

dr Fedor Skuban

Materijali u optici i sočiva

I godina studija Optometrije

- vežbe -

Departman za fiziku, PMF Novi Sad

1

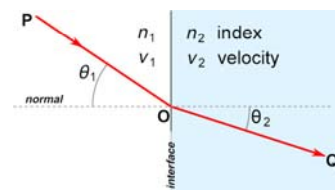
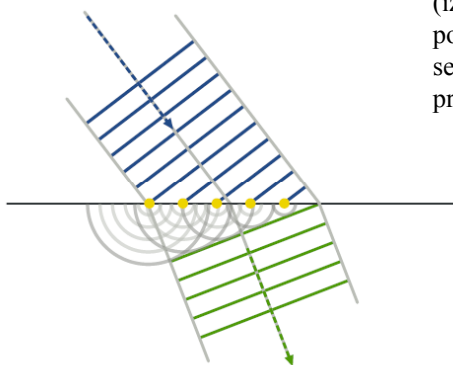
Osnovne osobine materijala u optici

Optičke osobine

1. Prelamanje svetlosti

- ♦ Na granici dve sredine, kroz koje se svetlost prostire različitim brzinama, dolazi do delimičnog odbijanja i do prelamanja svetlosti.

- **Hajgensov princip** – svaka tačka prostora (između ostalog, i na granici dve sredine) pogođena talasom postaje i sama izvor sekundarnih talasa koji se prostiru u svim pravcima.



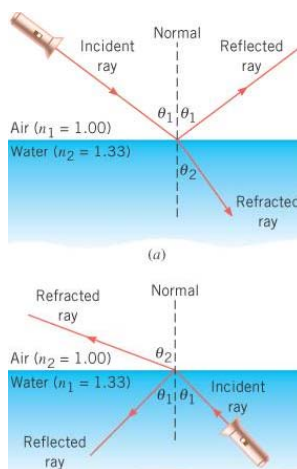
Prelamanje svetlosti na granici
dve sredine 2

Zakoni prelamanja svetlosti

- Pri prelasku svetlosti iz jedne u drugu materijalnu sredinu dolazi do promene pravca prostiranja, tj. do **prelamanja** (refrakcije).

- Zakoni prelamanja (refrakcije) svetlosti:**

- Upadni zrak, normala i prelomljeni zrak leže u istoj ravni.
- Odnos sinusa ugla upadnog zraka θ_1 i sinusa ugla prelomljenog θ_2 zraka je konstantna veličina - **relativni indeks prelamanja** druge sredine u odnosu na prvu (karakterise sredine na čijoj granici se svetlost prelama).



$$n_{2,1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

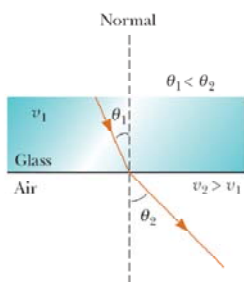
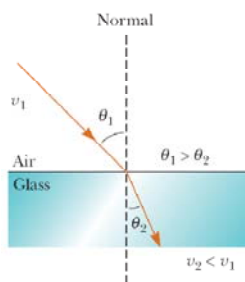
θ_1, θ_2 su upadni i prelomni ugao u odnosu na normalu na graničnu površinu.

3

Zakoni prelamanja svetlosti

- Relativni indeks prelamanja** je odnos brzina svetlosti u I u odnosu na II sredinu:

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$



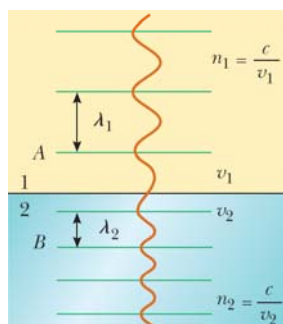
- Apsolutni indeks prelamanja** je odnos brzina svetlosti u vakuumu c i u datoj sredini v :

$$n = \frac{c}{v}$$

4

1. Prelamanje svetlosti

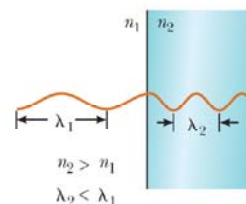
- Talasna dužina** svetlosti pri prostiranju kroz providnu sredinu indeksa prelamanja n se **smanjuje** u poređenju sa λ u vakuumu, a frekvencija talasa (broj oscilacija električnog i magnetnog polja u sekundi) ostaje ista.



$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \lambda_1 \nu \\ v_2 &= \lambda_2 \nu \end{aligned} \right\} v_1 > v_2 \Rightarrow \lambda_1 > \lambda_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Rightarrow \lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

$$\lambda_2 = \frac{n_1 \lambda_1}{n_2}$$



- Ako je prva sredina vakuum (vazduh) sa $n_1=1$ (i $v_1=c$) i u kojoj je talasna dužina svetlosti λ_1 , a druga sredina ima apsolutni indeks $n_2 \equiv n$, tada je talasna dužina svetlosti λ_2 u drugoj sredini n -puta manja:

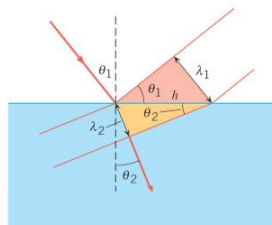
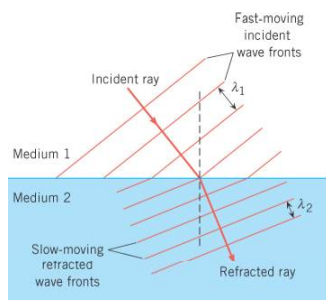
$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n}$$

5

Zakoni prelamanja svetlosti

- Snelov zakon prelamanja**

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_1 &= \frac{\lambda_1}{h} = \frac{v_1 \Delta t}{h} = \frac{c \Delta t}{h n_1} \\ \sin \theta_2 &= \frac{\lambda_2}{h} = \frac{v_2 \Delta t}{h} = \frac{c \Delta t}{h n_2} \end{aligned} \right\} \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



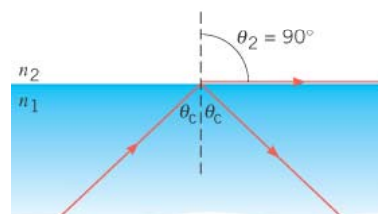
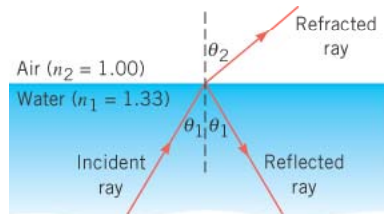
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Optički gušća sredina** ima veći indeks prelamanja (svetlost se sporije prostire kroz nju).

6

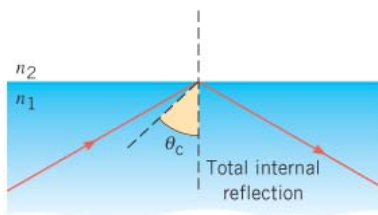
Totalna refleksija

- Pri prelasku **iz optički gušće u optički ređu** sredinu, za upadne uglove svetlosti veće od nekog graničnog θ_c , dolazi do potpunog odbijanja svetlosti na granici dve sredine - **totalna refleksija**.



$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (n_1 > n_2)$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2)$$



7

1. Prelamanje svetlosti - indeks prelamanja

- Indeks prelamanja n uvek dat za određenu talasnu dužinu.
 - Evropa:** $\lambda=546.07 \text{ nm}$ (e zelena linija u spektru Hg)
 - SAD:** $\lambda=587.56 \text{ nm}$ (d žuta linija u spektru He)
- Indeks prelamanja materijala koji se danas koriste u oftalmološkoj optici ide od ~ 1.5 (standardna stakla i plastike) do 1.9 kod najnovijih materijala.

8

1. Prelamanje svetlosti - indeks prelamanja

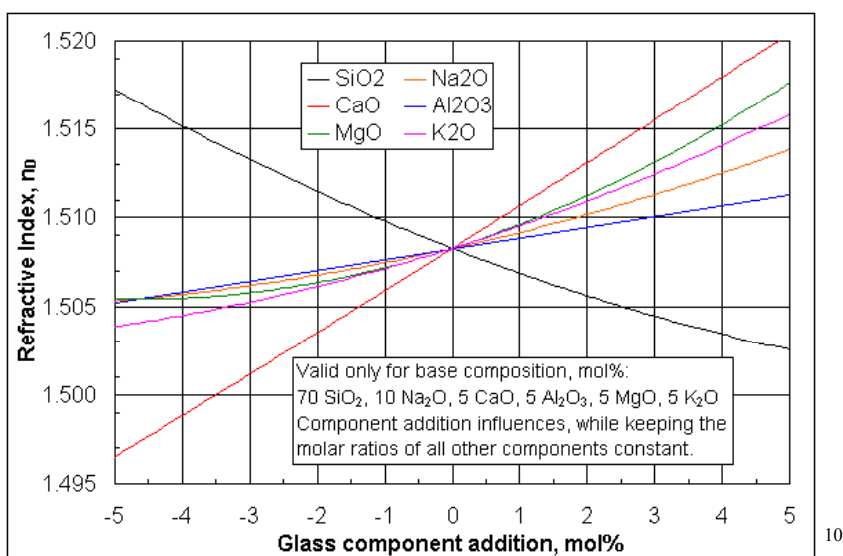
- ♦ Prema indeksu prelamanja materijali za sočiva se dele u sledeće grupe:
 - materijali **normalnog** indeksa, $1.48 \leq n < 1.54$
 - materijali **srednjeg** indeksa, $1.54 \leq n < 1.64$
 - materijali **visokog** indeksa, $1.64 \leq n < 1.74$
 - materijali **veoma visokog** indeksa, $1.74 \leq n$
- ♦ **Zakrivljenost površine** sočiva neophodna da se postigne odgovarajuća optička moć **obrnuto** je srazmerna **indeksu prelamanja**. Otuda su sočiva većeg indeksa prelamanja manje debljine i manje zakrivljenosti površina.

9

1. Indeks prelamanja

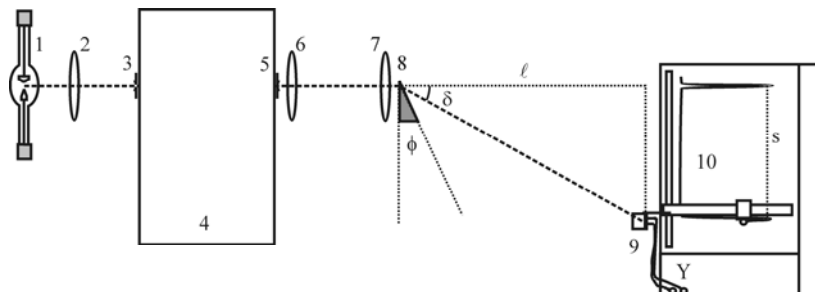
Donji dijagram pokazuje uticaj sastava stakla na indeks prelamanja

n



Merenje indeksa prelamanja

1. Merenje indeksa prelamanja metodom prizme



- Meri se rastojanje s i ℓ , kao i ugao pri vrhu prizme ϕ .

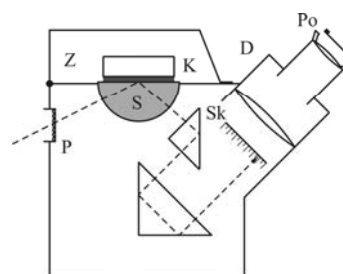
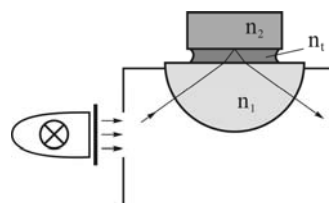
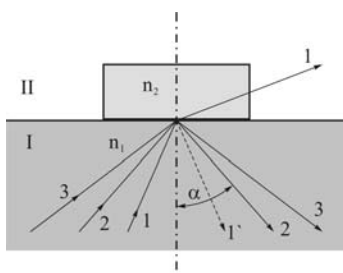
$$n = \frac{\sin(\phi + \delta)}{\sin \phi} \quad \delta = \arctg \frac{s}{\ell}$$

11

Merenje indeksa prelamanja

2. Merenje indeksa prelamanja refraktometarskim metodama

a) Kristalni refraktometar



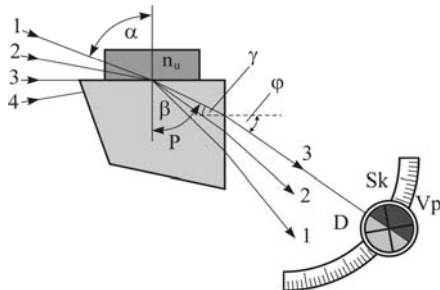
- Ograničenje mernog opsega indeksom prelamanja merne prizme i **imerzione tečnosti** ($n_t \geq n_2$ i $n_t \geq n_1$)
- Metilen-jodid $n_t = 1.79 - 1.81$
- Direktno očitavanje** indeksa prelamanja

12

Merenje indeksa prelamanja

2. Merenje indeksa prelamanja refraktometarskim metodama

b) Pulfrihov refraktometar



$$n_u = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi}$$

- ◆ Ograničenje mernog opsega indeksom prelamanja merne prizme i imerzione tečnosti
- ◆ **Direktno očitavanje** ugla φ , a uz poznavanje vrednosti indeksa prelamanja merne prizme n_p , moguće je izračunati indeks prelamanja materijala

13

2. Faktor promene zakrivljenosti - CVF

- ◆ **Relativna zakrivljenost** ili **Faktor promene zakrivljenosti** (*curvature variation factor*) - **CVF** je veličina koja daje informaciju o zakrivljenosti, odnosno debljini sočiva u funkciji indeksa **prelamanja**.
- ◆ **Primer**: ako se poređenje vrši u odnosu na klasično **kron staklo** ($n_d=1.523$), a obično se porede druga stakla, sočivo od materijala sa $n_d=1.700$ će imati $CVF=0.75$, odnosno za 25 % manju debljinu (zakrivljenost).

