

Исследование дисперсионных характеристик оптических стекол

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

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20;

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
119361, Россия, г. Москва, ул. Озерная, д. 46;

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 4

Аннотация

Рассмотрены дисперсионные характеристики оптических стекол. Предложен подход к исследованию дисперсионных характеристик оптических стекол, требующий измерения показателя преломления только на трех длинах волн, что упрощает процесс измерений по сравнению с применением широко распространенной дисперсионной формулы Селлмейера. Предложена аппроксимирующая функция для показателя преломления оптических стекол, рассчитана погрешность аппроксимации для различных марок стекла, предложен способ коррекции погрешности аппроксимации. Проведены измерения показателя преломления образцов оптических стекол на 3 длинах волн He-Ne и Ar-Cr лазеров, рассчитаны значения показателя преломления для спектральных линий, необходимые для определения дисперсионных характеристик. Значение погрешности расчета показателя преломления при этом не превысило $\pm 1 \times 10^{-5}$, что доказывает перспективу применения предложенной аппроксимирующей функции для исследования дисперсионных характеристик оптических стекол.

Ключевые слова: дисперсия, дисперсионные характеристики, число Аббе, показатель преломления, оптическое стекло.

Цитирование: Юрин, А.И. Исследование дисперсионных характеристик оптических стекол / А.И. Юрин, Г.Н. Вишняков, В.Л. Минаев // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 2. – С. 225-230. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1287.

Citation: Yurin AI, Vishnyakov GN, Minaev VL. Research of dispersion characteristics of optical glass. Computer Optics 2024; 48(2): 225-230. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1287.

Введение

Показатель преломления n (ПП) и его спектральная зависимость являются важнейшими параметрами оптических стекол [1]. Точные и достоверные измерения ПП нужны в оптической промышленности для повышения разрешающей способности объективов и других оптических приборов [2], а исследование спектральной зависимости ПП обусловлено необходимостью определения дисперсионных характеристик оптических стекол, которые используют при расчетах прецизионной оптики с минимальными хроматическими аберрациями [3–5]. Согласно [6] при производстве стекла для оптической промышленности необходимо определять среднюю дисперсию и коэффициенты дисперсии, что требует измерения ПП на различных длинах волн λ с погрешностью не более $\pm 1 \times 10^{-5}$, поэтому исследованию спектральной зависимости оптических стекол посвящено множество работ [7–14].

1. Дисперсионные характеристики

Для количественной оценки дисперсии оптических стекол используют среднюю дисперсию, равную разности ПП для двух длин волн $n(\lambda_1) - n(\lambda_2)$, и коэффициенты дисперсии $[n(\lambda_1) - 1] / [n(\lambda_2) - n(\lambda_3)]$. В качестве длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ традиционно используют

линии спектра химических элементов (Фраунгоферовы линии F', F, e, d, D, C', C). Например, для видимой области спектра среднюю дисперсию обычно рассчитывают как $n_F - n_C$, а коэффициент дисперсии (число Аббе) определяют соотношением [8]

$$v_e = (n_e - 1) / (n_F - n_C), \quad (1)$$

где e – линия излучения ртути 546,1 нм; F' – линия излучения кадмия 480,0 нм; C' – линия излучения кадмия 643,8 нм.

Таким образом, для расчета дисперсионных характеристик необходимо измерять ПП на длинах волн спектральных ламп, что не всегда удобно. Кроме того, для высокоточных измерений ПП крайне желательна термостабилизация измерительного объема [15], а спектральные лампы сильно нагреваются при работе, что приводит к увеличению погрешности. В связи с развитием оптоэлектроники намного проще использовать в качестве источников излучения лазеры с волоконно-оптическим выходом [16], которые можно разместить вне измерительного объема. При этом возникает задача вычисления ПП для необходимой линии спектра по экспериментальным данным, полученным для длин волн используемых лазерных источников. Подобную задачу решают с помощью эмпирических дисперсионных формул, описывающих зависимость $n(\lambda)$, например, формулы Коши [17]:

$$n(\lambda) = K_1 + K_2/\lambda^2 + K_3/\lambda^4, \quad (2)$$

где K_1, K_2 и K_3 – эмпирические коэффициенты, определяемые путем измерения ПП для трех длин волн.

