

Гониометрические методы измерений показателя преломления

Г. Н. Вишняков^{1,2}, А. И. Юрин^{3,1}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

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

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Рассмотрены гониометрические методы измерений показателя преломления оптически прозрачных материалов. Предложен модифицированный метод, основанный на методе наименьшего отклонения, позволяющий определять показатель преломления трехгранных призм с неизвестными преломляющими углами. В предложенном методе производят измерения углов отклонения света на трех гранях призмы, а показатель преломления материала и преломляющие углы определяют из решения системы уравнений. Приведена оценка влияния погрешности угловых измерений на точность расчета показателя преломления.

Ключевые слова: оптика, показатель преломления, гониометрия

Цитирование: Вишняков, Г. Н. Гониометрические методы измерений показателя преломления / Г. Н. Вишняков, А. И. Юрин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 250–253.

Введение

Показатель преломления (ПП) вещества зависит от его агрегатного состояния, химического состава компонентов, температуры и т.д. Для измерения ПП широко используют гониометрические методы, основанные на измерении углов отклонения света, проходящего через образец - обычно трехгранную призму, изготовленную из исследуемого материала либо заполняемую исследуемым веществом [1].

Методы призмы

Методы призмы получили большую популярность для определения ПП благодаря простоте и высокой точности измерений. Подобные методы предполагают измерение углов падения и преломления луча, по которым вычисляют ПП материала призмы. При этом известны различные варианты их реализации - метод наименьшего отклонения (МНО) [2], метод автоколлимации и метод постоянного отклонения [3].

При прохождении через призму луч света, падающий под углом φ_1 , дважды преломляется и отклоняется на некоторый угол ε от первоначального направления (рис. 1), который можно рассчитать по формуле [4]:

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

где n – ПП материала призмы, α – преломляющий угол призмы.

Наименьшее возможное значение угла отклонения ε_{\min} определяется как минимум функции (1) по углу φ_1 :

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

Определение ε_{\min} и является сутью наиболее популярного МНО [5]. В этом случае для расчета ПП используют формулу (2):

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

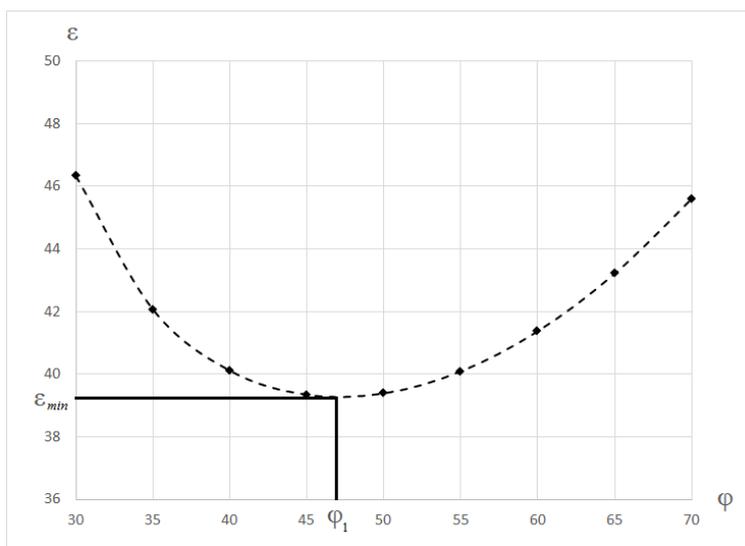


Рис. 1. Пример зависимости отклонения луча от угла падения на грань призмы

Таким образом, для расчета ПП с помощью МНО угол α должен быть заранее известен. Однако, можно модифицировать МНО таким образом, чтобы исключить необходимость наличия априорной информации о призме [6]. Суть модификации МНО состоит в следующем. Для определения ПП выполняют следующие операции:

1. Проводят измерения $\varepsilon_{\min\alpha}$, $\varepsilon_{\min\beta}$, $\varepsilon_{\min\gamma}$ на всех трех гранях призмы с углами α , β и γ .
2. Составляют систему уравнений исходя из (2):

$$\begin{cases} \varepsilon_{\min\alpha} = 2\arcsin(n \sin(\alpha/2)) - \alpha, \\ \varepsilon_{\min\beta} = 2\arcsin(n \sin(\beta/2)) - \beta, \\ \varepsilon_{\min\gamma} = 2\arcsin(n \sin(\gamma/2)) - \gamma, \\ \alpha + \beta + \gamma = 180^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

3. Рассчитывают ПП и значения углов призмы α , β и γ из решения системы (4).