Drugim rečima, sočivo od materijala indeksa $n_d=1.700$ jačine $-10.00D$ ima oblik kao sočivo od kron stakla indeksa $n_d=1.523$ jačine $-7.50D$.

- ◆ Faktor promene zakrivljenosti za staklaste materijale je **odnos sposobnosti prelamanja** kron stakla i datog materijala i upoređuje realne zakrivljenosti (krivine) dobijene od kron stakla i od datog materijala:

$$CVF = \frac{1.523 - 1}{n_d - 1} = \frac{0.523}{n_d - 1}$$

14

Neke fizičke osobine materijala sa naočalna sočiva						
Materijal	n_d	n_e	Faktor zakrivljenosti VF	Gustina	Abeov broj	$\rho(\%)$
Stakla						
belo kron	1.523	1.525	1	2.5	59	4.3
lak Flint	1.6	1.602	0.87	2.6	42	5.3
1.7 stakla	1.701	1.706	0.75	3.2	42	6.7
1.8 stakla	1.802	1.808	0.65	3.7	35	8.2
1.9 stakla	1.885	1.892	0.59	44	31	9.4
Plastike						
PMMA	1.49	1.492	1.07	1.2	58	3.9
CR39	1.498	1.5	1.05	1.3	58	4
Trivex	1.532	1.534	0.98	1.1	46	4.4
Sola Spectralite	1.537	1.54	0.97	1.2	47	4.5
PPG HIP	1.56	1.53	0.93	1.2	38	4.8
Polikarbonat	1.586	1.589	0.89	1.2	30	5.2
Poliuretani	1.6	1.603	0.87	1.3	36	5.3
	1.66	1.664	0.79	1.4	32	6.5
Hoya Teslalid	1.71	1.715	0.74	1.4	36	6.9
Nikon	1.74	1.745	0.71	1.4	32	7.3

15

2. Faktor promene zakrivljenosti - CVF

- Faktor promene zakrivljenosti se može posebno definisati i za plastične materijale za sočiva i predstavlja odnos sposobnosti prelamanja CR39 plastičnog materijala i datog materijala i upoređuje realne zakrivljenosti (krivine) dobijene CR39 i od datog materijala:

$$CVF = \frac{1.498 - 1}{n_d - 1} = \frac{0.498}{n_d - 1}$$

- U opštem slučaju, upoređivanje se može vršiti i u odnosu na bilo koji proizvoljni materijal. U proizvodnji materijala za sočiva se uvek može vršiti upoređivanje novoproducenog sa "starim" materijalom i tako videti koliko će on doprineti promeni oblika sočiva:

$$CVF = \frac{"stari"-1}{"novi"-1}$$

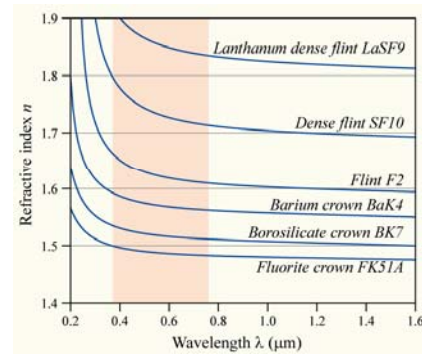
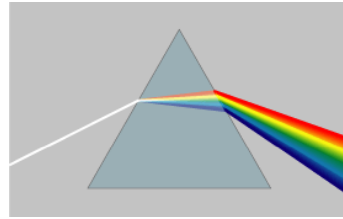
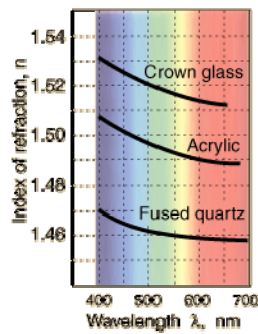
16

3. Hromatična disperzija

- ♦ Za većinu providnih materijala (kao što su stakla), u vidljivom delu spektra važi:

$$1 < n(\lambda_{\text{red}}) < n(\lambda_{\text{yellow}}) < n(\lambda_{\text{blue}})$$

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0$$



Zavisnost indeksa prelamanja od talasne dužine - **disperzija**



17

3. Hromatična disperzija

- ♦ Zavisnost indeksa prelamanja n od talasne dužine svetlosti λ može se opisati sledećim relacijama:

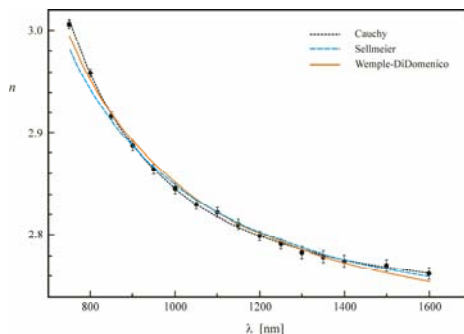
a) Košijev model

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}$$

b) Zelmajerov model

$$n^2 = 1 + \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_o^2}$$

Primer



- ♦ Matematički modeli omogućavaju da se na osnovu eksperimentalnih rezultata za n nacrtaju **disperziona kriva** $n=f(\lambda)$ i procenjuje **veličina indeksa prelamanja** i za one vrednosti λ za koje nije vršeno merenje.

18

3. Hromatična disperzija

- ♦ Usled činjenice da je $n=f(\lambda)$ za materijale u optici se definišu neke veličine koje ukazuju na ovu zavisnost, odnosno kvantitativno opisuju ovu pojavu:

- **srednja disperzija** je razlika indeksa prelamanja za dve određene talasne dužine:

$$D = n_f - n_c$$

- **disperziona sposobnost (moć, snaga) ω** je odnos između karakterističnih indeksa prelamanja definisanih za tri određene talasne dužine:

$$\omega = \frac{n_f - n_c}{n_d - 1}$$

19

3. Hromatična disperzija

- ♦ **Abeov broj, v-broj** ili **constringence** ("stišljivost") je recipročna vrednost disperzione sposobnosti i karakteristična vrednost svake providne supstance:

u SAD:
$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c}$$

$n_d \leftarrow \lambda_d = 587.56 \text{ nm}$	(zuta linija He)
$n_f \leftarrow \lambda_f = 486.13 \text{ nm}$	(plava linija H)
$n_c \leftarrow \lambda_c = 656.27 \text{ nm}$	(crvena linija H)

u Evropi:
$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{f'} - n_{c'}}$$

$n_e \leftarrow \lambda_e = 546.07 \text{ nm}$	(zelena linija Hg)
$n_{f'} \leftarrow \lambda_{f'} = 479.99 \text{ nm}$	(plava linija Cd)
$n_{c'} \leftarrow \lambda_{c'} = 643.85 \text{ nm}$	(crvena linija Cd)

- ♦ Indeksi prelamanja u ovim relacijama su definisani za određene talasne dužine svetlosti, za tzv. **Fraunhoferove linije**, tamne linije (prekide) u Sunčevom kontinualnom spektru.
- ♦ Ima ih preko hiljadu, a samo neke su odabrane kao karakteristične.

20

3. Hromatična disperzija - Fraunhoferove linije

oznaka indeksa	talasna dužina [nm]	Fraunhoferova linija u spektru
n_e	546.07	e zelena linija Hg
n_d	587.56	d žuta linija He (constringence)
n_D	589.29	D žuta linija Na (sredina dubleta) (Abeov broj)
$n_f(n_F)$	486.13	f (F) plava linija H
$n_{f'}(n_{F'})$	479.19	f' (F') plava linija Cd
$n_c(n_C)$	656.27	c (C) crvena linija H
$n_{c'}(n_{C'})$	643.85	c' (C') crvena linija Cd

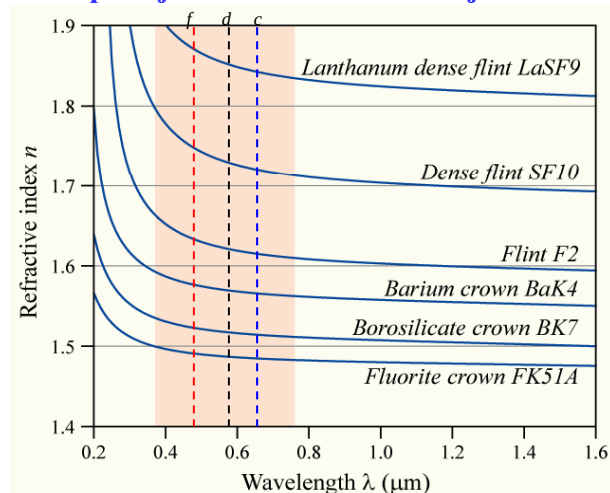
$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c}$$

- Disperzione osobine materijala (srednja disperzija, disperziona moć i Abeov broj) se određuju istim metodama kao i za indeks prelamanja na jednoj talasnoj dužini. Neophodno je obezbediti monohromatsku svetlost pojedinih talasnih dužina u skupu Fraunhoferovih linija.

21

3. Hromatična disperzija - Fraunhoferove linije

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c}$$

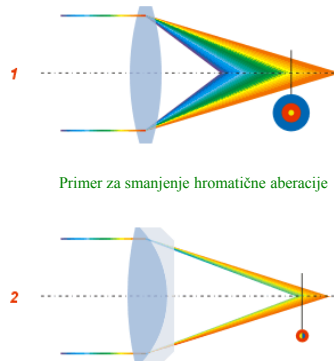


- Što je veća razlika $n_f - n_c$ (brže opadanje n , strmija kriva) i istovremeno manja vrednost za n_d – **manji je Abeov broj** v_d – a to je **negativna osobina materijala**.

22

3. Hromatična disperzija

- ◆ Abeov broj je **obrnuto srazmeran** hromatičnoj disperziji materijala, odnosno što je **veća** njegova vrednost – **manja** je hromatična disperzija, što ukazuje na **bolji** kvalitet materijala sočiva.
- ◆ Vrednosti Abeovog broja idu od **60** (najmanje hromatični materijali) do **30** (veoma hromatični materijali).
- ◆ Hromatičnost je zanemarljiva u centru korektivnog sočiva, a dolazi do izražaja po **obodu** sočiva. U ovom slučaju se manifestuje pojavom **obojenih pruga** po ivicama objekata udaljenih od optičke ose sočiva.
- ◆ Ova **negativna pojava**, posledica hromatične disperzije, ($n=f(\lambda)$), naziva se **hromatična aberacija** (longitudinalna ili transverzalna – TCA).

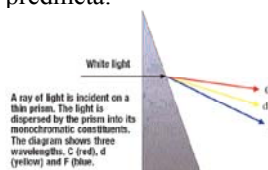


Primer za smanjenje hromatične aberacije

23

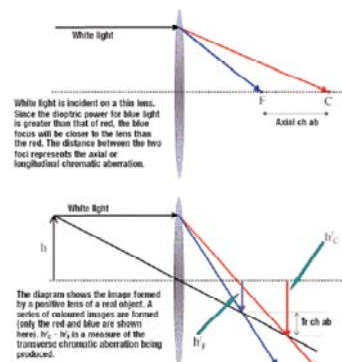
3. Hromatična disperzija

- ◆ Ugaona, tj. **transverzalna hromatična disperzija** (TCA), kao karakteristika materijala, je aberacija usled koje tanka sočiva stvaraju višestruke (obojene) slike predmeta.



- ◆ **TCA** se može kvantitativno izraziti preko **razlike u visini likova** koje formira sočivo za dve odabrane talasne dužine (f – plava boja, i – crvena boja):

$$h_c - h_f$$



- ◆ **Longitudinalna hromatična aberacija** se može kvantitativno izraziti preko **uzdužnog rastojanja između likova** koje formira sočivo za dve odabrane talasne dužine, odnosno preko rastojanja odgovarajućih žiža:

$$f_c - f_f$$

24

3. Hromatična disperzija

- ♦ TCA se takođe može kvantitativno izraziti (u jedinicama prizmatičnim dioptrijama $[\Delta]$ – to je mera skretanja zraka na prizmi*) preko **Abeovog broja v** i **prizmatičnog efekta $P=c \cdot F$** u bilo kojoj **određenoj tački sočiva**:

$$TCA = \frac{c \cdot F}{v}$$

c – je rastojanje date tačke sočiva od centra sočiva (u [cm])

F – moć sočiva u datom smeru (u dioptrijama [D])

v – Abeov broj

- ♦ Očigledno, **efekat se povećava** sa udaljavanjem od centra sočiva (c) i manji je kod materijala sočiva sa većim Abeovim brojem.
- ♦ Generalno je prihvaćeno da je prihvatljiva vrednost **$TCA = \pm 0.1\Delta$** . Iz ove vrednosti proizilazi da se može izračunati **poluprečnik c kruga** od centra sočiva unutar kojeg je efekat hromatične aberacije **neznatan**:

$$0.1 \frac{v}{F} = c \text{ [cm]} \Rightarrow$$

$$c \text{ [mm]} = \frac{v}{F}$$

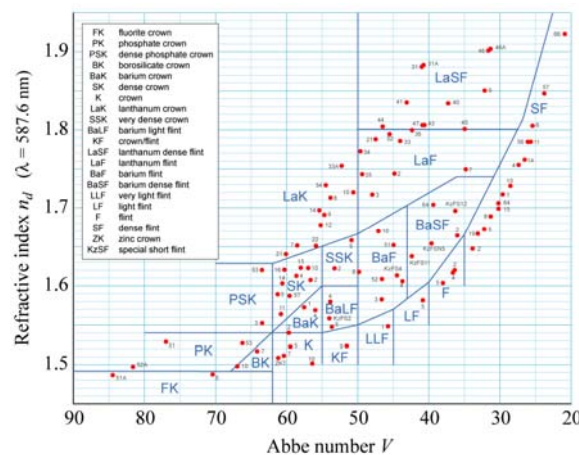
Primer: Sočivo -2.00 D, od polikarbonata ($v=30$) $\Rightarrow$ oko neće detektovati TCA u **prečniku** od 30 mm oko centra sočiva.