Точность расчета ПП по дисперсионным формулам зависит от числа эмпирических коэффициентов и диапазона интерполяции [18]. Например, трехчленная формула Коши дает погрешность интерполяции в видимой части спектра $\pm(10^{-4} \div 10^{-5})$. Более сложная формула Гартмана [19], содержащая 4 коэффициента, позволяет проводить интерполяцию в видимом диапазоне с погрешностью $\pm(10^{-5} \div 10^{-6})$. Для повышения точности расчета ПП исследователи предлагали множество различных формул, в том числе уравнение Шотта [19]:

$$n^2(\lambda) = a + b\lambda^2 + c\lambda^{-2} + d\lambda^{-4} + e\lambda^{-6} + f\lambda^{-8}, \quad (3)$$

где a, b, c, d, e, f – экспериментально определенные коэффициенты Шотта.

В настоящее время многие производители оптического стекла перешли к использованию наиболее точной дисперсионной формулы Селлмейера [20–21] с шестью коэффициентами:

$$n^2(\lambda) = 1 + (A_1\lambda^2)/(\lambda^2 - B_1^2) + (A_2\lambda^2)/(\lambda^2 - B_2^2) + (A_3\lambda^2)/(\lambda^2 - B_3^2), \quad (4)$$

где $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – экспериментально определенные коэффициенты Селлмейера.

Однако для определения шести эмпирических коэффициентов формул Шотта или Селлмейера необходимо измерить ПП материала на 6 различных длинах волн, что существенно увеличивает трудозатраты и количество источников излучения. В данной работе предлагается новый подход, позволяющий производить расчет дисперсионных характеристик оптических стекол по экспериментальным данным, полученным для 3 длин волн видимого диапазона.

2. Определение дисперсионных характеристик оптических стекол

Рассмотрим суть предложенного подхода к расчету дисперсионных характеристик оптических стекол. Необходимо измерить ПП на трех длинах волн, выбранных в начале (λ_1), середине (λ_2) и конце (λ_3) исследуемого диапазона. Для примера примем $\lambda_1 = 400$ нм, $\lambda_2 = 540$ и $\lambda_3 = 700$ нм.

Для аппроксимации ПП предлагается использовать функцию вида

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^C, \quad (5)$$

где A, B и C – эмпирические коэффициенты, определяемые путем решения системы из трех уравнений, составленных по измеренным значениям ПП n_1, n_2, n_3 на длинах волн λ_1, λ_2 и λ_3 соответственно:

$$\begin{aligned} n_1 &= A + B/\lambda_1^C, \\ n_2 &= A + B/\lambda_2^C, \\ n_3 &= A + B/\lambda_3^C. \end{aligned} \quad (6)$$

Применение подобной аппроксимирующей функции приводит к появлению погрешности аппроксимации Δn_{app} по сравнению с формулой Селлмейера. На рис. 1 приведена зависимость погрешности аппроксимации ПП от длины волны для оптических стекол различных марок в видимом диапазоне. Для расчета погрешностей использовались типовые значения коэффициентов Селлмейера, которые можно найти в онлайн-базе *RefractiveIndex.info* [22] для большинства марок стекол. Как видно на рис. 1, характер зависимости $\Delta n_{app}(\lambda)$ не связан с маркой стекла.

