

# Методы измерений показателя преломления оптических сред: преимущества и недостатки

А. В. Лукин<sup>1</sup>, А. Н. Мельников<sup>1</sup>, А. Н. Чеплаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В докладе приведен обзор известных методов измерений и соответствующей измерительной аппаратуры показателя преломления оптических материалов, выполненный в целях выявления наиболее универсального метода, сочетающего наибольший рабочий оптический спектральный диапазон и наименьшие требования к обработке поверхностей и форме исследуемого образца.

*Ключевые слова:* Показатель преломления оптических сред, Методы измерений, Измерительное оборудование, Доступные диапазоны измерений, Погрешность измерений.

*Цитирование:* Лукин, А. В. Методы измерений показателя преломления оптических сред: преимущества и недостатки / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Н. Чеплаков // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 233–238.

Как известно, параметры оптических материалов влияют на качество изображения, формируемого оптической системой. И при фактическом отклонении какого-либо параметра от его расчетного значения, которое использовалось при проектировании оптических деталей или системы, качество изображения будет изменяться. В настоящей работе рассматривается один из ключевых параметров оптических материалов — показатель преломления [1], приводится обзор и сравнение известных методов измерений и соответствующей измерительной аппаратуры.

Под показателем преломления  $n$  оптического материала понимают отношение синуса угла падающего луча  $\varepsilon$  к синусу угла преломления луча  $\varepsilon'$ , или отношение фазовой скорости света в воздухе  $v_v$  и скорости света в веществе  $v_c$ .

$$n = \sin\varepsilon/\sin\varepsilon' = v_v/v_c.$$

Для измерения показателя преломления оптического стекла согласно ГОСТ 28869–90 принято использовать следующие методы [2]:

- гониометрические методы:
  - метод наименьшего отклонения;
  - метод автоколлимации;
- рефрактометрические методы:
  - метод измерения на рефрактометре Пульфриха;
  - метод измерения на V-рефрактометре;
  - метод измерения на рефрактометре Аббе;
  - метод измерения на компенсационном рефрактометре;

интерференционный сравнительный метод измерения (метод Обреимова).

В таблице 1 представлено сравнение методов измерения показателя преломления, по ГОСТ 28869–90.

Из таблицы 1 видно, что все методы измерений показателя преломления имеют высокие требования к образцам измерения. Для гониометрических методов требуется образец в виде трёхгранной равнобедренной призмы, а для большинства рефрактометрических методов — в виде плоскопараллельной пластины или прямоугольного параллелепипеда.

Самым точным методом измерения является метод автоколлимации, который позволяет проводить измерения в широком оптическом спектральном диапазоне от 400 до 12000 нм с погрешностью  $\pm 6 \times 10^{-6}$ , но при этом очень высоки требования к качеству обработки граней и к самой форме исследуемого образца. Поэтому метод автоколлимации применим для контроля показателей преломления оптического материала, предназначенного для изготовления элементов приборов высокого оптического разрешения. В то время как интерференционный метод (метод Обреимова) с рабочим оптическим спектральным диапазоном от 400 до 700 нм и погрешностью  $\pm 5 \times 10^{-4}$  предполагает использование исследуемого образца с пониженными требованиями к качеству обработки поверхностей его граней. В связи с этим метод Обреимова пригоден лишь для контроля показателей преломления оптического материала для получения оптических элементов фотометрических приборов.

Следует отметить, что ГОСТ 28869–90 регламентирует группу классических методов измерений показателя преломления оптических сред, требующих высокое качество материала, определенную форму и размер образца и высокое качество их полированных поверхностей, в то время как некоторые методы и средства измерения рассматриваемого оптического параметра в него не попали. Далее остановимся на рассмотрении новых методов и устройств измерений показателя преломления, выявленных в результате патентного поиска и анализа литературы, посвященной оптике. Патентный поиск проведен по международному патентному классификатору G01N 21/41.

В таблице 2 представлены пять наиболее интересных методов измерений показателя преломления, дано их описание и особенности условий реализации измерений.