* 1 Δ predstavlja skretanje zraka na prizmi u iznosu od 1 cm, na rastojanju od 1 m.

25

3. Hromatična disperzija

- ♦ Iskustvo pokazuje da **nema značajnog** perceptivnog efekta hromatičnosti materijala sočiva za većinu korisnika korektivnih sočiva.
- ♦ **Abeov dijagram** (mapa stakala) - pokazuje međuzavisnost **indeksa prelamanja n** i **Abeovog broja v** .



26

3. Hromatična disperzija

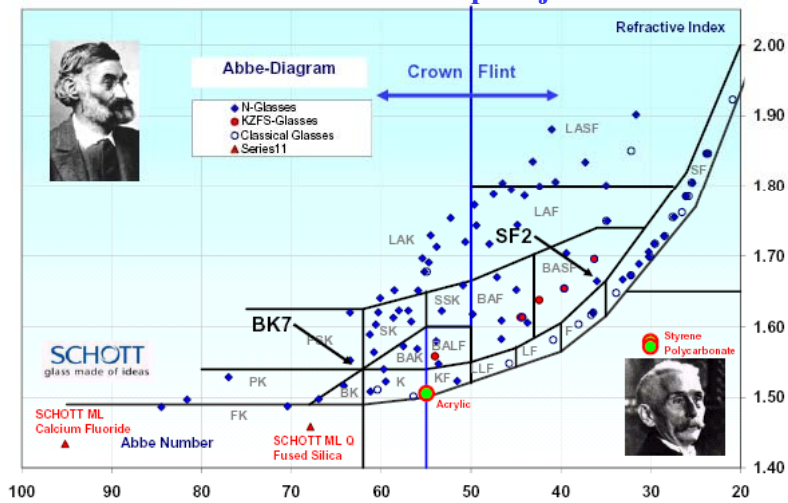


Figure 1 shows a typical Abbe diagram provided by SCHOTT AG. The location BK7 and SF2, two of the more popular and commonly used glass materials, have been noted. Some common plastic lenses have been included for reference.

27

3. Hromatična disperzija

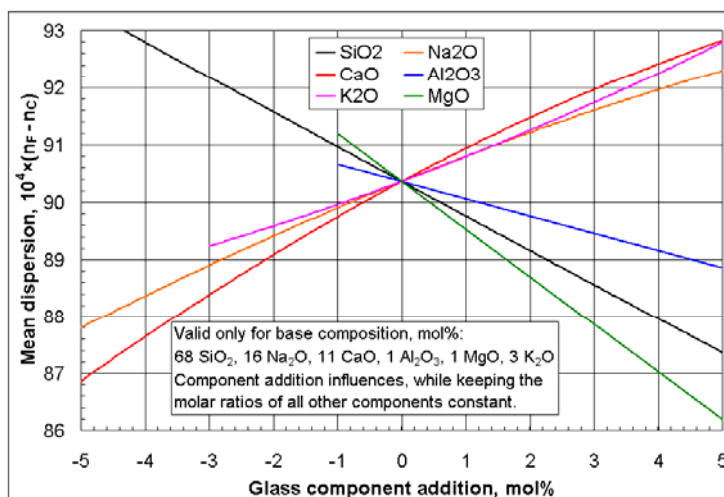
- ◆ Prema Abeovom broju materijali za sočiva se mogu svrstati u tri osnovne grupe:
 - materijali **male disperzije**, $v \geq 45$
 - materijali **srednje disperzije**, $39 \leq v < 45$
 - materijali **visoke disperzije**, $v < 39$
- ◆ Uobičajena stakla (kron) i plastični materijali (CR 39) imaju Abeov broj oko **59** i daju mali efekat pojavi obojenih pruga po ivicama objekata udaljenih od ose sočiva.
- ◆ Pre 1970-ih godina, stakla sa indeksom oko 1.700 su imala visoku disperziju (oko 30).
- ◆ U današnje vreme se radi na razvoju materijala indeksa 1.700 sa Abeovim brojem oko 40.

28

3. Hromatična disperzija

Donji dijagram pokazuje uticaj sastava stakla na **srednju disperziju**

$$D = n_f - n_c$$

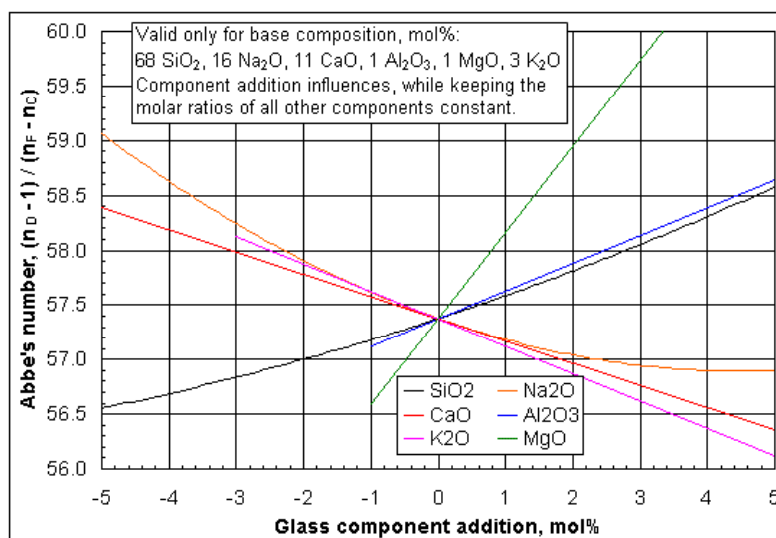


29

3. Hromatična disperzija

Donji dijagram pokazuje uticaj sastava stakla na **Abeov broj**.

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c}$$



30

3. Hromatična disperzija

- Indeks prelamanja n , srednja disperzija $D = n_f - n_c$ i Abeov broj v_d **za stakla** se mogu računskim putem odrediti, na osnovu podataka za sastavne okside stakala (ukupno ih ima k) i njihovog sadržaja c_i .

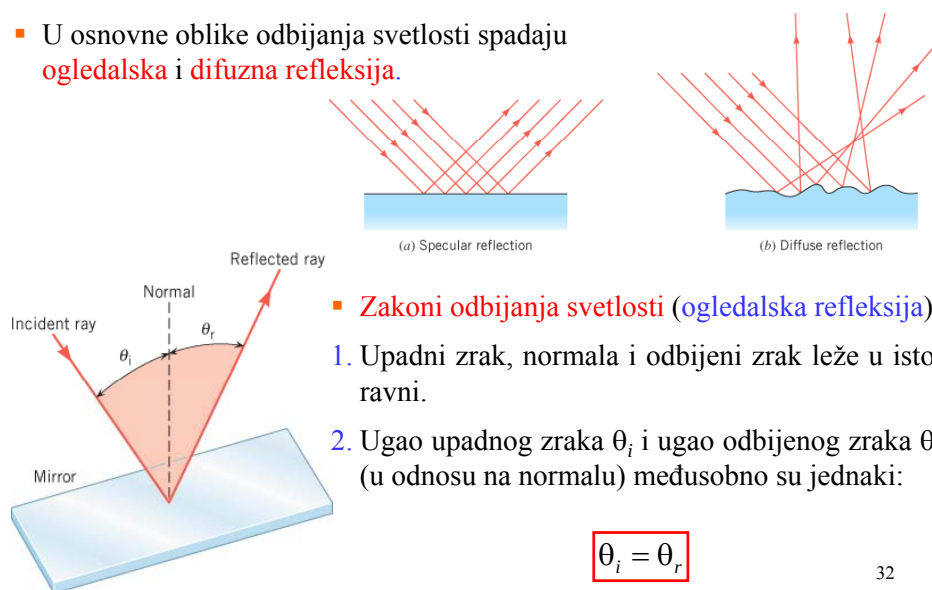
$$n_d = \frac{\sum_{i=1}^k n_{d,i} \cdot c_i}{100} \quad D = \frac{\sum_{i=1}^k D_i \cdot c_i}{100} \quad \Rightarrow \quad v_d = \frac{n_d - 1}{D}$$

- Na ovaj način se mogu praviti materijali sa željenim optičkim osobinama, ali ne treba izgubiti iz vida činjenicu da promena sastava utiče i na ostale osobine (optičke, termičke, mehaničke, ...).

31

Geometrijska optika. Zakoni odbijanja svetlosti

- U osnovne oblike odbijanja svetlosti spadaju **ogledalska** i **difuzna refleksija**.



- Zakoni odbijanja svetlosti (ogledalska refleksija):**

- Upadni zrak, normala i odbijeni zrak leže u istoj ravni.
- Ugao upadnog zraka θ_i i ugao odbijenog zraka θ_r (u odnosu na normalu) međusobno su jednaki:

$$\theta_i = \theta_r$$

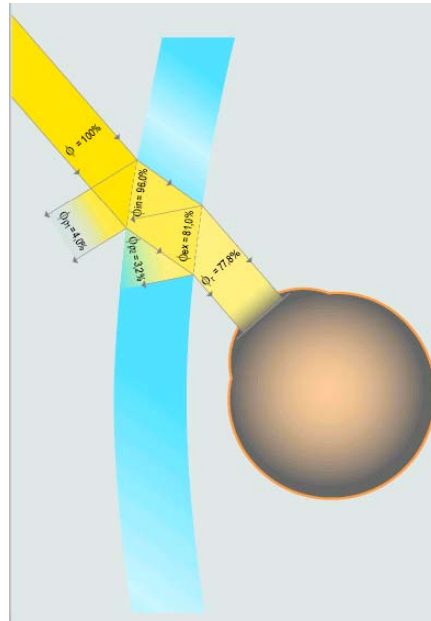
32

4. Refleksija svetlosti

- Istovremeno sa prelamanjem javlja se i odbijanje na obe površine sočiva (prednjoj i zadnjoj).
- Stepen refleksije se izražava reflektancom (koeficijent refleksije), odnosom reflektovanog ϕ_p i upadnog svetlosnog fluksa ϕ :

$$\rho = \frac{\phi_p}{\phi}$$

Prelamanje, odbijanje i apsorpcija svetlosti oftalmološkog sočiva (indeksa prelamanja 1.5 sa 15 % apsorpcije) →



33

4. Refleksija svetlosti

- Što je veći indeks prelamanja, više svetlosti se izgubi usled odbijanja.
- Poznavanje indeksa prelamanja materijala sočiva omogućava određivanje procenta reflektovane svetlosti od njegovih površina.
- U slučaju **normalnog upada** svetlosti na materijal sočiva u vazduhu (kao okolnoj sredini), pod uslovom da sočivo nije bojeno niti ima antirefleksionu prevlaku, reflektanca, u slučaju **jednostruke refleksije**, zavisi od indeksa prelamanja materijala n (Frenel-ova relacija):

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

indeks prelamanja	CR39 1.498	kron 1.523	1.600	D flint 1.701	EDF 1.800	1.900	Dijamant
ukupna reflektovana svetlost (jednostruka refleksija), ρ [%]	4.0	4.3	5.3	6.7	8.2	9.6	17.2

34

4. Refleksija svetlosti

- Ukoliko **zanemarimo apsorpciju** svetlosti u sočivu, možemo doći do izraza za ukupnu reflektovanu svetlost sa **obe** strane sočiva u slučaju **jednstrukog** odbijanja od graničnih površina:

- sa **prednje strane** se reflektuje deo svetlosnog fluksa $\phi_p = \rho\phi$
- sa **zadnje strane**, na koju stiže $\phi - \rho\phi = \phi(1 - \rho)$ od upadnog svetlosnog fluksa, odbije se i izlazi iz sočiva (ako **zanemarimo višestruku refleksiju**) $\rho\phi(1 - \rho)$
- ukupan **efekat refleksije** je zbir ova dva doprinosa:

$$\rho\phi + \rho\phi(1 - \rho) = \rho\phi(2 - \rho) = \phi_{p, uk}$$

$$\frac{\phi_{p, uk}}{\phi} = \rho(2 - \rho)$$

- Koeficijent refleksije ρ se koristi kao **mera** (pokazatelj) **slabljenja** (atenuacije) **svetlosti** u izrazima za izlazni svetlosni fluks iz sočiva.
- Pošto refleksija zavisi od talasne dužine λ , uvodi se pojam **spektralnog koeficijenta refleksije** ρ_λ , koji je određen za svaku vrednost λ .

