

СРАВНИТЕЛНИ РЕФРАКТОМЕТРИЧНИ И ДИСПЕРСИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОПТИЧНИ ПОЛИМЕРИ И ОПТИЧНИ СЪТЪКЛА

Стефка Касарова*, Нина Султанова*, Иван Николов**
* Университет “Проф. д-р А. Златаров” – Бургас
** СУ “Св. Кл. Охридски”

COMPARATIVE REFRACTOMETRIC AND DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF OPTICAL PLASTICS AND OPTICAL GLASSES

Stefka Kasarova, Nina Sultanova, Ivan Nikolov
E-mail: kasarova_st@yahoo.com

ABSTRACT

The refractive indices of a number of optical plastics are measured in the visible and near infrared spectral region to 1052 nm. The Abbe numbers and relative partial dispersions are calculated. The refractometric and dispersive characteristics of examined polymer materials are compared with those of optical glasses. Random refractive indices and dispersion curves are obtained on the base of the Cauchy–Laurent’s dispersion equation. A n_d / ν_d diagram of optical plastics and glasses is presented.

Key words: optical plastics, refractive index measurements, Abbe numbers, dispersion curves

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на оптиката и нейните приложения в последните десетилетия е тясно свързано с частичната или пълна замяна на силикатните стъкла като общоприет материал с оптични полимери. Този факт се дължи както на икономически по-изгодното производство и обработка на последните, така и на някои предимства по отношение на техните физични и оптични свойства. Ниската плътност, големият коефициент на пропускане и високата удароустойчивост на повечето оптични полимери позволяват използването им в продукцията за масовата и специализирана оптика [1–4].

Едни от най-важните характеристики, които стойности трябва да са известни при избора на материал за даден оптичен елемент, са показателят на пречупване и дисперсията, изразена чрез числата на Аббе [1, 3, 4]. Затова определянето им с възможно по-голяма точност е от първостепенно значение при конструирането на оптични системи и уреди. Най-често в оптичните каталози показателите на пречупване се представят за определена дължина на вълната, която според стандартите в САЩ и Великобритания е жълтата d–

линия на He с $\lambda = 587,6$ nm, а в Европа и Япония – зелената Hg e–линия с $\lambda = 546,1$ nm [4–6].

На практика като количествена характеристика на дисперсионната способност на материалите се използва тъй нареченият коефициент на дисперсия или число на Аббе. За видимия диапазон от електромагнитния спектър обикновено числото на Аббе се дефинира с помощта на следната формула:

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad (1)$$

където n_d , n_F и n_C са показателите на пречупване съответно за d–линията, F–линията ($\lambda = 486,1$ nm) и C–линията ($\lambda = 656,3$ nm). В съответствие с гореспоменатите стандарти се дефинира и число на Аббе ν_e спрямо e–линията чрез съотношението:

$$\nu_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}, \quad (2)$$

където n_e , n_F и n_C са показателите на пречупване съответно за e–линията, F–линията ($\lambda = 480$ nm) и C–линията ($\lambda = 643,8$ nm). Числата на Аббе са тясно свързани с

хроматичната аберация на материалите и съответно с качеството на образа.

За оптични системи с много високо качество освен показателя на пречупване и числата на Аббе на оптичния материал в каталозите се въвежда и относителна частна дисперсия $P_{x,y}$ чрез израза:

$$P_{x,y} = \frac{n_x - n_y}{n_z - n_k}, \quad (3)$$

където n_x , n_y , n_z и n_k са показателите на пречупване съответно за дължини на вълните x , y , z и k . В каталога за оптични характеристики на SCHOTT относителната частна дисперсия $P_{x,y}$ се изразява спрямо F – и C – линията или спрямо F' – и C' – линията [5].

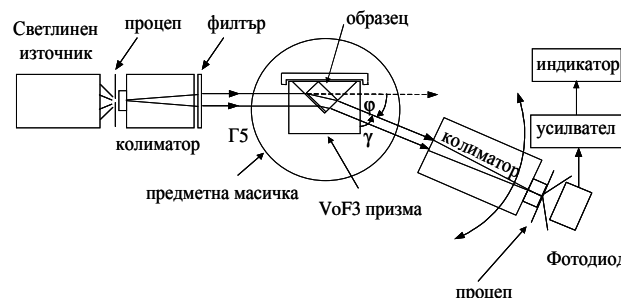
В съвременните оптични уреди и устройства често се налага познаването на рефрактометричните и дисперсионни характеристики на оптичните материали и в близката ИЧ област. В този диапазон обаче в литературата липсват данни за показателите на пречупване на оптични полимери (ОП). В настоящата работа се определят рефрактометричните и дисперсионни характеристики на набор от основни и запазени марки на ОП във видимата и близка ИЧ област от спектъра от 435 до 1052 nm и се прави сравнение с данните за някои от по-често използваните силикатни стъкла.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Полимерните образци във вид на пластинки с дебелина от 2,54 до 5,1 mm са измерени с рефрактометър на Пулфрих PR2, производство на фирмата “Карл Цайс Йена”, с грешка по паспорт $2 \cdot 10^{-5}$ [7]. При предварителното калибриране на уреда с еталонен образец № 7.17 от оптично стъкло Sovirel VCD C 23-57 с показател на пречупване 1,6227 при 20°C е установена систематична грешка от -0,0011, която е отчетена при представянето на резултатите от измерванията. Получени са стойностите на показателите на пречупване за изследваните