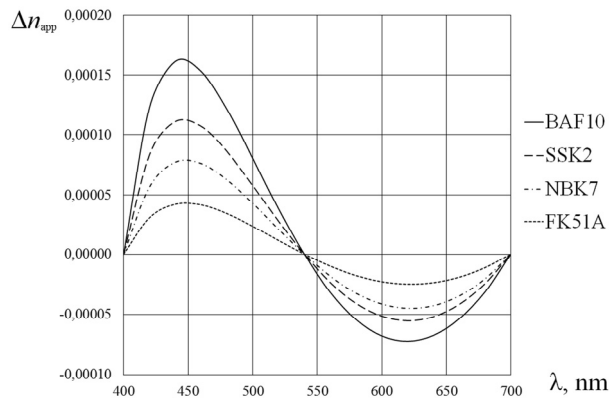


Рис. 1. Зависимость погрешности аппроксимации ПП от длины волны для оптических стекол различных марок

При этом максимальное значение погрешности аппроксимации Δn_m оказывается пропорционально отношению изменению ПП δn в исследуемом диапазоне, которое зависит от марки стекла (рис. 2), т.е.

$$\Delta n_m = f(\delta n), \quad (7)$$

где $\delta n = (n_1 - n_3)/n_2$.

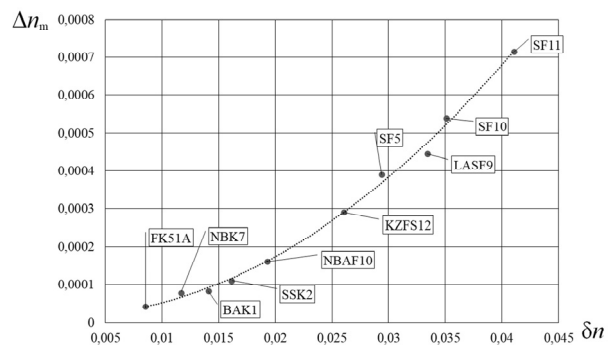


Рис. 2. Зависимость максимальной погрешности аппроксимации от относительного изменения ПП для оптических стекол различных марок

Таким образом, если представить погрешность аппроксимации (рис. 1) в виде полинома

$$\Delta n_{app} = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 + a_5\lambda^5 + a_6\lambda^6, \quad (8)$$

коэффициенты a_i которого зависят от величины δn , то можно ввести поправку к функции (5) и существенно уменьшить значение Δn_{app} .

Для расчета коэффициентов корректирующего полинома нужно:

1. Построить дисперсионные кривые по формуле Селлмейера для нескольких известных марок стекол с различными значениями δn .
2. На каждой кривой выделить 3 точки, соответствующие экспериментальным длинам волн.
3. Найти численные решения и провести через эти 3 точки функции вида (5).
4. Рассчитать разности между кривыми по Селлмейеру и предложенными функциями.
5. Функции разности (погрешности аппроксимации, см. рис. 1) аппроксимировать с помощью полиномов 6 степени.
6. Найти зависимости коэффициентов a_i от значения δn (рис. 3).

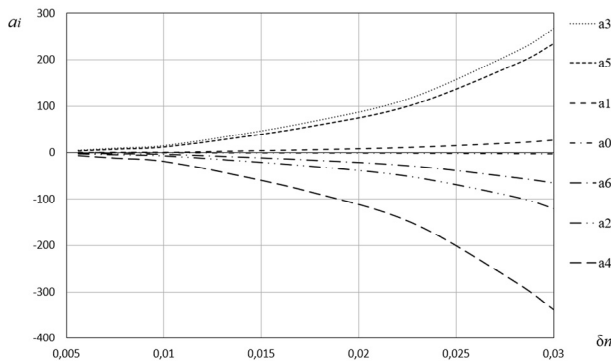


Рис. 3. Пример зависимости коэффициентов корректирующего полинома a_i от относительного изменения ПП δn для длин волн $\lambda_1 = 400$ нм, $\lambda_2 = 540$, $\lambda_3 = 700$ нм

Как видно на рис. 3, абсолютное значение каждого коэффициента возрастает при увеличении δn . Поэтому если рассчитать δn для исследуемого стекла по результатам измерений n_1, n_2, n_3 , то можно определить коэффициенты a_i , соответствующие данному значению δn . С помощью найденных коэффициентов находят значение поправки Δn_λ , что позволяет уменьшить Δn_{app} до уровня $\pm(10^{-5} \div 10^{-6})$ (рис. 4), достаточного для расчета дисперсионных характеристик оптических стекол.