Как видно из таблицы 2, описанные способы и устройства сильно отличаются от представленных в ГОСТ 28869–90 и позволяют измерять показатель преломления образцов не только в форме трехгранной равнобедренной или прямоугольной призмы, но и в виде порошка или тонкой пленки. Также появились способы расчета показателя преломления на основе результатов измерения диаграммы интенсивности теплового излучения, угла полного внутреннего отражения с учетом значения производной коэффициента отражения по углу в локальной области измерения.

Таблица 1. Методы измерений согласно ГОСТ 28869–90

Наименование метода измерения	Используемая аппаратура	Спектральный диапазон измерений, нм	Погрешность измерения	Особенности исследуемого образца
<b>Гониометрические методы</b>				
Метод наименьшего отклонения	Гониометр или гониометр-спектрометр	400 – 700	$\pm 1 \times 10^{-5}$	Образец должен иметь форму трехгранной равнобедренной призмы с размерами не менее $30 \times 20$ мм и отполированные поверхности без царапин, точек, налётов, пятен, плёнок
Метод автоколлимации	Гониометр или гониометр-спектрометр	400 – 12000	$\pm 6 \times 10^{-6}$	Образец должен иметь форму трехгранной равнобедренной призмы с размерами не менее $30 \times 50$ мм и отполированные поверхности без царапин, точек, налётов, пятен, плёнок. На поверхности рабочей отражающей грани образца должно быть нанесено зеркальное покрытие, обеспечивающее спектральный коэффициент отражения не менее 0,90
<b>Рефрактометрические методы</b>				
Метод измерения на рефрактометре Пульфриха	Рефрактометр Пульфриха	400 – 700	$\pm 1 \times 10^{-4}$	Образец должен иметь форму прямоугольной пластины с размерами не менее $15 \times 15 \times 4$ мм и отполированные поверхности
Метод измерения на V-рефрактометре	V-рефрактометр	440 – 660	$\pm 5 \times 10^{-5}$	Образец должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда со стороны сечения не менее 17 мм и отполированные или отшлифованные поверхности
Метод измерения на рефрактометре Аббе	Рефрактометр Аббе	546 или 589	$\pm 2 \times 10^{-4}$	Образец должен иметь форму плоскопараллельной пластины с полированными поверхностями.
Метод измерения на компенсационном рефрактометре	Компенсационный рефрактометр	480 – 660	$\pm 1 \times 10^{-5}$	Измеряемый образец должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда размерами не менее $10 \times 10 \times 10$ мм. Контрольный образец должен иметь прямоугольную форму размерами не менее $20 \times 10 \times 10$ мм. Сравнимые образцы должны быть отшлифованы и склеены между собой наибольшими гранями
Интерференционный сравнительный метод измерения (метод Обреймова)	Монохроматор	400 – 700	$\pm 5 \times 10^{-4}$	Измеряемый и контрольный образцы могут иметь любую форму, рабочие грани должны иметь ширину от 0,5 до 3,0 мм, в 2 мм от края рабочей грани не должно быть свилей, видимых невооруженным глазом

Таблица 2. Анализ результатов патентно-информационного поиска

Наименование метода измерения	Используемая аппаратура	Спектральный диапазон измерений, нм	Погрешность измерения	Особенности исследуемого образца	Ссылка
Способ определения показателя преломления оптически прозрачного материала	Лазер	400 – 700	$\sim \pm 0,05$	Исследуемый образец должен быть предварительно измельчен до нано- или ультрадисперсного порошка и спрессован.	[3]
Способ измерения показателя преломления и устройство для его осуществления (модифицированный метод измерения на рефрактометре Аббе)	Измерительная установка – модифицированный рефрактометр Аббе	400 – 700	$\sim \text{до } \pm 2 \times 10^{-4}$	Для измерения показателя преломления исследуемой среды на границе с оптически прозрачным твердым телом требуется на заданную грань испытуемого образца нанести одномерный фотонный кристалл (твердое тело) с известными толщинами слоев и их показателями преломления.	[4]
Способ измерения показателей преломления оптических материалов в твердом состоянии или в виде расплава	Спектроанализатор	550 – 620	$\sim \pm 0,01$	Образец исследуемого материала нагревают до температуры, позволяющей регистрировать его тепловое излучение.	[5]
Лазерный триангуляционно-интерферометрический метод	Лазерное триангуляционно-интерферометрическое измерительное устройство	400 – 700	$\sim \pm 5 \times 10^{-6}$	Образец должен представлять собой прозрачную для оптического диапазона излучения ткань или пленку на прозрачных и непрозрачных подложках. Диапазоны измерений толщины от 0,01 мм до 20 мм; показателя преломления от 1 до 2 и локального радиуса кривизны поверхности от 6 мм и более.	[6]
Интерферометрический метод	Интерферометр	157 – 12000	$\pm 5 \times 10^{-6}$	Образец должен иметь форму плоскопараллельной пластины с полированными поверхностями и известной толщиной. Контрольный образец должен быть с известной толщиной и показателем преломления.	[7]