материали при пет стандартни спектрални линии от видимия диапазон: живачните e– и g–линия ($\lambda = 435,8$ nm), водородните F– и C–линия, и хелиевата d–линия [8]. Поради посилната температурна зависимост на n за полимерите при проведените измервания е използвана V-образната призма от комплектната на рефрактометъра на Пулфрих, която има капаче от неръждаема стомана с огледална вътрешна повърхност и дава възможност за термостатиране. В този случай е достатъчно измерваните пластинки да имат две взаимно перпендикулярни добре полирани повърхности. За осъществяване на оптичен контакт за образци с показател на пречупване $n < 1,55$ е използвано силиконово масло с $n_D = 1,56011$, а при измерването на оптични полимери с $n > 1,55$ – наситен воден разтвор на KJgJ_3 ($n_n = 1,7301$) [7]. За избора на подходяща имерсионна течност предварително са измерени показателите на пречупване на изследваните материали за $\lambda = 653,8$ nm с елипсомерър ЛЕФ–3М-1 с точност от $\Delta n = \pm 0,002$.

Измерването на показателите на пречупване на ОП в близката ИЧ област е осъществено по метода на отклонението с гониметър Г5, даващ възможност за измерване на ъгли с точност от 1". На фиг. 1 е показана схемата на опитната постановка. Осветителният блок се състои от 250W халогенна лампа и набор от интерференчни спектрални филтри с полуширина на пропускане 7–9 nm. За близкия ИЧ диапазон са използвани четири филтъра с максимуми на пропускане съответно 752, 804, 833, 879 и 1052 nm. Полученият от левия колиматор успореден светлинен сноп пада перпендикулярно на външната стена на V–призмата с поставения в нея образец. С помощта на десния колиматор се определя ъгълът γ на който се отклонява светлинният сноп след преминаването си през образца. Отчитането в ИЧ област на спектъра се осъществява с фотодетекторно устройство,



Фиг. 1. Схема на опитна постановка за измерване показателите на пречупване на ОП.

включващо силициев фотодиод, операционен усилвател и индикатор.

Показателят на пречупване на изследвания образец се изчислява чрез зависимостта:

$$n_{\lambda}^2 = N_{\lambda}^2 - \cos \gamma \sqrt{N_{\lambda}^2 - \cos^2 \gamma} \quad (4)$$

където γ е измереният ъгъл, за който е в сила $\gamma = 90^{\circ} - \varphi$. Показателят на пречупване на призмата N_{λ} за произволна дължина на вълната се изчислява с помощта на формулата на Коши–Лоурент (6). Дисперсионните коефициенти за V-призмата са изчислени въз основа на данните за стъклото SF3, от което тя е направена [7].

Поради липсата на данни за показателите на пречупване на ОП в ИЧ част от спектъра е направена косвена проверка за точността на извършените измервания. За целта са сравнени резултатите за видимата област, получени с помощта на три интерференчни филтъра IF 659, IF589 и IF 548, със стойностите на показателите на пречупване за близките спектрални линии на рефрактометъра на Пулфрих. Получена е максимална разлика от $-0,0009$ [8].

РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

С помощта на рефрактометъра на Пулфрих и описаната гониометрична постановка са измерени показателите на пречупване на повече от 10 полимерни материала за 13 дължини на вълната от видимата и близка ИЧ област [8–10]. Анализът на влиянието на случайните и систематични фактори показва, че точността на получените резултати е до третия знак след десетичната запетая [10]. Въз основа на измерените стойности са изчислени числата на Аббе ν_d и ν_e , а също така относителните частни дисперсии за някои двойки от дължини на вълната. Тъй като част от нашите измервания са в близкия ИЧ диапазон, за характеризиране на дисперсията в тази област е определен и коефициент на дисперсията ν_{879} чрез зависимостта:

$$\nu_{879} = \frac{n_{879} - 1}{n_{752} - n_{1052}}, \quad (5)$$

където n_{879} , n_{752} и n_{1052} са стойностите на показателите на пречупване съответно в

средата и в двата края на изследвания спектрален интервал.