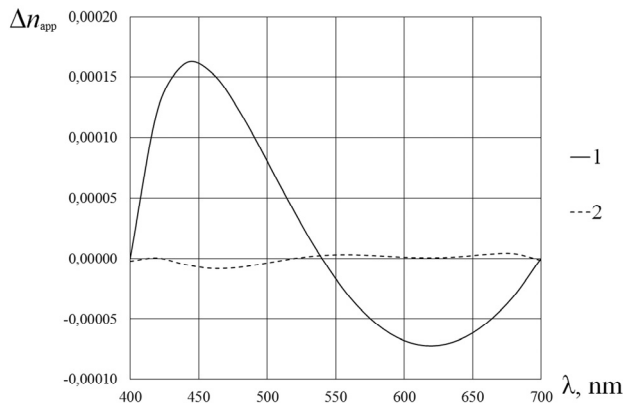


Рис. 4. Погрешности аппроксимации ПП функцией вида $n(\lambda) = A + B/\lambda^C$ для стекла со значением $\delta n = 0,0193$: 1 – без поправки; 2 – с поправкой

Таким образом, аппроксимирующая функция для ПП принимает вид

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^C + \Delta n_\lambda, \tag{9}$$

где Δn_λ – значение поправки, рассчитанное для требуемой длины волны.

Если же марка исследуемого стекла известна, можно использовать коэффициенты полинома (8), рассчитанные для стекла данного типа на необходимых длинах волн. В этом случае погрешность аппроксимации составит не более $\pm 10^{-7}$ при погрешности измерений самого ПП $\pm(10^{-5} \div 10^{-6})$.

3. Экспериментальные результаты

Для проверки применимости подобного подхода к расчету дисперсионных характеристик на практике были проведены измерения ПП n_{01}, n_{02}, n_{03} образцов оптических стекол в виде трехгранных призм [23] №01, №02 и №03 из стекла Schott (марок N-BK7, NBAF10 и SF1 соответственно) с помощью динамического гониометра [24] на длинах волн лазеров He-Ne (623,8 нм) и Ar-Kr (476,5 нм; 514,5 нм) (табл. 1). Измерения проводились в нормальных условиях [25], погрешность измерений ПП с помощью использованного динамического гониометра не превышает $\pm 5 \times 10^{-6}$.

Табл. 1. Результаты измерений ПП образцов оптических стекол марок N-BK7, NBAF10 и SF1

λ, nm	n_{01}	n_{02}	n_{03}
476,5	1,523377	1,681532	1,736898
514,5	1,520767	1,676790	1,728525
632,8	1,515364	1,667260	1,712384

Определим коэффициенты A, B, C уравнения (5), составив и решив систему (6), используя результаты измерений (табл. 2).

Для решения системы (6) можно использовать различные пакеты математического программного обеспечения (MATLAB, MathCad и т.п.). В данной работе численное решение найдено с помощью надстройки «Solver» Microsoft Excel, реализующей поиск решения нелинейных задач методом обобщенного приведенного градиента [26]. Погрешность алгоритма расчета ПП данным методом определяется настройкой параметров сходимости и числа итераций и не превышает $\pm 10^{-9}$.

Табл. 2. Результаты расчета коэффициентов аппроксимирующей функции для ПП образцов оптических стекол марок N-BK7, NBAF10 и SF1

№ призм	A	B	C
01	1,50418511	0,00467504	1,90513239
02	1,64999181	0,00653499	2,12345693
03	1,68771393	0,00810612	2,43218610

Рассчитаем коэффициенты корректирующего полинома (8) в случае применения функции (5) для длин волн $\lambda_1 = 476,5$ нм, $\lambda_2 = 514,5$ нм и $\lambda_3 = 632,8$ нм

(табл. 3), для чего можно использовать коэффициенты Селлмейера из базы [22] или каталога стекол фирмы Schott [27].

