм}}$ или превысит истинное значение $\varphi_{\text{ист}}$ или будет меньше истинного значения. Поэтому при вычислении угла отклонения ε необходимо вносить поправку:

$$\varepsilon = 180^\circ - (\varphi_{\text{изм}} \pm \xi). \quad (5)$$

Существенное влияние на точность определения показателя преломления оказывают погрешности измерения температуры, давления воздуха в измерительном объеме, а также температуры трехгранной призмы. Для измерения температуры воздуха и температуры материала призмы используются прецизионные температурные датчики, позволяющие проводить измерения с СКО, равным $0,002^\circ\text{C}$, и НСП – $0,002^\circ\text{C}$. Для измерения атмосферного давления используется барометр-анероид, СКО измерения составляет $0,10\text{ кПа}$, НСП – $0,05\text{ кПа}$.

Гониометр был размещен на антивибрационном столе. Все измерения проводились в термостабилизированной камере при температуре, близкой к 20°C .

Экспериментальные результаты

Опробование предложенного метода и исследование его метрологических характеристик проводились на основе измерений показателя преломления эталонных мер в виде стеклянных трехгранных призм на

длине волны 0,6328 мкм. Призмы были изготовлены из трех марок стекла: К8, ТК21, ТФ3. Качество изготовления призм соответствует государственному стандарту на измерение показателя преломления посредством гониометра по МНУ. Дополнительные требования к рабочим граням призм приведены ниже.

Измерение углов преломления проводилось на гониометре с кольцевым лазером. Основу такого гониометра составляет лазерный гироскоп, разработанный и созданный в УМЦ “Диагностика” (Москва). Сам гониометр разработан в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” [6, 9, 11].

В настоящей работе приведены результаты измерений эталонной призмы из стекла К8, хотя измерения проводились и для двух других марок стекла. Вначале на динамическом гониометре по обычной методике были измерены значения трех преломляющих углов призмы. Призма устанавливалась на вращающуюся платформу гониометра. Сигналы автоколлимации возникали при отражении от трех граней призмы. Каждый преломляющий угол призмы измерялся и усреднялся за 16 оборотов платформы гониометра. После этого призма поворачивалась относительно оси вращения платформы и измерения повторялись. Измеренные значения преломляющих углов призмы усреднялись.

Далее для каждого преломляющего угла призмы была проведена серия измерений углов отклонения ε при различных углах φ_1 падения луча на первую рабочую грань призмы по схеме, представленной на рис. 3. Каждый угол отклонения измерялся за 16 оборотов вращающейся платформы гониометра. СКО и НСП результатов измерений угла отклоне-

ния ε такие же, как и для преломляющего угла призмы α . Измерения были проведены при 12 различных значениях угла φ_1 вблизи угла наименьшего отклонения. Шаг по углу φ_1 составил 2,6°. По полученным экспериментальным точкам зависимость $\varepsilon(\varphi_1)$ была аппроксимирована полиномом второй степени, по которому находилось значение $\varepsilon_{\min}$.

Полученные данные использовались для вычисления абсолютного значения показателя преломления призмы, приведенного к нормальным стандартным условиям измерений.

На первом этапе по формуле (4) определялся показатель преломления стекла призмы относительно окружающей среды (воздуха) – так называемый относительный показатель преломления – при той температуре призмы и окружающего воздуха, которая поддерживалась в процессе измерений. Поправки на температурный коэффициент показателя преломления меры и показатель преломления воздуха будут приведены ниже.

На втором этапе проводится вычисление абсолютного значения показателя преломления призмы и одновременно пересчет его к нормальным условиям измерений по следующей формуле:

$$n_{\text{абс}} = n(t)N_{\text{возд}}(t_{\text{возд}}, p, f) - \beta_{\text{абс}}(t - 20), \quad (6)$$

где $n(t)$ – относительный показатель преломления призмы при температуре t , $\beta_{\text{абс}}$ – температурный коэффициент показателя преломления материала призмы, $N_{\text{возд}}(t_{\text{возд}}, p, f)$ – значение показателя преломления воздуха при условиях измерения и температуре $t_{\text{возд}}$. Для вычисления показателя преломления воздуха мы используем формулу Эдлена [12]

$$\begin{aligned} & (N_{\text{возд}}(t_{\text{возд}}, p, f) - 1)10^8 = \\ & = \left[8342,13 + \frac{2406030}{(130 - k_0^2)} + \frac{15997}{38,9 - k_0^2} \right] \frac{p}{96,0955} \left[\frac{1 + p(6,13 - 0,1t_{\text{возд}})10^{-6}}{1 + 0,003661t_{\text{возд}}} \right] - f[42,92 - 0,343k_0^2], \end{aligned} \quad (7)$$

где p – давление воздуха (кПа), $t_{\text{возд}}$ – температура воздуха (°C), f – парциальное давление водяного пара (кПа), k_0 – волновое число в вакууме, равное $1/\lambda$ (мкм⁻¹).