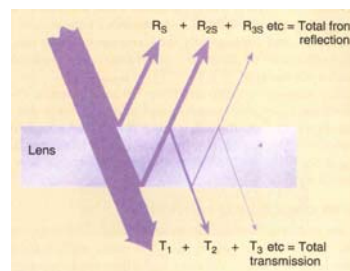
35

4. Refleksija svetlosti

- U slučaju da se na sočivima dešava **višestruka refleksija** bez unutrašnje apsorpcije, ukupan efekat refleksije se računa iz:

$$R = \frac{2\rho}{1 + \rho}$$

indeks prelamanja	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	dijamant
ukupna reflektovana svetlost, R [%]	7.6	10.1	12.6	15.1	17.6	29.4



- Gubici usled refleksije svetlosti, naročito kod sočiva od materijala visokog indeksa prelamanja znatno se mogu smanjiti stavljanjem **višeslojnih antirefleksionih prevlaka**.

36

4. Refleksija svetlosti

- ♦ **Relativni koeficijent refleksije u vidljivom području** ρ_V - karakteriše vizuelni efekat refleksije uzimajući u obzir osetljivost oka prema svetlosti različitih talasnih dužina:

$$\rho_V = \frac{\int_{380}^{780} \rho_\lambda \phi_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int_{380}^{780} \phi_\lambda V_\lambda d\lambda}$$

Veličina ρ_λ - je spektralni koeficijent refleksije,

ϕ_λ - upadni spektralni fluks, i

V_λ - relativna spektralna svetlosna osetljivost (efikasnost) oka.

Sve ove veličine su definisane za **datu talasnu dužinu**.

37

5. Apsorpcija svetlosti

- ♦ Apsorpcija svetlosti u sočivima je pojava smanjenja intenziteta svetlosnog fluksa usled **interakcije sa materijalom** sočiva koji se dešava između prednje i zadnje strane sočiva.
- ♦ U **bojenim** (*tinted*) i **fotohromnim** sočivima (koja menjaju optičke osobine usled osvetljavanja UV zracima) ova pojava je značajna.
- ♦ Koeficijent **unutrašnje** **apsorpcije** se definiše kao odnos ukupne apsorbovane svetlosti ($\phi_a = \phi_{in} - \phi_{ex}$) i ulaznog fluksa ϕ_{in} :

$$\alpha_i = \frac{\phi_{in} - \phi_{ex}}{\phi_{in}}$$

$$\alpha_i = \frac{\phi_a}{\phi_{in}}$$

- ♦ Unutrašnja apsorpcija svetlosti se dešava u skladu sa **Lambertovim zakonom**:

$$\phi_{ex} = \phi_{in} \exp(-kx)$$

Veličina k - je **koeficijent ekstinkcije** materijala, a x - debljina materijala.

38

5. Apsorpcija svetlosti

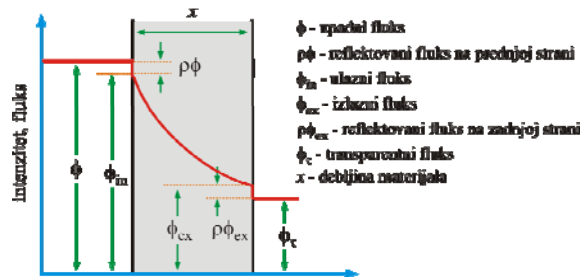
- Koeficijent unutrašnje apsorpcije α_i je, u slučaju eksponencijalnog opadanja intenziteta svetlosnog fluksa, dat relacijom:

$$\alpha_i = 1 - \frac{\phi_{ex}}{\phi_{in}} = 1 - \frac{\phi_{in} \exp(-kx)}{\phi_{in}} \quad \boxed{\alpha_i = 1 - \exp(-kx)}$$

- Koeficijent apsorpcije α_i koristi se kao **mera** (pokazatelj) **slabljenja** (atenuacije) **svetlosti** u izrazima za izlazni svetlosni fluks iz sočiva.

$$\boxed{\phi_{ex} = \phi_{in} (1 - \alpha_i)}$$

- Slično kao u slučaju refleksije svetlosti, i kod apsorpcije se definiše **spektralni koeficijent apsorpcije** $\alpha_{\lambda i}$, kao posledica činjenice da i apsorpcija zavisi od talasne dužine svetlosti.



39

6. Transparencija svetlosti

- Transparenciju materijala sočiva karakteriše svetlosni fluks koji ono propusti nakon što se uzmu u obzir efekti refleksije i apsorpcije.

$$\phi = \phi_p + \phi_a + \phi_t$$

- Koeficijent transparencije** τ je odnos propuštenog ϕ_t i upadnog svetlosnog fluksa ϕ :

$$\boxed{\tau = \frac{\phi_t}{\phi}}$$

- Ova veličina delom zavisi od efekata **apsorpcije** u materijalu, što se može opisati koeficijentom unutrašnje apsorpcije α_i , ali i tzv. **koeficijentom unutrašnje transparencije** τ_i , a delom od efekata **višestruke refleksije**, što se opisuje ili koeficijentom refleksije ρ , ili tzv. "**refleksionog faktora**" **P**.

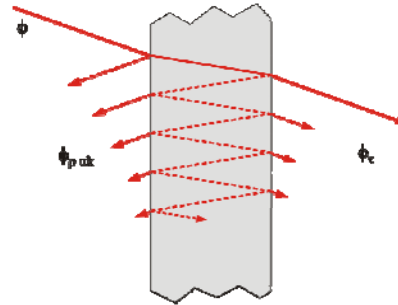
$$\boxed{\tau = \frac{\phi_t}{\phi} = P \cdot \tau_i}$$

40

6. Transparencija svetlosti

- Koeficijent **unutrašnje** transparencije τ_i – je odnos izlaznog fluksa ϕ_{ex} i ulaznog svetlosnog fluksa ϕ_{in} :

$$\tau_i = \frac{\phi_{ex}}{\phi_{in}} \quad \tau_i = 1 - \alpha_i$$



- "Refleksioni faktor" P – posledica je **višestrukih refleksija** na prednjoj i zadnjoj površini:

$$P \approx \frac{(1-\rho)^2}{1-\rho^2} = \frac{2n}{n^2+1}$$

- Koeficijent transparencije τ je u slučaju **višestruke refleksije** i pojava delimične apsorpcije svetlosti u materijalu dat preko:

$$\tau = \frac{\phi_{\tau}}{\phi} \approx \frac{(1-\rho)^2}{1-\rho^2} \cdot (1-\alpha_i) = \frac{2n}{n^2+1} \cdot (1-\alpha_i)$$

41

6. Transparencija svetlosti

- Koeficijent transparencije takođe zavisi od talasne dužine svetlosti i iz tog razloga se uvodi pojam **spektralnog koeficijenta transparencije** τ_{λ} .
- Kriva transparencije** je veoma značajna karakteristika materijala oftalmoloških sočiva jer opisuje fizičke osobine svetlosnog filtra sočiva.
- Kriva transparencije je funkcija $\tau_{\lambda}=f(\lambda)$ koja daje **spektralnu selektivnost filtra sočiva**, a omogućuje da se nađe i **ukupna transparencija u odabranom spektralom području** (od λ_1 do λ_2).

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} \phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{\lambda} d\lambda}$$

ϕ_{λ} - je upadni spektralni fluks.

42

6. Transparencija svetlosti

- ♦ Relativni koeficijent transparencije τ_V u vidljivoj oblasti spektra je odnos propuštenog i upadnog svetlosnog fluksa s obzirom na osetljivost oka prema različitim talasnim dužinama svetlosti:

$$\tau_V = \frac{\int_{380}^{780} \tau_\lambda \phi_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int_{380}^{780} \phi_\lambda V_\lambda d\lambda}$$

Veličina τ_λ - je spektralni koeficijent transparencije,

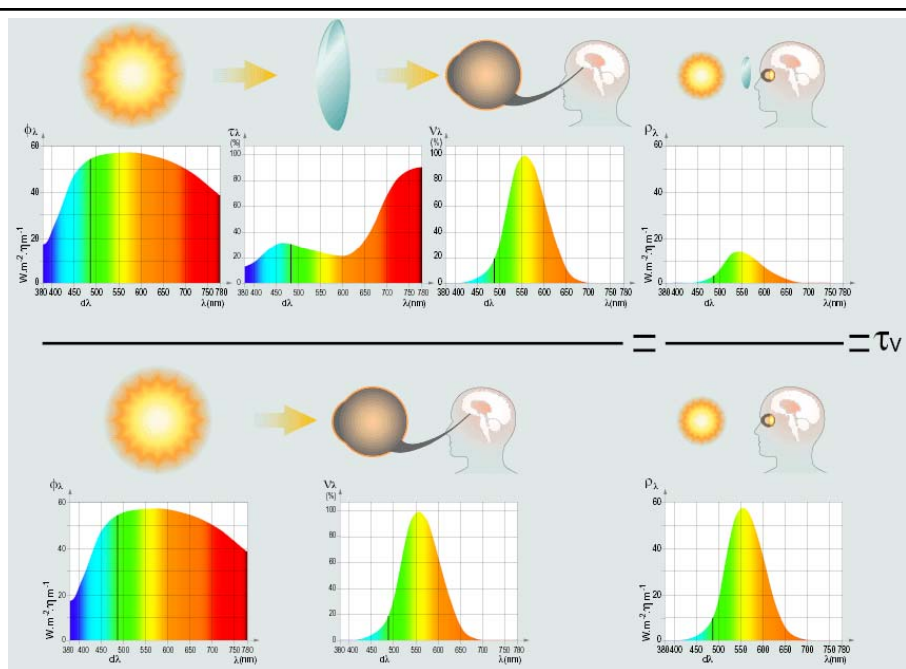
ϕ_λ - upadni spektralni fluks, i

V_λ - relativna spektralna svetlosna osetljivost (efikasnost) oka.

Sve ove veličine su definisane za datu talasnu dužinu.

- ♦ Relativni koeficijent transparencije τ_V se koristi da opiše i klasifikuje sunčane naočari.

43



Transparencija oftalmoloških sočiva s obzirom na osetljivost oka

44

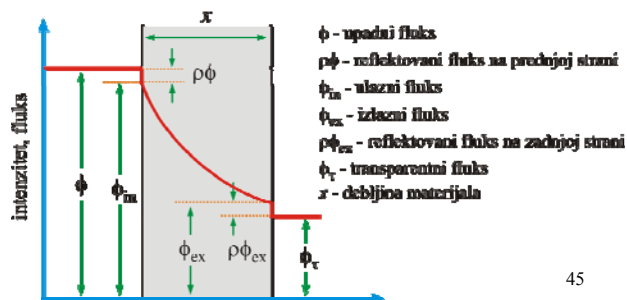
6. Transparencija svetlosti

♦ Na osnovu svega pomenutog, može se izračunati ukupan svetlosni fluks koji nakon **apsorpcije** i **refleksije** dostiže spoljašnju zadnju stranu sočiva:

- nakon delimične **refleksije**, svetlosni fluks koji **ulazi** u sočivo je: $\phi_{in} = \phi - \rho\phi = \phi(1-\rho)$

- ovaj fluks **slabi** usled **apsorpcije** i stiže do zadnje strane sočiva: $\phi_{ex} = \phi_{in}(1-\alpha_i) = \phi(1-\rho)(1-\alpha_i)$

- nakon **refleksije** na zadnjoj površini, **izlazeći fluks** iznosi $\phi_{\tau} = \phi_{ex}(1-\rho) \Rightarrow \phi_{\tau} = \phi(1-\rho)^2(1-\alpha_i)$.



45

6. Transparencija svetlosti

♦ Neophodnost zaštite očiju od štetnog

UV-A (315-380 nm),

UV-B (280-315 nm), i

UV-C (200-280 nm)

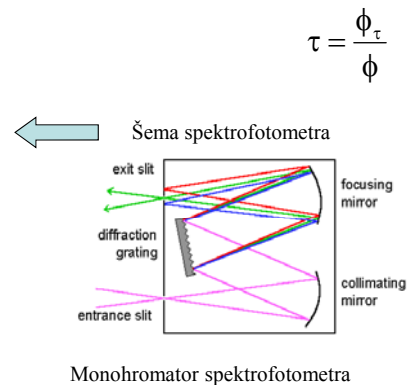
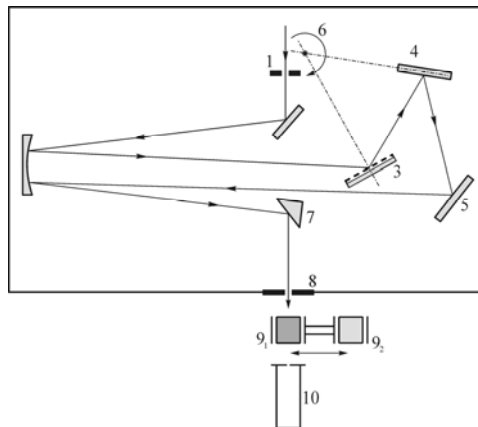
zračenja uvodi parametar koji definiše **spособnost apsorpcije** ovog zračenja od strane materijala sočiva.

♦ **UV granica odsecanja** (*UV cut-off*) ili granica propuštanja je talasna dužina ispod koje sočiva propuštaju maksimalno **1 %** svetlosti koju određuje kriva transparencije sočiva.