Поскольку марки стекол нам известны, то для расчета a_i можно использовать следующий алгоритм:

1. Найти коэффициенты Селлмейера для нужной марки стекла из открытых источников.
2. Построить дисперсионную кривую по формуле Селлмейера.
3. Выделить на кривой 3 точки, соответствующие экспериментальным длинам волн.
4. Найти численное решение и провести через эти 3 точки функцию вида (3).
5. Рассчитать разность между кривой по Селлмейеру и предложенной функцией.
6. Функцию разности аппроксимировать полиномом 6 степени и определить значения a_i .

Коэффициенты полиномов, рассчитанные для стекол исследуемых марок, приведены в табл. 3.

Табл. 3. Результаты расчета коэффициентов корректирующего полинома для оптических стекол различных марок при $\lambda_1 = 476,5$ нм, $\lambda_2 = 514,5$ нм, $\lambda_3 = 632,8$ нм

Марка стекла	N-BK7	NBAF10	SF1
$a_0, \text{нм}$	-0,096170	-0,264038	-0,695190
$a_1, \text{нм}^{-1}$	0,917947	2,589572	6,837082
$a_2, \text{нм}^{-2}$	-3,660501	-10,597347	-28,014981
$a_3, \text{нм}^{-3}$	7,826133	23,195908	61,290960
$a_4, \text{нм}^{-4}$	-9,479549	-28,670773	-75,583605
$a_5, \text{нм}^{-5}$	6,171506	18,980467	49,840501
$a_6, \text{нм}^{-6}$	-1,685110	-5,255145	-13,728418

Используя коэффициенты полинома (8) из табл. 3, рассчитаем значения поправок и определим ПП $n_{01}(\lambda), n_{02}(\lambda), n_{03}(\lambda)$ для искомым длин волн по формуле (9) (табл. 4).

Табл. 4. Результаты расчета ПП образцов оптических стекол марок N-BK 7, NBAF10 и SF1 для спектральных линий F', F, e, d, D, C', C

$\lambda, \text{нм}$	Линия	$n_{01}(\lambda),$ N-BK 7	$n_{02}(\lambda),$ NBAF10	$n_{03}(\lambda),$ SF1
480,0	F'	1,523109	1,736027	1,681053
486,1	F	1,522657	1,734554	1,680226
546,1	e	1,518997	1,723045	1,673617
587,6	d	1,517073	1,717296	1,670217
589,3	D	1,517000	1,717084	1,670090
643,8	C'	1,514995	1,711351	1,666632
656,3	C	1,514600	1,710254	1,665963

Для оценки погрешности определения ПП Δn в качестве опорных значений используем результаты международных сличений, в которых данные призмы были использованы как эталоны передачи размера ПП [28]. Как видно на рис. 5, погрешность расчета ПП для требуемых спектральных линий F' (480,0 нм), F (486,1 нм), e (546,1 нм), d (587,6 нм), D (589,3 нм), C' (643,8 нм), C (656,3 нм) не превышает $\pm 1 \times 10^{-5}$, что подтверждает возможность применения предложен-

ной аппроксимирующей функции для расчета дисперсионных характеристик оптических стекол.

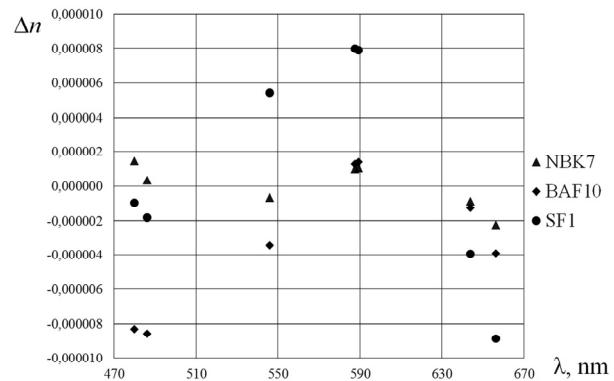


Рис. 5. Погрешность расчета ПП с помощью предложенной аппроксимирующей функции для спектральных линий F', F, e, d, D, C', C