В таблица 1 са представени стойностите на показателите на пречупване n_d и n_e , числата на Аббе ν_d и ν_{879} , а също и относителните частни дисперсии $P_{d,c}$ и $P_{g,F}$ за 4 основни ОП–полиметилметакрилат (PMMA), полистирен (PS), поликарбонат (PC), стирен–акрилонитрил (SAN), и 2 запазени марки на ОП – Optorez 1330 и Zeonex E48R, съпоставени със съответните данни на оптичните стъкла BK7, F2 от каталога на SCHOTT [5] и отличаващото се с много ниска дисперсия FPL51 от каталога на OHARA [6].

За да се определи числото на Аббе за близката ИЧ област ν_{879} , е необходимо да се изчислят стойностите на показателите на пречупване за съответните дължини на вълната. За целта е използвана дисперсионната формула на Коши–Лоурент във вида:

$$n_{\lambda}^2 = A_1 + A_2 \lambda^2 + \frac{A_3}{\lambda^2} + \frac{A_4}{\lambda^4} + \frac{A_5}{\lambda^6} + \frac{A_6}{\lambda^8}, \quad (6)$$

където $A_1 - A_6$ са дисперсионни коефициенти, а λ е изразена в микрони. С помощта на създадена от нашия колектив програма OptiColor са определени дисперсионните коефициенти на изследваните материали чрез въвеждането на шест стойности на показателите на пречупване за шест дължини на вълната. Изчислението се осъществява на база система от шест линейни уравнения, която има следният вид:

$$\begin{aligned} n_{\lambda_1}^2 &= A_1 + A_2 \lambda_1^2 + \frac{A_3}{\lambda_1^2} + \frac{A_4}{\lambda_1^4} + \frac{A_5}{\lambda_1^6} + \frac{A_6}{\lambda_1^8} \\ n_{\lambda_2}^2 &= A_1 + A_2 \lambda_2^2 + \frac{A_3}{\lambda_2^2} + \frac{A_4}{\lambda_2^4} + \frac{A_5}{\lambda_2^6} + \frac{A_6}{\lambda_2^8} \\ n_{\lambda_3}^2 &= A_1 + A_2 \lambda_3^2 + \frac{A_3}{\lambda_3^2} + \frac{A_4}{\lambda_3^4} + \frac{A_5}{\lambda_3^6} + \frac{A_6}{\lambda_3^8} \\ n_{\lambda_4}^2 &= A_1 + A_2 \lambda_4^2 + \frac{A_3}{\lambda_4^2} + \frac{A_4}{\lambda_4^4} + \frac{A_5}{\lambda_4^6} + \frac{A_6}{\lambda_4^8} \\ n_{\lambda_5}^2 &= A_1 + A_2 \lambda_5^2 + \frac{A_3}{\lambda_5^2} + \frac{A_4}{\lambda_5^4} + \frac{A_5}{\lambda_5^6} + \frac{A_6}{\lambda_5^8} \\ n_{\lambda_6}^2 &= A_1 + A_2 \lambda_6^2 + \frac{A_3}{\lambda_6^2} + \frac{A_4}{\lambda_6^4} + \frac{A_5}{\lambda_6^6} + \frac{A_6}{\lambda_6^8} \end{aligned} \quad (7)$$

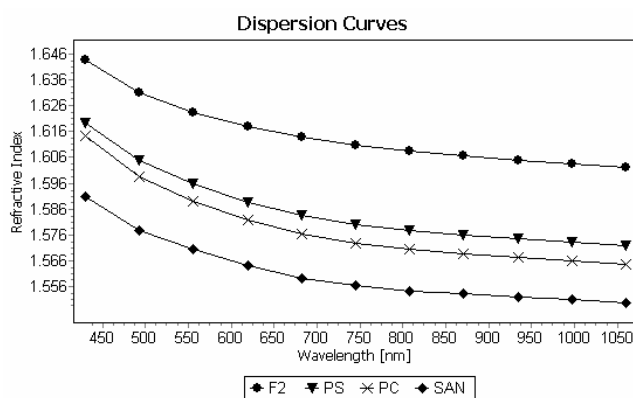
Таблица 1. Сравнителни рефрактометрични и дисперсионни характеристики на 6 ОП и 3 стъкла.