46

Merenje transparentnosti materijala

- ♦ Merenje transparentnosti daje informaciju o ukupnom efektu refleksije i apsorpcije materijala sočiva
- ♦ Meri se intenzitet monohromatske svetlosti koja prolazi kroz materijal i kroz prazan otvor i ta dva intenziteta se međusobno upoređuju.



$$\tau = \frac{\phi_{\tau}}{\phi}$$

47

7. Difuzija (rasejavanje) i difrakcija svetlosti

- ♦ **Difuzija** je pojava **rasejavanja** svetlosti (*scattering*) na površini i u unutrašnjosti providnog tela.
- ♦ **Površinsko** difuzno rasejavanje se eliminiše poliranjem prilikom završne obrade sočiva, ali se javlja i u slučaju zaprljanosti i zamašćenosti sočiva.
- ♦ **Unutrašnje** rasejavanje je posledica prisutnih **nehomogenosti** materijala:
 - nerastvorene čestice (metali, kristalna faza),
 - mehurići (*bubbles*),
 - razdvojene faze u materijalu,
 - fluktuacije u gustini.
- ♦ Ove nehomogenosti nastaju u procesu topljenja sirovina pri proizvodnji.

48

7. Difuzija (rasejavanje) i difrakcija svetlosti

- ♦ **Intenzitet rasejane svetlosti** (pod uglom od 90° u odnosu na upadni pravac) zavisi od talasne dužine svetlosti prema Rejli-jevom izrazu:

$$I = \frac{1}{\lambda^m}$$

- ♦ Koeficijent m (iznosi od 3.5–4.8) zavisi od sastava materijala sočiva i procesa proizvodnje.
- ♦ Unutrašnje rasejavanje se javlja rede i u nekim slučajevima sočivima daje žućkasti ili mlečni izgled.
- ♦ Pojava je, ukupno uzevši, **zanemarljiva** u oftalmološkoj optici.
- ♦ **Difrakcija** je pojava skretanja zraka sa prvobitnog pravca bez promene sredine usled nailaska na prepreku malih dimenzija (reda nekoliko talasnih dužina).
- ♦ Ukazuje na nesavršenosti u izradi sočiva, kao i na površinama sočiva (ogrebotine i sl.).

49

Optičke osobine - pregled

r.br.	Optička osobina	Fizička veličina	oznaka
1	prelamanje	indeks prelamanja	n
		faktor promene zakrivljenosti (relativna zakrivljenost)	CVF
2	hromatična disperzija	srednja disperzija	D
		disperziona moć	ω
		Abeov broj	v
		longitudinalna hromatična aberacija	$h_f - h_c$
		trasverzalna hromatična aberacija	TCA

50

Optičke osobine - pregled

r.br.	Optička osobina	Fizička veličina	oznaka
3	refleksija (odbijanje)	reflektanca (koeficijent refleksije)	ρ
		spektralni koeficijent refleksije	ρ_λ
		relativni koeficijent refleksije u vidljivom području	ρ_V
4	apsorpcija	koeficijent (unutrašnje) apsorpcije	α_i
		koeficijent ekstinkcije	k
5	transparentcija	koeficijent transparentcije	τ
		koeficijent unutrašnje transparentcije	τ_i
		“refleksioni” faktor	P

51

Optičke osobine - pregled

r.br.	Optička osobina	Fizička veličina	oznaka
5	transparentcija	spektralni koeficijent transparentcije	τ_λ
		relativni koeficijent transparentcije u vidljivom području	τ_V
		kriva transparentcije	$\tau_\lambda = f(\lambda)$
		UV granica odsecanja	
6	difuzija	intenzitet rasejane svetlosti	I
7	difrakcija		

52

Mehaničke osobine

1. Gustina i specifična težina

- ♦ **Gustina (zapreminska masa)** materijala se definiše kao masa jedinične zapremine:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3; \text{g/cm}^3]$$

- ♦ **Specifična težina** (relativna gustina) je pojam koji se koristi za odnos gustina date supstance i destilovane vode na +4 °C i predstavlja bezdimenzionu veličinu.
- ♦ Gustina ukazuje na težinu koju mogu imati oftalmološka sočiva, a cilj razvoja materijala je da ima što je moguće manju vrednost uz što je moguće veći indeks prelamanja kao i ostale kvalitetne osobine.

53

1. Gustina i specifična težina

- ♦ **Empirijsko pravilo za gustinu:** ako je **gustina** materijala, čiji je faktor promene zakrivljenosti CVF, manja od

$$\rho < 5 - 2.5 \cdot CVF$$

tada sočiva **neće biti teža** nego da su napravljena od **kron stakla** ($n_d=1.523$).

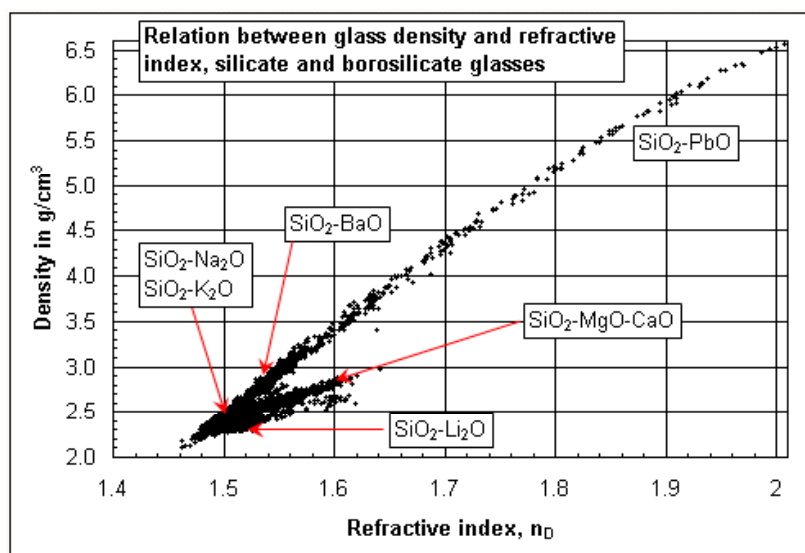
- ♦ Praktično sva **plastična** sočiva zadovoljavaju ovaj kriterijum.

54

Neke fizičke osobine materijala sa naočalna sočiva							
Materijal	n_d	n_e	Faktor zakrivljenosti CVF	Gustina	5-2.5·CVF	Abeov broj	ρ (%)
Stakla							
Belo kron	1.523	1.525	1	2.5	$\rho = 2.5$	59	4.3
Lako Flint	1.6	1.602	0.87	2.6	$\rho < 2.825$	42	5.3
1.7 stakla	1.701	1.706	0.75	3.2	$\rho > 3.125$	42	6.7
1.8 stakla	1.802	1.808	0.65	3.7	$\rho > 3.375$	35	8.2
1.9 stakla	1.885	1.892	0.59	4.4	$\rho > 3.525$	31	9.4
Plastike							
PMMA	1.49	1.492	1.07	1.2	$\rho < 2.325$	58	3.9
CR39	1.498	1.5	1.05	1.3	$\rho < 2.375$	58	4
Trivex	1.532	1.534	0.98	1.1	$\rho < 2.550$	46	4.4
Sola Spectralite	1.537	1.54	0.97	1.2	$\rho < 2.575$	47	4.5
PPG HIP	1.56	1.53	0.93	1.2	$\rho < 2.675$	38	4.8
Polikarbonat	1.586	1.589	0.89	1.2	$\rho < 2.775$	30	5.2
Poliuretan	1.6	1.603	0.87	1.3	$\rho < 2.825$	36	5.3
	1.66	1.664	0.79	1.4	$\rho < 3.025$	32	6.5
Hoya Teslalid	1.71	1.715	0.74	1.4	$\rho < 3.150$	36	6.9
Nikon	1.74	1.745	0.71	1.4	$\rho < 3.225$	32	7.3

55

1. Gustina i specifična težina

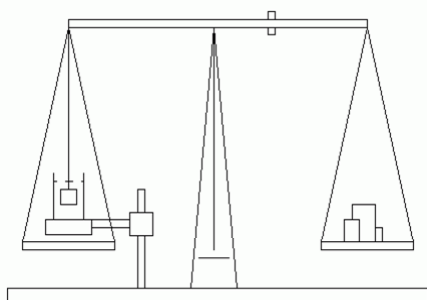


Veza između gustine materijala (stakla) i indeksa prelamanja

56

Metode određivanja gustine

- ♦ U osnovne metode određivanja gustine optičkih materijala spadaju:
 - **hidrostatička (Arhimedova) metoda** – merenje mase uzorka i zapremine pomoću hidrostatičkih analitičkih terazija



$$\rho = \frac{m}{m - m'} \cdot \rho_0$$

m - masa uzorka;

m' – masa uzorka potopljenog u tečnost poznate gustine (ρ_0);

Uslov: da tečnost ne utiče na uzorak u smislu rastvaranja i promene hemijskog sastava

57

Metode određivanja gustine

- **metoda piknometra** – posuda tačno definisane zapremine zbog zatvarača sa kanalom kroz koji izlazi višak tečnosti

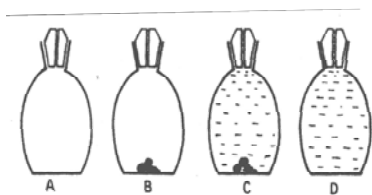
Vrši se merenje mase uzorka i određivanje zapremine pomoću merenja masa piknometra sa uzorkom pored i u njemu.

$$\rho = \frac{m}{m_1 - m_2} \cdot \rho_0$$

m - masa uzorka;

m_1 – masa piknometra sa tečnošću poznate gustine (ρ_0) i uzorkom pored;

m_2 – masa piknometra sa tečnošću poznate gustine i uzorkom u piknometru;



58

Metode određivanja gustine

- **imerziona metoda** (metoda lebdenja) –potapanje uzorka u smešu tečnosti koja ima jednaku gustinu (uzorak lebdi), a zatim merenje gustine tečnosti (recimo piknometrom)

$$\rho = \frac{m_2 - m_3}{m_1 - m_3} \cdot \rho_0$$

m_1 – masa piknometra sa tečnošću poznate gustine (ρ_0);

m_2 – masa piknometra sa tečnošću nepoznate gustine (ρ);

m_3 – masa praznog piknometra

- Metoda je ograničena na vrednosti gustine koje su manje od najgušće tečnosti koja se koristi – ako je materijal gušći, on tone i u najgušćoj tečnosti. Uobičajeno, od 1.0–3.3 g/cm³
- Voda (1.0 g/cm³) – talijum-malonat-format (5.0 g/cm³)

59

2. Mehurići i nečistoće

- ♦ **Mehurići i nečistoće** (*bubbles & inclusions*) su u izradi oftalmoloških sočiva nepoželjni, ali svakako prisutni elementi. Utiču na optičke osobine.
- ♦ **Strije** – mesta nehomogenosti sa različitim indeksom prelamanja u odnosu na ostalu sredinu.
- ♦ Broj i veličina mehurića zavise od:
 - **procesa proizvodnje** (temperature rastopa, brzine hlađenja, ...)
 - i **sastava stakala**.
- ♦ Karakterizacija se odnosi na razvrstavanje u klase i to **prema količini mehurića** – izvodi se merenjem **površine poprečnog preseka mehurića i nečistoća** (u [mm²]) (čije dimenzije prevazilaze 0.03 mm) u 100 cm³ ispitivanog materijala.



Klasa	1	2	3	4	5
ukupan poprečni presek mehurića (mm ² /100cm ³)	<0.03	≥0.03 <0.1	≥0.1 <0.25	≥0.25 <0.5	≥0.5

60

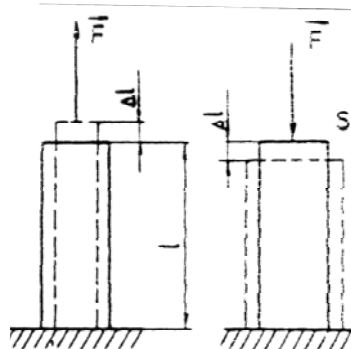
3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ **Jangov (Young) modul elastičnosti** E (u [Pa] ili [GPa])) je veličina koja karakteriše veličinu naprezanja koja nastaje u elastično-deformisanom materijalu pod uticajem sile pri sabijanju (ili istezanju).
- ♦ **Hukov zakon za elastičnu deformaciju istezanja** (sabijanja) povezuje primenjenu silu F i nastalu deformaciju $\Delta\ell$:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta\ell}{\ell}$$

- ♦ Jangov modul elastičnosti je odnos normalne sile koja po jedinici površine deluje na telo (napon σ) i relativne deformacije sabijanja (izduženja) ε :

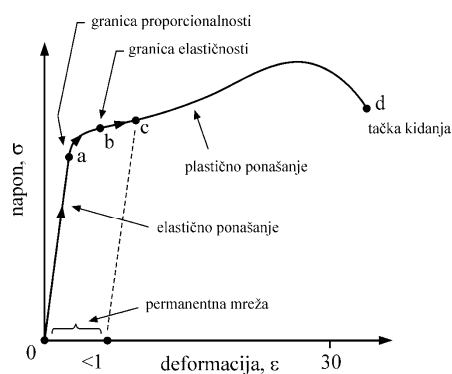
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



61

3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ Granica do koje važi ovaj tzv. Hukov zakon za elastičnu deformaciju istezanja je **granica proporcionalnosti**, a granica do koje telo još uvek ne ostaje trajno deformisano je **granica elastičnosti**.