Если же предположить, что марки стекол нам изначально не были известны, то для введения поправок можно использовать «универсальные» коэффициенты полинома, определенные для данных длин волн и зависящие от значения параметра Δn . Рассмотрим применение подобного подхода для призмы №1. Рассчитаем значение Δn_{01} по данным табл. 1 и найдем значения a_i для известных марок стекол с близкими значениями Δn , например FK51F и BAK1 (см. рис. 2). Значения «универсальных» коэффициентов находят, усредняя соответствующие значения a_i для известных марок стекол.

Табл. 5. Результаты расчета коэффициентов корректирующего полинома для оптического стекла неизвестной марки (Призма №01) при $\lambda_1 = 476,5$ нм, $\lambda_2 = 514,5$ нм, $\lambda_3 = 632,8$ нм

Марка стекла	FK51F	Призма №01	BAK1
$\Delta n, \%$	0,384852	0,526905	0,629344
$a_0, \text{нм}$	-0,0508066	-0,0866342	-0,1124704
$a_1, \text{нм}^{-1}$	0,4841781	0,8329987	1,0845433
$a_2, \text{нм}^{-2}$	-1,928642	-3,3463744	-4,3687418
$a_3, \text{нм}^{-3}$	4,1218341	7,2062998	9,4305969
$a_4, \text{нм}^{-4}$	-4,9951434	-8,7887991	-11,524514
$a_5, \text{нм}^{-5}$	3,2567998	5,7590432	7,5634831
$a_6, \text{нм}^{-6}$	-0,8914119	-1,5825449	-2,0809409

Погрешность расчета ПП для искомым спектральных линий при применении «универсального» полинома в данном случае не превысила $\pm 2 \times 10^{-6}$.

Заключение

Предложенный в статье подход к исследованию дисперсионных характеристик оптических стекол упрощает процесс определения спектральной зависимости ПП и при этом не требует применения спектральных ламп в качестве источников излучения. Предложенная аппроксимирующая функция с тремя коэффициентами и корректирующим полиномом позволяет рассчитать значения ПП образцов на различных длинах волн с погрешностью не более $\pm 1 \times 10^{-5}$

по сравнению с опорными значениями, что подтверждает возможность её применения для исследования дисперсионных характеристик оптических стекол.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (<http://vniiofi.ru>).