Найденные в процессе патентного поиска и анализа технической литературы решения выходят за рамки рефрактометрических и гониометрических методов и позволяют измерять показатель преломления оптических сред, не требуя использования многокомпонентных оптических схем и высокого качества материала исследуемого образца. Это приводит к повышению гибкости процесса измерений и многократному упрощению методики измерения показателя преломления.

На основе углубленного анализа материалов патентно-информационного поиска и технической литературы сделан вывод о целесообразности формирования технических требований на разработку рефрактометра, основанных на новых физических принципах. В частности, представляет интерес рассмотрение возможности реализации аналитической связи между коэффициентами преломления, отражения, углами падения и другими параметрами электромагнитного излучения, представленными в обобщенных формулах Френеля, в том числе с учетом угла Брюстера. Важно при этом предусмотреть поиск путей повышения точности измерений путем создания специальных программных средств, позволяющих учесть влияние дефектов отражающей поверхности исследуемого образца.

#### Список источников

- [1] **Афанасьев, В. А.** Оптические измерения: Учебник для вузов / В. А. Афанасьев. — М.: Высшая школа, 1981. — 229 с.
- [2] **ГОСТ 28869–90** Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. — 18 с.
- [3] **Патент № 2629695 РФ.** Способ определения показателя преломления оптически прозрачного материала / Л. А. Акашев, Н. А. Попов, В. Г. Шевченко, Б. Д. Антонов, В. А. Кочедыков. — Заяв. 24.02.2016. — Оpubл. 31.08.2017.
- [4] **Патент № 2442142 РФ.** Способ измерения показателя преломления и устройство для его осуществления / В. Н. Конопский. — Заяв. 27.08.2009. — Оpubл. 10.02.2012.
- [5] **Патент № 2733391 РФ.** Способ измерения показателей преломления оптических материалов в твердом состоянии или в виде расплава / Г. А. Буфетова, С. Я. Русанов, В. Ф. Серегин, В. В. Кашин, В. Б. Цветков. — Заяв. 19.04.2020. — Оpubл. 01.10.2020.
- [6] **Патент № 191566 РФ.** Лазерный триангуляционно-интерферометрический измерительный комплекс оптических характеристик прозрачных биологических тканей и плёнок / А. А. Адамов, М. С. Баранов, В. Н. Храмов. — Заяв. 07.03.2019. — Оpubл. 24.02.2016.
- [7] **Коломийцев, Ю. В.** Интерферометры. Основы инженерной теории, применение / Ю. В. Коломийцев. — Л.: Машиностроение, 1976. — 296 с.

# Methods for measuring the refractive index of optical materials: advantages and disadvantages

*A. V. Lukin<sup>1</sup>, A. N. Melnikov<sup>1</sup>, A. N. Cheplakov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

The report provides a review of known measurement methods and related measurement equipment for the refractive index of optical materials, carried out in order to identify the most universal method that combines the largest working optical spectral range and the smallest requirements for surface treatment and the shape of the test sample.

*Keywords:* Refractive index of optical materials, Measurement methods, Measuring equipment, Available measuring ranges, Measurement error.