62

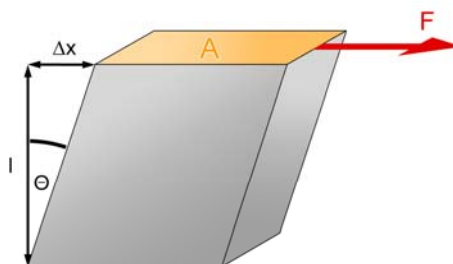
3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ **Modul smicanja** G (u [Pa] ili [GPa]) je veličina koja karakteriše deformacije nastale delovanjem tangencijalne sile.

- ♦ **Hukov zakon elastične deformacije smicanja:**

$$\frac{F}{S} = G \frac{\Delta x}{\ell}$$

- ♦ Što su veće vrednosti koeficijenata elastičnosti, treba veću silu primeniti da bi se ostvarila ista elastična deformacija (istezanje, sabijanje, uvijanje, ...).

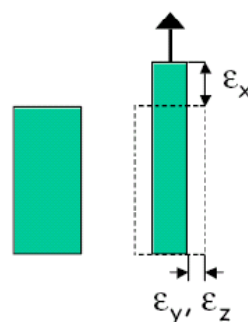


63

3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ **Poasonov broj** je odnos relativne deformacije promene prečnika šipke prema relativnoj deformaciji promene dužine pri istezanju ili sabijanju. On poredi poprečnu i uzdužnu elastičnu deformaciju materijala.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\Delta d/d}{\Delta \ell/\ell}$$



- ♦ Ova veličina za stakla u proseku iznosi $0.2 \leq \mu \leq 0.3$ i povezana je sa ostalim koeficijentima elastičnosti.

64

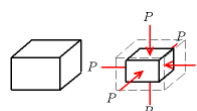
3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ **Zapreminski modul elastičnosti** K (u [Pa] ili [GPa]) je mera otpora materijala prema delovanju spoljašnjeg uniformnog pritiska.
- ♦ Izražen je preko **pritiska** koji treba primeniti na materijal da bi se izazvala odgovarajuća (jedinična) relativna promena zapremine.

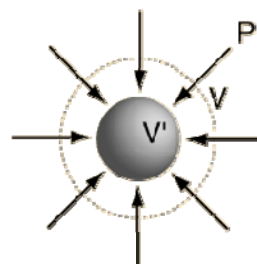
$$K = -V \frac{\Delta p}{\Delta V}$$



$$K = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V}$$



- ♦ **Stišljivost** B je recipročna vrednost zapreminskog modula elastičnosti.



65

3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ Svi ovi koeficijenti se mogu naći pomoću metoda određivanja **brzine prostiranja mehaničkih** (akustičkih) transverzalnih i longitudinalnih **talasa** kroz materijal.
- ♦ U tu svrhu se koristi šipka dimenzija (100–150)×10×10 mm na sobnoj temperaturi

$$G = v_t^2 \mu$$

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1$$

$$E = \frac{9kG}{3k + G} \quad \text{gde je} \quad k = v_\ell^2 \mu - \frac{4G}{3}$$

- ♦ v_t – brzina prostiranja transverzalnih talasa
- ♦ v_ℓ – brzina prostiranja longitudinalnih talasa

66

3. Parametri (koeficijenti) elastičnosti

- ♦ Jačina materijala na istezanje (koja zavisi od Jangovog modula elastičnosti E) može se pomoću posebnih uređaja ispitati na samim naočalnim sočivima.
- ♦ Posebno je važno kod sočiva koja idu za naočari bez okvira da izdrže delovanja raznih spoljašnjih sila.
- ♦ Na slici desno se vrši delovanje silom istezanja na metalne štapiće provučene kroz rupe u sočivu. Meri se **intenzitet sile** pri kojoj dolazi do loma materijala.



67

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Čvrstoća** je otpor materijala prema mehaničkom **razaranju**. Proporcionalna je površinskom naponu γ materijala i Jangovom modulu elastičnosti E .
- ♦ Razaranje ima različite **vidove** (kidanje, sabijanje, savijanje, udar, uvrtnje, ...) → **različiti pokazatelji čvrstoće**.
- ♦ Uticaj **spoljašnjih uslova** i faktora se ne sme zanemariti u definisanju čvrstoće:
 - atmosferska (površinska) vlaga,
 - oštećenja površine,
 - režim termičke obrade (kaljenje, odgrevanje),
 - oblik uzorka, ...
- ♦ Ovi razlozi upućuju na zaključak da je teško definisati jedan univerzalni pokazatelj čvrstoće, i da se pri navođenju podataka moraju navesti svi relevantni podaci o uzorku i uslovima eksperimenta.

68

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Tvrdoća** je sposobnost materijala da pruži otpor **prodiranju** drugog tela i može se okarakterisati na veoma različite načine.

1. **Mosova skala** za tvrdoću materijala svrstava čvrsta tela u 10 kategorija, ali je nepraktična jer je neprecizna jer se zasniva na poređenju tvrdoće dva materijala.

Procena tvrdoće: vrši se paranje uzoraka materijala olovkama na čijem vrhu se nalaze materijali različite tvrdoće. **Trag paranja** ukazuje na klasu tvrdoće.

Olovke za procenu tvrdoće po Mosovoj skali



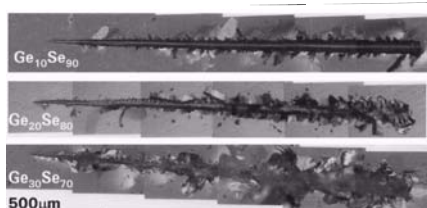
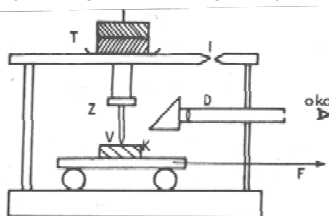
mineral	tvrdoća po Mosu	tvrdoća po Rozivalu
talk	1	0,03
gips	2	1,25
halit	2	1,25
kalcit	3	4 – 5
fluorit	4	5,0
apatit	5	6,5
ortoklas	6	37,0
kvarc	7	120,0
topaz	8	175,0
korund	9	1000,0
dijamant	10	140000,0

69

4. Čvrstoća i tvrdoća

2. **Sklerometarska tvrdoća** podrazumeva **merenje širine traga** zaparane površine materijala od strane dijamantskog šiljka pod uticajem nekog opterećenja, ali takođe ne daje dobre egzaktne vrednosti već više poredi rezultate.

- ♦ Opterećenja se realizuju ili tegovima ili odgovarajućim oprugama.

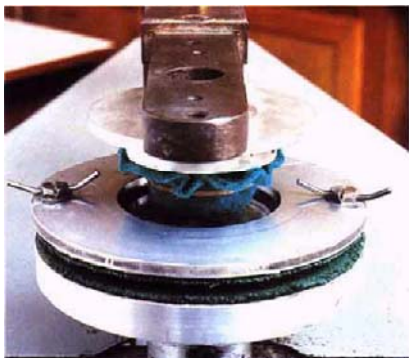


70

4. Čvrstoća i tvrdoća

3. Abrazivna tvrdoća ukazuje na otpornost materijala prema habanju od strane abrazivnog sredstva

- ♦ Procenjuje se na osnovu **gubitka mase**, smanjenja zapremine, tj. **debljine ispitivanog materijala** pri korišćenju **određene količine abraziva**, ili na osnovu mase abraziva potrebnog da izazove određeno oštećenje na ispitivanom materijalu.



Primer: uzorak ispitivanog stakla je 30×30×10 mm i postavlja se na rotirajući disk (prečnik 250 mm) koji se okreće brzinom 60 ob./min i opterećuje silom od 9.8 N (masa od 1 kg) u trajanju od 5 min. Dodaje se suspenzija - mešavina 20 ml vode i 10 g Al₂O₃ (abraziv) sa česticama do 20 μm.

$$\text{Abrazivnost} = \frac{\frac{\Delta m}{\rho}}{\frac{\Delta m_0}{\rho_0}} \times 100$$

oznake sa indeksom "0" se odnose na standard

71

4. Čvrstoća i tvrdoća

3. Abrazivna tvrdoća

- ♦ Postoje i uređaji sa određivanjem abrazivne tvrdoće uz pomoć **padanja abrazivnih čestica** (kvarcni pesak SiO₂, silicijum-karbid SiC) na uzorak materijala. Najčešće služi za ispitivanje **organskih prevlaka** na materijalima.
 - Prvi način procene: na osnovu **mase** abrazivnog sredstva potrebnog da probije prevlaku koja se ispituje.
 - Druga vrsta procene: upoređuje se **sjaj** tretirane površine sa sjajem površine na koju nije padoo abrazivni prah.
- ♦ Materijal koji se ispituje stoji pod uglom od 45°.
- ♦ Treći postupak (uređaj "**Taber Abrader**") podrazumeva tretiranje pričvršćenog uzorka abrazivnim točkom koji se okreće različitim brzinama. Veličina oštećenja se meri **optički** ili preko **gubitka mase** nakon određenog broja obrtaja.

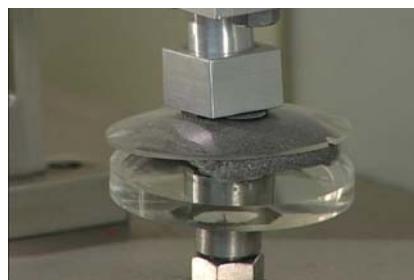


72

4. Čvrstoća i tvrdoća

3. Abrazivna tvrdoća

- ♦ Četvrti postupak podrazumeva **merenje vremena** posle kojeg se pojave vidljive ogrebotine kada se trlja **tkaninom**.



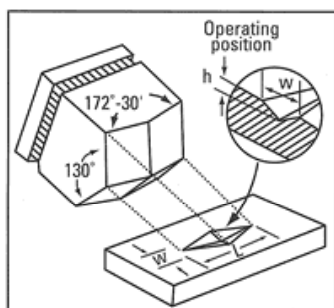
- ♦ Simulacija korišćenja (eksploatacije) naočalnih sočiva se može vršiti materijalima različitog stepena abrazivnih karakteristika.
- ♦ Tretiranje površina sočiva (**prevlaka**) ukazuje na kvalitet nanešenih antirefleksionih i hidrofobnih slojeva, kao i na čvrstinu tvrdih prevlaka koje se postavljaju kao podloge za gore pomenute.

73

4. Čvrstoća i tvrdoća

4. **Indentaciona tvrdoća H** (ili mikrotvrdoća) se određuje na osnovu **veliĉine malog plastiĉnog mikrootiska** koji ostavlja u materijalu indenter od dijamanta (ili ĉelika), telo pravilnog geometrijskog oblika, pod uticajem opterećenja. Izražava se u [Pa] ili [GPa].

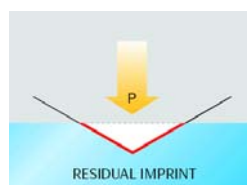
$$H = k \frac{P}{d^2}$$



P - je opterećenje (u [kg]),

d - dimenzija dijagonale mikrootiska (u [m]),

k - faktor koji zavisi od geometrijskog oblika indentora.



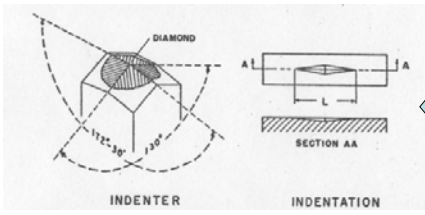
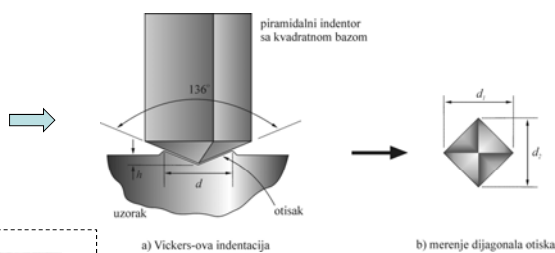
74

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Vickersova (Vickers) metoda**

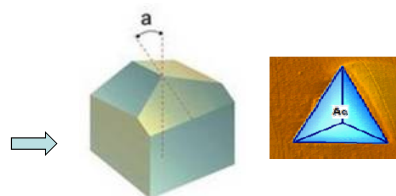
- indenter je piramida sa **kvadratnom** osnovom.

- ♦ Meri se dijagonala otiska



- ♦ **Knopova (Knoop) metoda** - indenter je piramida sa **rombičnom** osnovom.

- ♦ **Berkovičeva (Berkovich) metoda** - indenter je piramida sa **trouglaonom** osnovom.



75

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Rokvelova (Rockwell) metoda** -

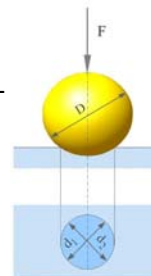
- indenter je **konus**.

- ♦ Meri se prečnik ili dubina otiska



- ♦ **Brinelova (Brinell) metoda** - indenter je u obliku **sfere**.

$$H = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

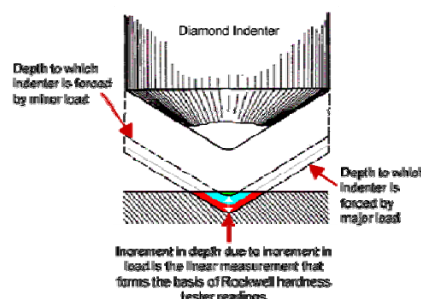


- ♦ Utiskivanje geometrijski pravilnog tela (indentora) od dijamanta ili čelika vrši se tačno određenom brzinom (1 μm/s) i silom (recimo 0.98 N - 1 kg opterećenje), a dužina trajanja utiskivanja je takode određena (npr. 15 s).