В таблице приведены численные значения углов наименьшего отклонения для всех трех преломляющих углов призмы, а также вычисленные значения показателя преломления материала призмы (стекла К8). Измерения проводились в разное время в течение трех месяцев.

После статистической обработки данных из таблицы было получено значение показателя преломления призмы из стекла К8 на длине волны He-Не лазера 0,6328 мкм $n_{\text{абс}} = 1,515197$.

СКО результата измерений не превышает 10^{-6} при 50 независимых измерениях, а НСП не превышает 2×10^{-6} . Стандартная неопределенность, оцененная по типу А, равна 10^{-6} , оцененная по типу В $1,2 \times 10^{-6}$, суммарная стандартная неопределенность $1,5 \times 10^{-6}$, расширенная неопределенность $3,9 \times 10^{-6}$.

α	$\varepsilon_{\min}$	$n_{\text{абс}}$	$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$t, ^\circ\text{C}$
60°00'12,32"	38°29'02,07"	1,515196	20,5	99,3	21,5
	38°28'01,83"	1,515197	20,1	99,3	21,1
	38°29'04,03"	1,515199	21,2	98,5	21,0
	38°29'03,54"	1,515197	21,5	98,5	20,9
	38°29'04,22"	1,515199	21,6	98,5	21,3
	38°29'03,55"	1,515198	20,4	98,1	20,5
	38°29'03,86"	1,515198	20,9	98,1	20,9
59°59'47,69"	38°28'38,59"	1,515193	22,9	99,3	23,9
	38°29'36,61"	1,515195	20,3	99,3	21,3
	38°28'35,61"	1,515196	19,0	99,3	20,0
59°59'59,99"	38°28'51,88"	1,515196	22,9	99,3	23,9
	38°28'49,36"	1,515197	19,8	99,3	20,8
	38°28'49,33"	1,515199	19,2	99,3	20,2

Из таблицы видно, что несмотря на значительные изменения во времени параметров (температуры, давления) окружающей среды, воспроизводимость результатов измерений абсолютного значения показателя преломления хорошая. Воспроизводимость результатов измерений характеризуется СКО, которая составила $1,5 \times 10^{-6}$.

Заключение

Описанный в данной статье метод измерения показателя преломления реализован в Государственном первичном эталоне единицы показателя преломления ГЭТ 138-2003 [13]. Эталон предназначен для хранения, воспроизведения и передачи размера единицы показателя преломления твердых, жидких и газообразных веществ. Для жидких веществ используется полая трехгранная призма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы в химии. Л.: Химия, 1974. 343 с.
2. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Высшая школа, 1981. 255 с.
3. Vishnyakov G.N., Levin G.G., Ziouzev G.N., Lioudomirski M.B., Pavlov P.A., Filatov Yu.V. Standard refractometric complex based on dynamic laser goniometer // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 150–154.
4. Зайцев И.И., Хачатурян А.Г. Автоматизированный гониометр // Патент Франции № 1511089, кл. G 01 C, 1962.
5. Виноградов Э.Ф., Демчук В.Ю., Зайцев И.И., Зозуля Л.Г., Камелин А.Б., Тетера В.П. Автоматический гониометр-спектрометр // А. с. № 1427173, 1986.
6. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Probst R. Dynamic angle measurement of a ring laser // Metrologia. 1997. V. 34. P. 343–351.
7. Демчук В.Ю., Зайцев И.И. Способ измерения показателя преломления оптического стекла // Патент Франции № 2057307, Кл. G 01 N 21/41, 1969.
8. Демчук В.Ю. Способ измерения показателя преломления оптического стекла // А. с. № 1511647, Кл. G 01 N 21/41, 1987.
9. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Pavlov P.A., Burnashev M.N., Probst R. Dynamic ring laser goniometer // Optical Gyros and their Application. RTO-AG-339. May 1999. P. 12–1.
10. Tentori D., Lerma J.R. Refractometry by minimum deviation: accuracy analysis // Opt. Engin. 1990. V. 29 № 2. P. 160–168.
11. Bakin V.V., Ziouzev G.N., Lioudomirski M.B. Laser gyros with total reflection prisms // Optical Gyros and their Application. RTO-AG-339. May 1999. P. 6–1.
12. Bengt E. The refractive index of air // Metrologia. 1966. V. 2. № 2.
13. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Корнышева С.В. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления // Изм. техника. 2004. № 11. С. 3–6.