	PMMA	PS	PC	SAN	Optorez 1330	Zeonex E48R	BK7 [5]	F2 [5]	FPL51 [6]
n_d	1,4914	1,5917	1,5849	1,5667	1,5094	1,5309	1,51680	1,62004	1,49700
n_c	1,4934	1,5963	1,5896	1,5705	1,5119	1,5333	1,51872	1,62408	1,49845
V_d	59,20	30,50	29,10	35,42	51,98	65,48	64,17	36,37	81,54
V_{879}	127,24	75,74	72,86	87,71	89,66	133,95	102,28	74,26	140,43
$P_{d,C}$	0,2892	0,2835	0,2786	0,2750	0,2959	0,2872	0,3076	0,2938	0,3057
$P_{g,F}$	0,6265	0,5876	0,6119	0,6187	0,5714	0,5851	0,5349	0,5828	0,5375

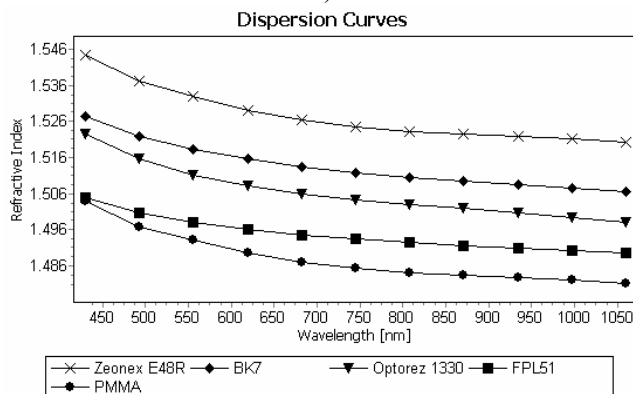
Получените дисперсионни коефициенти да-ват възможност да се изчисли показателя на пречупване за произволна дължина на вълната в областта на нормална дисперсия.

Представа за дисперсионните свойства на веществата може да се получи от дисперсионните им криви, изразяващи зависимостта на показателя на пречупване от дължината на вълната. Такива могат да бъдат изчертани с помощта на програмата OptiColor за произволен оптичен материал в области, които са разположени далече от ивиците на поглъщане. На фиг. 2 са представени диспер-

сионните криви на материалите от табл. 1 в интервал от 435 до 1060 nm. Групирани са поотделно тези с по-висок показател на пречупване ($n > 1,55$ – фиг. 2-а) и по-слабо пречупващите материали с $n < 1,55$ (фиг. 2-б). От табл. 1 се вижда, че подобно разделение е в сила и по отношение на дисперсията. Съответно ОП и стъкла от фиг. 2-а се отличават със значителна дисперсия ($V_d < 40$) за разлика от нискодисперсионните материали с $V_d > 50$ от фиг. 2-б.



а)



б)

Фиг. 2. Дисперсионни криви на ОП и оптични стъкла на а) материали с показатели на пречупване с $n > 1,55$; б) материали с показатели на пречупване с $n < 1,55$.

От представените дисперсионни криви на фиг. 2-а може да се види, че оптичното стъкло F2 се характеризира с най-високи стойности на показателя на пречупване и най-ниска дисперсия. Въпреки че дисперсионните свой-ства на PS и PC са близки (табл. 1 и фиг. 2-а), от фигурата се вижда, че в късовълновата част от видимата област (до 500 nm) PC се характеризира с по-висока дисперсия.

От фиг. 2-б отново се вижда, че дисперсията на Zeonex E48R е близка до тази на оптичното стъкло BK7. Както вече беше споменато, стъклото FPL51 се отличава с много ниска дисперсия.

Изборът на оптичен материал според необходимите за дадено приложение стойности на показателя на пречупване и число на Аббе може да стане с помощта на така наречената n_d/V_d диаграма. На фиг. 3 е представена такава диаграма за изследваните оптични полимери и стъкла. Вижда се, че диапазонът от стойности за оптичните полимери е по-ограничен в сравнение с този на стъклата. Независимо от това компаниите производителки на полимерни материали предлагат все по-разнообразни материали, за които е постигнато добро съчетание на рефрактометрични и дисперсионни свойства.