76

4. Čvrstoća i tvrdoća

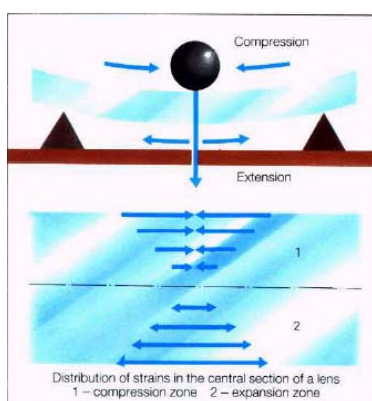
- ♦ Kod **Rokvelove** metode (utiskivanje konusa), recimo, postupak podrazumeva prvo delovanje nekom minimalnom silom, utvrđivanje referentnog položaja indentora, a zatim nekom maksimalnom silom i ponovno vraćanje na prvobitnu vrednost minimalne sile. Materijal se samo delimično vraća ka prvobitnom referentnom položaju.
- ♦ Tvrdoća se procenjuje na osnovu **razlike u dubini** traga pri minimalnom i maksimalnom opterećenju konusa.
- ♦ Sve metode imaju isti rezultat - izmerena **mikrotvrdoća H** daje informaciju o **površinskoj tvrdoći** materijala i **jačini hemijskih veza** u materijalu između gradivnih elemenata, što ukazuje na **moгуćnosti pojave pukotina** i drugih oblika **oštećenja** u eksploataciji.



77

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Lomljivost** (krtost) stakla ukazuje na sposobnost stakla da se odupre delovanju strogo lokalizovane sile na malom prostoru, tj. da se **odupre stvaranju lomova**.



- ♦ Lomljivost se može okarakterisati preko **dve** veličine (**krtost B** i **žilavost loma K_c**) koje su međusobno povezane sa mikrotvrdoćom H :

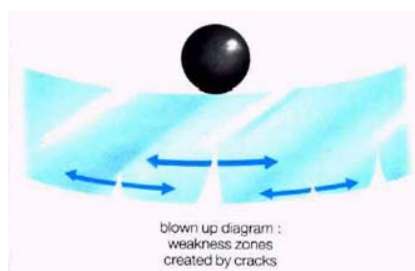
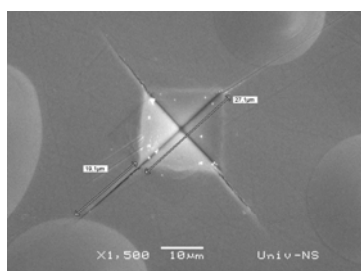
$$B = \frac{H}{K_c}$$

- ♦ **Krtost B** je veličina koja **upoređuje procese deformisanja** materijala pod opterećenjem **sa procesima stvaranja pukotina** pošto je **mikrotvrdoća H** je mera otpora prema deformisanju, a **žilavost loma K_c** je mera otpora prema stvaranju lomova i pukotina pod opterećenjem.

78

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ Što je veća žilavost loma K_{IC} , što je teže napraviti pukotinu pri delovanju lokalizovane sile, manja je krtost, materijal je lakše deformisati.
- ♦ Merenja žilavosti loma K_{IC} se mogu vršiti prilikom merenja mikrotvrdoće, ali pri znatno većim silama opterećenja, tako da se obavezno formiraju velike pukotine u okolini i/ili ispod otiska. Mere se dimenzije pukotina i upoređuju sa veličinom otiska.



- ♦ **Mikropukotine** na materijalu u velikoj meri smanjuju čvrstinu materijala i povećavaju sposobnost pojave lomova. Utvrđivanje njihovog prisustva je takođe način za kvalifikaciju materijala.

79

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Otpornost prema udarcu** (*impact resistance*) je jedan od najvažnijih oblika tvrdoće, koji pokazuje koliko je materijal sposoban da podnese **sudar** sa stranim telom izvesne **kinetičke energije**. Merenjima ove otpornosti određuje se energija apsorbirana u sudaru.
- ♦ Prema njoj se materijali klasifikuju u nekoliko grupa, a standardi se razlikuju u zavisnosti od zemlje i metode ispitivanja.

80

4. Čvrstoća i tvrdoća



81

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ Neke metode ispitivanja ovog oblika tvrdoće podrazumevaju ispaljivanje malog projektila različitim brzinama na materijal određene debljine i utvrđivanje prosečne brzine koju on podnosi pre nego što se napravi oštećenje.



- ♦ Oštećenja se posmatraju pod mikroskopom, ako su mala.
- ♦ Merenja se vrše na slučajno odabranim uzorcima materijala (sočiva) i to više puta, a rezultati se statistički obrađuju.
- ♦ Poređenje materijala prema otpornosti (kuglica od 6.5 mm prečnika).

materijal	brzina kuglice [m/s]
kaljeno staklo	18
nekaljeno staklo	12
laminatno staklo	12
CR 39	49
PMMA	34
polikarbonat sa prevlakom	152
polikarbonat bez prevlake	244

82



4. Čvrstoća i tvrdoća



83

4. Čvrstoća i tvrdoća

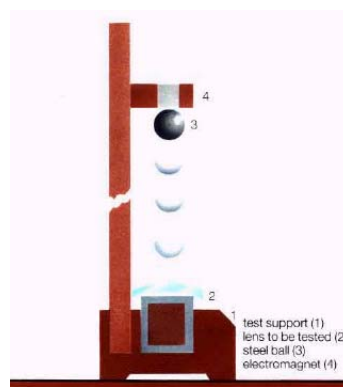
- ♦ Mase kuglica mogu biti **16 g** ili 44 g, (ili se definišu preko prečnika) iako se razlikuju u različitim metodama i za različite tipove materijala (stakla, plastike). Debljina materijala je 2 ili 3 mm.
- ♦ Visine puštanja takođe variraju (**1.27 m**, 1.30 m, 2 m, ...)



84

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ Jedna od metoda se zasniva na **puštanju kuglice** odgovarajuće mase sa određene visine i utvrđivanje oštećenja (ako postoji). Takođe postoje različiti standardi, u zavisnosti od zemlje i uslova eksperimenta.
- ♦ Metoda se odlikuje odličnom **reproducibilnošću uslova** eksperimenta - kinetička energija projektila je uvek ista.



85

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ Snimci padanja čelične kuglice na sočivo.

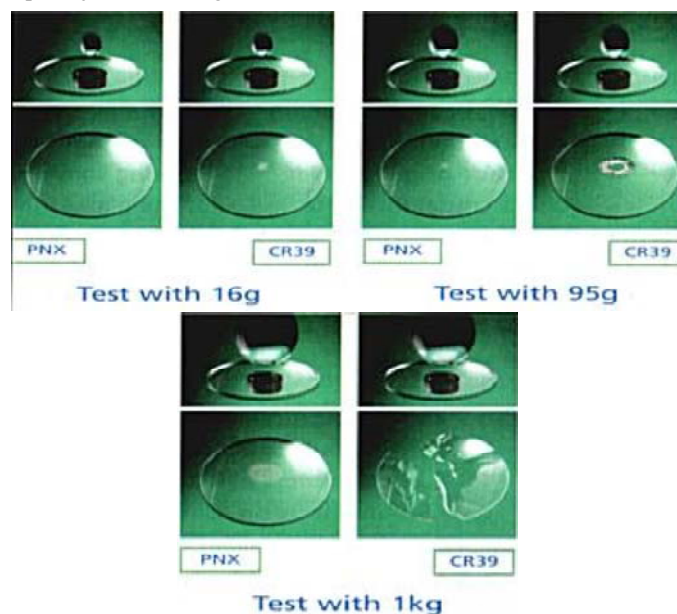


- ♦ Broj sočiva na testu može biti različit (od 12 do 50) i kada se primeti oštećenje - sočivo ne prolazi test, a ako ne postoji nikakvo oštećenje - sočivo zadovoljava test. Statističkim putem se dolazi do srednjih vrednosti broja sočiva u nekoj seriji koji zadovoljavaju test.

86

4. Čvrstoća i tvrdoća

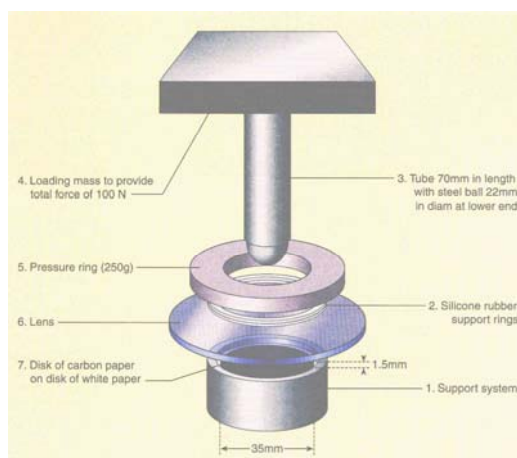
- ♦ Snimci padanja čeličnih kuglica određenih masa na različita sočiva.



87

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ Otpor "probojne tačke" (*breaking-point resistance*) je veličina koja se dobija kada se promenljivom, rastućom silom - spuštanjem 0.4 m/min - (do maksimalnih 100 N) deluje na materijal, pri čemu se prati deformacija i eventualno lomljenje materijala.

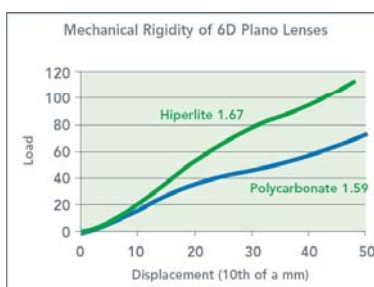


- ♦ Kontinualno se prate deformacije i eventualna oštećenja i ako nema vidljivih tragova promena na površini sočiva, ono zadovoljava dati test.

88

4. Čvrstoća i tvrdoća

- ♦ **Mehanička krutost** je karakteristika materijala za sočiva veoma slična otporu probojne tačke.
- ♦ I u ovom slučaju se deluje silom na uzorak sočiva i prati kada dolazi do lomljenja.
- ♦ Rezultati se mogu izraziti i u obliku **međuzavisnosti sile opterećenja i veličine deformacije** (tj. koliko je opterećenje neophodno za postizanje određene deformacije, recimo savijanja u centru sočiva).



89

Mehaničke osobine - pregled

r.br.	Mehanička osobina	Fizička veličina	oznaka
1	težina sočiva	gustina	ρ
2	mehurići i nečistoće strije	površina koju zauzimaju nasavršenosti u strukturi	D
3	elastičnost	Jangov modul elastičnosti	E
		modul smicanja	G
		Poasonov broj	μ
		zapreminski modul elastičnosti	K
		stišljivost	B

90

Mehaničke osobine - pregled

r.br.	Mehanička osobina	Fizička veličina	oznaka
4	čvrstoća, tvrdoća	klasifikacija po Mosovoj skali	
		sklerometarska tvrdoća (širina traga)	
		abrazivna tvrdoća (gubitak mase, sjaja površine, smanjenje zapremine, abrazivnost, ...)	
		indentaciona (mikro)tvrdoća (Vickers, Knop, Berkovič, Rokvel, Brinel, ...)	H
		lomljivost, krtost	B
		žilavost loma	K_c

91

Mehaničke osobine - pregled

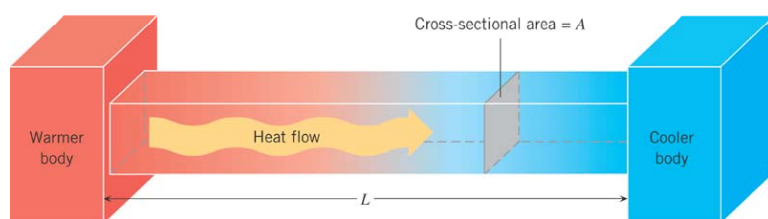
r.br.	Mehanička osobina	Fizička veličina	oznaka
4	čvrstoća, tvrdoća	otpornost prema udarcu (brzina ili kinetička energija kuglice, veličina oštećenja)	
		otpor probojne tačke (oblik deformacije – oštećenja)	
		naponska stanja	

92

Termičke osobine

1. Termička provodljivost

- Termičke osobine materijala karakterišu promene stanja i efekte temperature na materijale.
- Prenos toplote provođenjem se ostvaruje **interakcijom** delića koji vrše termičko kretanje, pri čemu se delovi tela ne pomeraju.
- Materijale, prema tome kako provode toplotu, delimo na **toplotne provodnike** i **toplotne izolatore**.

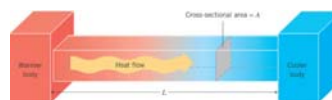


93

1. Termička provodljivost

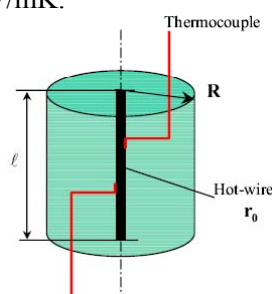
- Količina toplote ΔQ koja se **provođenjem** prenese za vreme $\Delta \tau$ duž šipke poprečnog preseka S , dužine L i duž koje je uspostavljena stalna razlika temperatura ($t_2 - t_1$):

$$\Delta Q = k S \frac{t_2 - t_1}{L} \Delta \tau$$



- Provođenje toplote je okarakterisano **koeficijentom toplotne provodljivosti** k (nekad i λ) (u [W/mK]). Kod oftalmoloških materijala se vrednosti koeficijenta λ uobičajeno kreću od 0.5 do 1.2 W/mK.