Таким образом, при применении подобного модифицированного метода можно одновременно определить ПП и углы призмы. Кроме того, численное моделирование показывает [7], что в этом случае результаты расчета ПП меньше зависят от погрешностей угловых измерений, чем в случае применения МНО (рис. 2).

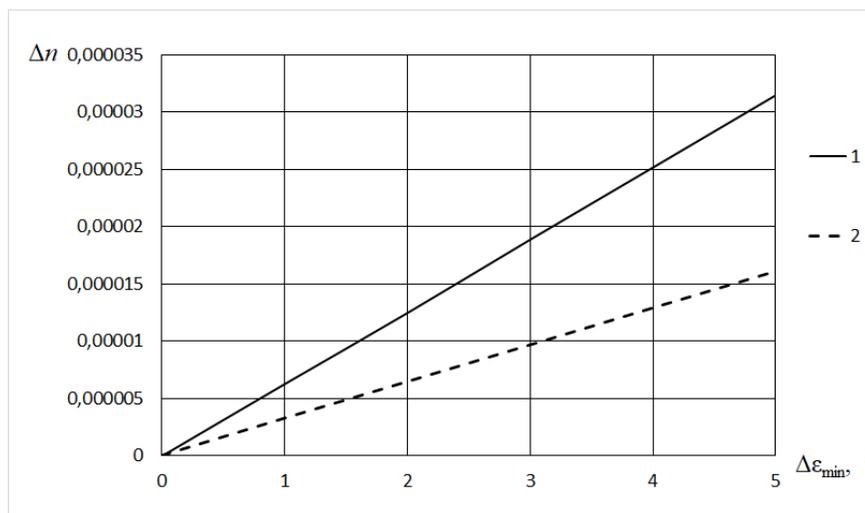


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения Δn от погрешности угловых измерений $\Delta \varepsilon_{\min}$ для призмы с $\alpha = 60^\circ$ и $n = 1,5$: 1 – для классического МНО; 2 – для модифицированного МНО

Заключение

Рассмотренный в работе гониометрический метод измерения ПП можно применять для исследования оптически прозрачных материалов, а также жидких оптически прозрачных веществ, залитых в полую треугольную призму с плоскопараллельными прозрачными иллюминаторами.

Список источников

- [1] Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. — Л.: Химия, 1974.
- [2] ISO 21395-1:2020 Optics and photonics — Test method for refractive index of optical glasses — Part 1: Minimum deviation method.
- [3] Конопелько Л. А. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях. — М.: Триумф, — 2020. — 208 с.
- [4] Tilton L. W. Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint). — Forgotten Books, — 2017. — DOI:10.6028/jres.002.030.
- [5] Tentori D., Lerma J. R. Refractometry by minimum deviation: accuracy analysis // Optical Engineering. — 1990. — №29(2). — P. 160-168. — DOI:10.1117/12.55573.
- [6] Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Модифицированные методы призмы для измерения показателя преломления твердых и жидких веществ // Компьютерная оптика. — 2023. — Т. 47. — № 3. — С. 392-397. — DOI:10.18287/2412-6179-CO-1230.
- [7] Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Оценка погрешностей измерений показателя преломления модифицированными методами призмы // Измерительная техника. — 2023. — № 3. — С. 28-32. — DOI:10.32446/0368-1025it.2023-3-28-32.

Goniometric methods for measuring the refractive index

G. N. Vishnyakov^{1,2}, A. I. Yurin^{3,1}

¹ All-Russian Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ HSE University, Moscow, Russia

Goniometric methods of measuring the refractive index of optically transparent materials are considered. A modified method based on the method of minimum deviation is proposed, which allows determining the refractive index of triangular prisms with unknown apex angles. In the proposed method, the angles of light deviation are measured on three faces of the prism, and the refractive index of the material and the prism angles are determined from the solution of a system of equations. The influence of the angular measurement error on the accuracy of the refractive index calculation is estimated.

Keywords: Optics, Refractive index, Goniometry.