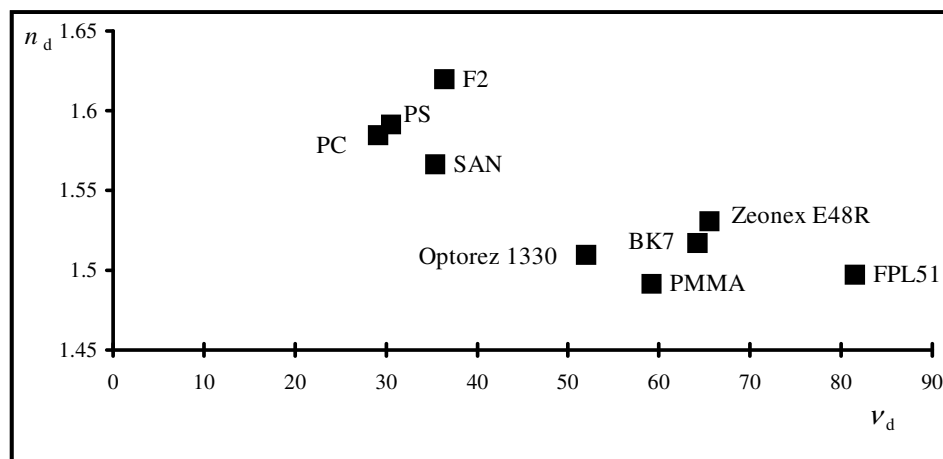
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получени са стойностите на показателите

на пречупване на голям набор от оптични полимерни материали във видимата и близка инфрачервена област на спектъра с рефрактометър на Пулфрих PR2 и установка, включваща гониометър Г5, интерференчни филтри и фотодетекторно устройство (фиг. 1). За характеризирани дисперсионните свойства на изследваните образци са изчислени числата на Аббе V_d , V_c и V_{879} , а също и относителните частни дисперсии $P_{d,c}$ и $P_{g,f}$. Рефрактометричните и дисперсионни характеристики на шест полимерни материала са сравнени с тези на три оптични стъкла – кроновото BK7, флинтовото F2 [5] и отличаващото се с ниски стойности на показателя на пречупване и дисперсията FPL51 [6] (табл. 1).

На база формулата на Коши–Лоурент (6) е създадена програма OptiColor за изчисление дисперсионните криви на изследваните материали на база въведените шест измерени показатели на пречупване (фиг. 2). Представена е и диаграма на зависимостта на показателя на пречупване n_d от числото на Аббе V_d , с помощта на която може да се подбере подходящ за приложни цели материал.

Получените резултати показват, че въпреки по-ограничения избор при използването на полимерни материали, техните рефрактометрични и дисперсионни характеристики са съпоставими с тези на оптичните стъкла. Послабопречупващите PMMA и Optorez 1330



Фиг. 3. n_d/V_d диаграма на шест изследвани оптични полимери и три каталожни оптични стъкла.

имат близки стойности на показателите на пречупване до тези на кроновото стъкло BK7, а PS и PC, отличаващи се с висока пречупвателна способност, могат да се разглеждат като аналог на флинтовото F2. По отношение на дисперсионните си характеристики основните ОП се отличават с по-малки числа на Аббе и следователно с по-висока дисперсия (табл. 1, фиг. 3). Интервалът, в който се срещат стойностите на показателите на пречупване на полимерите, е по-ограничен, отколкото за оптичните стъкла, и следователно изборът в това отношение е по-малък. Независимо от това, нарастващото приложение на ОП поради редица техни предимства стимулира производителите да разработват нови материали с все по-разнообразни рефрактометрични и дисперсионни свойства.

ЛИТЕРАТУРА

- Kogler, K. Selection of plastics for optical applications. <http://amptiac.alionscience.com> 1999.
2. Keyes, D., R. Lamonte, D. McNally and M. Bitritto. Polymers for Photonics. – *Photonics Spectra*, 2001, October, pp. 131-134.
3. Материалы, применяемые для изготовления очковых линз. <http://optik.kiev.ua/>.
4. Essilor International. Ophthalmic optics files. Materials. www.essilor.com/.
5. SCHOTT Glass Technologies. Optical Glass Data SHEETS. www.us.schott.com/.
6. OHARA Corporation. Optical glass catalog. www.oharacorp.com/.
7. Carl Zeiss JENA. The manual of Pulfrich-Refraktometer PR2, Jena D-77830, Germany (1976).
8. Sultanova N.G., I. Nikolov and C. Ivanov. Measuring the refractometric characteristics of optical plastics. – *Optical and Quantum Electronics*, 2003, v.35, pp.21-34.
9. Kasarova S., N. Sultanova, C. Ivanov and I. Nikolov. Analysis of the dispersion of optical plastic materials. – *Optical Materials*, 2007, v. 29, 11, pp. 1481–1490.
10. Касарова С., Н. Султанова, Хр. Иванов и Ив. Николов. Рефрактометрични характеристики на оптични полимери. – *Стандартизация, метрология, сертификация*, 2006, 12, стр. 7 – 12.

Представена за печат на 01.10.2007 г.