References

- [1] GOST 3514-94 Optical colorless glass. Technical conditions [In Russian]. Moscow: "Izdatel'stvo standartov" Publisher; 1996.
- [2] Rathmann CL, Mann GH, Nordberg ME. A new ultralow-expansion, modified fused-silica glass. *Appl Opt* 1968; 7: 819-823. DOI: 10.1364/AO.7.000819.
- [3] Greysukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Kalashnikov AV, Stepanov SA. Modeling and investigation superachromatization refractive and refractive-diffractive optical systems. *Computer Optics* 2012; 36(3): 395-404.
- [4] Zhang S, Shannon RR. Lens design using a minimum number of glasses. *Opt Eng* 1995; 34: 3435.
- [5] Tesar JC. Using small glass catalogs. *Opt Eng* 2000; 39(7): 1816-1821. DOI: 10.1117/1.602563.
- [6] GOST 13659-78. Optical colorless glass. Physicochemical characteristics. Basic parameters [In Russian]. Moscow: "Izdatel'stvo standartov" Publisher; 1978.
- [7] Lee C, Choi H, Jin J, Cha M. Measurement of refractive index dispersion of a fused silica plate using Fabry-Perot interference. *Appl Opt* 2016; 55: 6285-6291. DOI: 10.1364/AO.55.006285.
- [8] Wray JH, Neu JT. Refractive index of several glasses as a function of wavelength and temperature. *J Opt Soc Am* 1969; 59: 774-776. DOI: 10.1364/JOSA.59.000774.
- [9] Malitson H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *J Opt Soc Am* 1965; 55: 1205-1209. DOI: 10.1364/JOSA.55.001205.
- [10] Rodney WS, Spindler RJ. Index of refraction of fused quartz glass for ultraviolet, visible, and infrared wavelengths. *J Opt Soc Am* 1954; 44: 677-679. DOI: 10.1364/JOSA.44.000677.
- [11] Brixner B. Refractive-index interpolation for fused silica. *J Opt Soc Am* 1967; 57: 674-676. DOI: 10.1364/JOSA.57.000674.
- [12] Milam D. Review and assessment of measured values of the nonlinear refractive-index coefficient of fused silica. *Appl Opt* 1998; 37: 546-550. DOI: 10.1364/AO.37.000546.
- [13] Izumitani T, Hirota S, Tanaka K, Onuki H. Dispersion and reflection spectra of fluorine and oxide glasses in the vacuum and extreme ultraviolet region. *J Non Cryst Solids* 1986; 86(3): 361-368. DOI: 10.1016/0022-3093(86)90024-4.
- [14] Sutton LE, Stavroudis ON. Fitting refractive index data by least squares. *J Opt Soc Am* 1961; 51: 901-905. DOI: 10.1364/JOSA.51.000901
- [15] Vishnyakov GN, Minaev VL, Bochkareva SS. State primary standard of refractive index GET 138-2021 [In Russian]. *Meas Tech* 2022; 5: 4-9. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-5-4-9.
- [16] Glazov AI, Kozachenko ML, Tikhomirov SV, Khatyrev NP. State working standard of the unit of average power of optical radiation for fiber-optic systems and lasers. *Meas Tech* 2016; 59(3) 209-215. DOI: 10.1007/s11018-016-0944-y.
- [17] Konopel'ko LA. Methods of refractive index measurements in physical chemistry [In Russian]. Moscow: "Triumph" Publisher; 2020. DOI: 10.32986/978-5-907052-08-03-2020-208.
- [18] Efimov AM. Refractive index of optical glasses versus wavelength: precision approximation with dispersion formulas. *Phys Chem Glas: Eur J Glass Sci Technol B* 2007; 48: 235-241.
- [19] Smith WJ. Modern optical engineering. The design of optical systems. 3th ed. The McGraw-Hill Companies Inc; 2000. ISBN: 0-07-136360-2.
- [20] Sellmeier W. Ueber die durch die Aetherschwingungen erregten Mitschwingungen der Körpertheilchen und deren Rückwirkung auf die ersteren, besonders zur Erklärung der Dispersion und ihrer Anomalien (II. Theil). *Annalen der Physik und Chemie* 1872; 223(11): 386-403.
- [21] Tatian B. Fitting refractive-index data with the Sellmeier dispersion formula. *Appl Opt* 1984; 23(24): 4477-4485. DOI: 10.1364/AO.23.004477.
- [22] RefractiveIndex.INFO. Refractive index database. 2023. Source: <<https://refractiveindex.info>>.
- [23] Astrua M, Pisani M. Prism refractive index measurement at INRiM. *Meas Sci Technol* 2009; 20: 095305. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/095305.
- [24] Vishnyakov GN, Levin GG, Kornysheva SV, Zyuzev GN, Lyudomirskii MB, Pavlov PA, Filatov YuV. Measuring the refractive index on a goniometer in the dynamic regime. *J Opt Technol* 2005; 72(12): 929-933. DOI: 10.1364/JOT.72.000929.
- [25] GOST 8.050-73. GSI. Normal conditions for performing linear and angular measurements [In Russian]. Moscow: "Izdatel'stvo standartov" Publisher; 1973.
- [26] Barushev AV, Vedotova EL. Finding optimal solutions for linear programming decision problems using Microsoft Excel Solver Add-in. Source: <<https://naukovedenie.ru/PDF/54TVN315.pdf>>.
- [27] Scott. Optical glass. 2023. Source: <https://www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Optical-Glass/c/optical-glass>.
- [28] Vishnyakov GN, Fricke A, Parkhomenko NM, Hori Y, Pisani M. Report on supplementary comparison COOMET.PR-S3: refractive index. *Metrologia* 2016; 53(1A): 02001. DOI: 10.1088/0026-1394/53/1A/02001.

Сведения об авторах

Юрин Александр Игоревич, 1979 года рождения, в 2002 г. окончил Московский институт электроники и математики по специальности «Метрология и метрологическое обеспечение», кандидат технических наук, доцент. Работает доцентом Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия. Область научных интересов: метрология, коррекция погрешностей, оптико-физические измерения, рефрактометрия. E-mail: ayurin@hse.ru

Вишняков Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор. Работает заведующим лабораторией ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия. Область научных интересов: оптика, метрология, рефрактометрия, поляриметрия, эллипсометрия.
E-mail: vish@vniiofi.ru

Минаев Владимир Леонидович, 1978 года рождения, доктор технических наук. Работает заведующим научно-исследовательским отделением голографии, оптической томографии, нанотехнологий и наноматериалов ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия. Область научных интересов: оптика, голография, оптическая томография, оптическая микроскопия.
E-mail: minaev@vniiofi.ru

ГРНТИ: 47.35.39

Поступила в редакцию 6 февраля 2023 г. Окончательный вариант – 13 мая 2023 г.

Research of dispersion characteristics of optical glass

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

¹ HSE University, 101000, Moscow, Russia, Myasnitskaya 20;

² All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements,
119361, Moscow, Russia, Ozernaya 46;

³ Bauman University, 105005, Moscow, Russia, 2 Baumanskaya 5, bld. 4

Abstract

Dispersion characteristics of optical glass are considered. An approach to research of dispersion characteristics of optical glass is proposed, requiring the measurement of the refractive index at only three wavelengths, which simplifies the measurement process compared with the use of the widely used Sellmeier equation. An approximation function for the refractive index of optical glass is proposed, the approximation error for various glass grades is calculated, and a method for correcting the approximation error is proposed. The refractive index measurements of optical glass samples are carried out at 3 wavelengths of He-Ne and Ar-Cr lasers, and values of the refractive index for spectral lines necessary for determining the dispersion characteristics are calculated. The value of the error in calculating the refractive index does not exceed $\pm 1 \times 10^{-5}$, which proves the prospect of using the proposed approximating function for studying the dispersion characteristics of optical glass.

Keywords: dispersion, dispersion characteristics, Abbe number, refractive index, optical glass.

Citation: Yurin AI, Vishnyakov GN, Minaev VL. Research of dispersion characteristics of optical glass. *Computer Optics* 2024; 48(2): 225-230. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1287

Acknowledgements: This work was supported by the All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements (VNIIOFI).

Authors' information

Alexander Igorevich Yurin (b. 1979) graduated from the Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM) in 2002 with a degree in "Metrology and Metrological Assurance", Candidate of Technical Sciences. Associate professor of HSE University, Moscow, Russia. Research interests: metrology, error correction, optical measurements, refractometry. E-mail: ayurin@hse.ru.

Gennady Nikolaevich Vishnyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Works as the head of the laboratory of FSUE "All-Russian Research Institute of Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia. Research interests: optics, metrology, refractometry, polarimetry, ellipsometry. E-mail: vish@vniiofi.ru

Vladimir Leonidovich Minaev (b. 1978), Doctor of Technical Sciences. Works as the head of the Research Department of Holography, Optical Tomography, Nanotechnology and Nanomaterials of FSUE "All-Russian Research Institute of Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia. Research interests: optics, holography, optical tomography, optical microscopy. E-mail: minaev@vniiofi.ru

Received February 6, 2023. The final version – May 13, 2023.