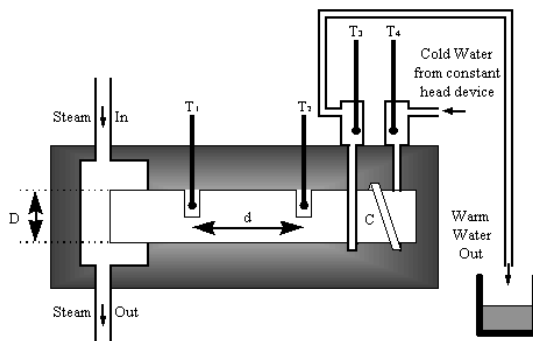
- Jedna od najčešćih metoda određivanja koeficijenta provodljivosti je **metoda vrelе žice** u kojoj se **prati** (u toku vremena) temperatura na površini uzorka u čijoj je sredini žica koja odaje toplotu pri proticanju struje kroz nju (Džulov efekat).



94

1. Termička provodljivost

- Druga metoda podrazumeva određivanje koeficijenta k u uređaju za merenje provodljivosti.



$$k = \frac{4 m c d (t_3 - t_4)}{\pi D^2 (t_1 - t_2) \tau}$$

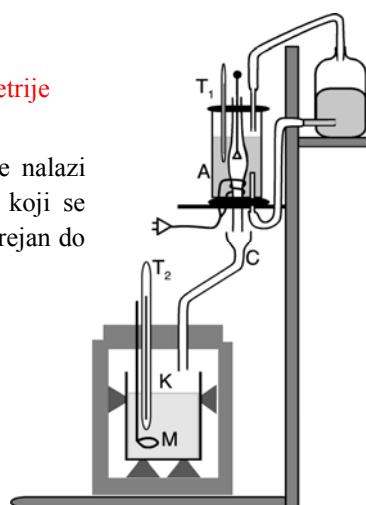
- Koeficijent toplotne provodljivosti k se određuje u stacionarnom režimu na osnovu merenja temperatura T_1 i T_2 na krajevima ispitivanog materijala (u obliku šipke, najčešće), čiji jedan kraj zagreva vodena para i temperatura vode T_3 i T_4 koja hladi drugi kraj šipke.
- m - je masa vode (specifična toplota c) koja za vreme τ protekne pored hladnijeg kraja šipke prečnika D i dužine d .

95

2. Specifična toplota (masena količina toplote)

- Masena količina toplote c** [J/kgK] je ona količina toplote koju treba dovesti telu jedinične mase da bi mu se temperatura povisila za jedinicu.
- Može se određivati na dva osnovna načina:
 - pomoću **kalorimetra**
 - pomoću tzv. **diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC)**.
- Kalorimetar** - termički izolovan sud u kojem se nalazi voda (mase m_v) na sobnoj temperaturi (t_2) i u koji se spušta uzorak ispitivanog materijala (mase m) ugrijan do temperature ključanja vode (t_1).
- Prati se promena temperature u kalorimetru (toplotnog kapaciteta C_k) i zabeleži ravnotežna temperatura (ohlađenog uzorka i zagrejanog kalorimetra sa vodom).

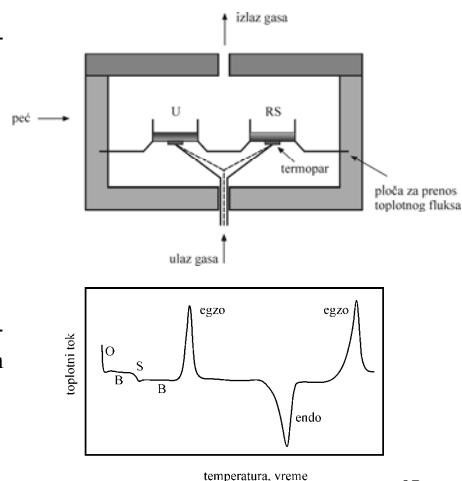
$$c = \frac{c_v \cdot m_v + C_k}{m} \cdot \frac{t_m - t_2}{t_1 - t_m}$$



96

2. Specifična toplota (masena količina topline)

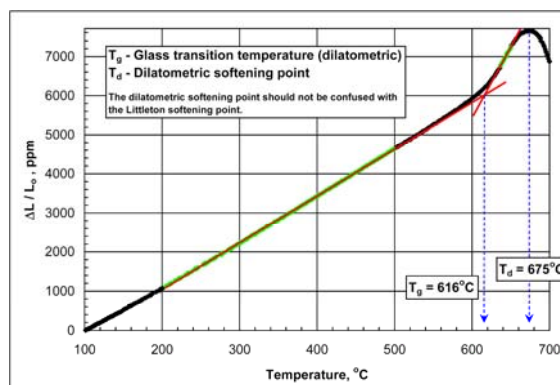
- ◆ Diferencijalna skenirajuća kalorimetrija - DSC
- ◆ Metoda se zasniva na **upoređivanju toplotnog toka** (fluksa) koji prima materijal u poređenju sa referentnim standardom pri zagrevanju.
- ◆ Sa **krive toplotnog toka** u funkciji temperature može se određivati, između ostalog:
 - **specifična toplota materijala c** ,
 - **toplote faznih prelaza** (promene agregatnog stanja ili promene u strukturi), i
 - **temperature** na kojima se dešava neka promena u materijalu u poređenju sa inertnim materijalom.
- ◆ Egzotermne i endotermne promene u materijalu su praćene oslobađanjem i apsorpcijom topline što se beleži ovim uređajem.



97

3. Termički koeficijent linearnog širenja

- ◆ Karakteristika staklastih (amornih) materijala je poseban oblik krive termičkog širenja (dilatacije) koja u oblasti omekšavanja ima karakterističan prelom.



- ◆ Ova kriva dilatacije materijala sa porastom temperature omogućava određivanje **koeficijenta širenja** i **karakterističnih temperatura** u **temperaturnoj oblasti omekšavanja**.

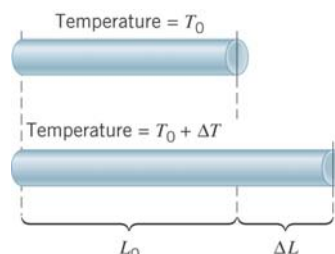
98

3. Termički koeficijent linearnog širenja

- Termički koeficijent linearnog širenja α (u $[K^{-1}]$, ili $[^{\circ}C^{-1}]$) karakteriše efekte širenja materijala sočiva uzrokovane porastom temperature.

$$\ell = \ell_0(1 + \alpha t)$$

$$\alpha = \frac{\Delta \ell / \ell_0}{\Delta t}$$



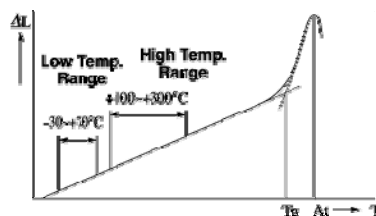
- Termički koeficijent linearnog širenja α je povezan sa termičkim koeficijentom zapreminskog širenja β (negde se obeležava sa γ) relacijom $\beta \approx 3\alpha$.
- Veličina ovog koeficijenta α ili treba da je što manja (uobičajeno je u intervalu do $\sim 1 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}C^{-1}$), ili prilagođena ostalim materijalima koji se zajedno koriste (ram za naočari, prevlake na sočivima, ...).

99

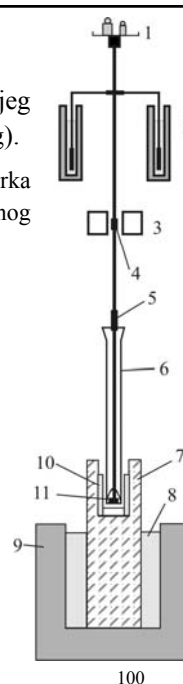
3. Termički koeficijent linearnog širenja

- Dilatometar** (ili termomehanički analizator) je uređaj pomoću kojeg se mere efekti termičkog širenja (bilo linearnog bilo zapreminskog).
- Pri zadatoj brzini zagrevanja prati se promena u visini (ili zapremini) uzorka (planparalelnih strana) i sa krive $\Delta \ell / \ell_0 = f(t)$ se određuje koeficijent linearnog širenja α .

$$\alpha = \frac{\Delta \ell / \ell_0}{\Delta t}$$



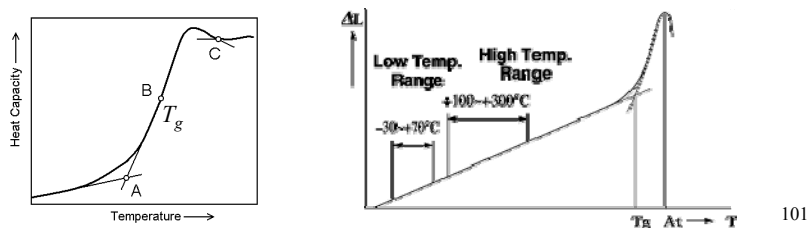
- Koeficijent α se određuje za **čvrstu fazu** (α_g) i **viskozno-plastičnu fazu** (iznad temperature ostakljavanja $t_g - \alpha_l$).
- Određuju se i **temperature ostakljavanja** t_g i **dilatometrijske temperature omekšavanja** t_{sp} .



100

4. Karakteristične temperature oblasti omekšavanja

- ♦ **Temperatura ostakljavanja T_g** (*glass transition temperature*) ili temperatura transformacije je **granična temperatura** ispod koje staklasti materijali postoje u čvrstom stanju, a iznad koje im se viskoznost postepeno menja (smanjuje), tj. prelaze u tzv. viskozno-plastično stanje sve dok ne dođe do topljenja.
- ♦ To je karakteristična temperatura **oblasti ostakljavanja (omekšavanja)** u kojoj staklasti materijali postepeno menjaju svoje osobine.
- ♦ Temperatura T_g zavisi ne samo od vrste materijala već i od **uslova dobijanja materijala i uslova izvođenja eksperimenta**.



101

4. Karakteristične temperature oblasti omekšavanja

- ♦ **Dilatometrijska temperatura omekšavanja T_{sp}** (*softening temperature*, nekad i *yield point*) je temperatura na kojoj počinje deformisanje materijala usled sopstvene težine. Karakteriše **vrh dilatometrijske krive**.
- ♦ **Temperatura iščezavanja krtosti T_h** je temperatura na kojoj se menjaju viskozne osobine čvrstog materijala i telo **počinje** da gubi elastične osobine. Negde se definiše i kao **temperatura "curenja" T_{SUP}** (*strain point*), najniža temperatura za pojavu viskoznog toka materijala u žitkom, viskozno-plastičnom stanju. $T_h < T_g$.
- ♦ Ponekad se navodi i **temperatura odgrevanja T_{ap}** (*annealing point*), najviša temperatura na kojoj unutrašnji naponi postepeno nestaju. $T_{ap} \lesssim T_g$.
- ♦ **Temperatura fluidnosti T_E** (ili temperatura Litltona) je temperatura gde materijal **potpuno** gubi svojstva čvrstog tela i sposobnost ka povratnim deformacijama. $T_E > T_g$.

102

4. Karakteristične temperature oblasti omekšavanja

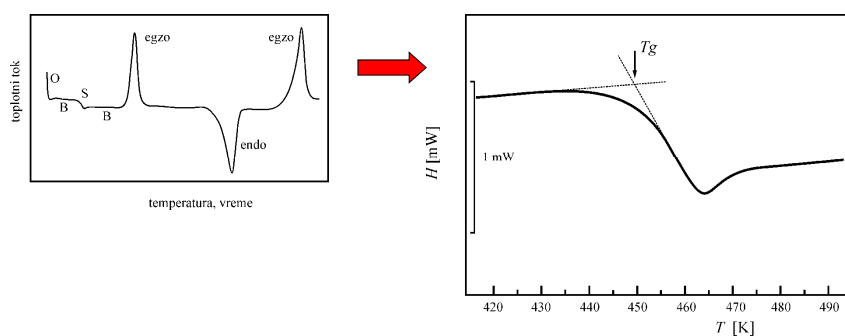
- ♦ Temperatura topljenja T_{mp} (melting point) nije strogo definisana vrednost, kada su u pitanju stakla, već se određuje za datu vrednost viskoznosti.
- ♦ Temperatura isparavanja T_{ep} (evaporation point) je temperatura od značaja za prevlake i definiše se pri odgovarajućem spoljašnjem pritisku.
- ♦ Uobičajeno je da se karakteristične temperature definišu preko veličine koeficijenta dinamičke viskoznosti η (u [Pas], negde u [P], poaz, 1Pas=10 P).

karakteristična temperatura	koeficijent dinamičke viskoznosti, η [Pas]
temperatura iščezavanja krtosti, T_h (T_{StP})	$10^{13.6}-10^{16}$
temperatura odgrevanja, T_{ap}	10^{12}
temperatura ostakljavanja, T_g	$10^{12.3}$ (ili $10^{11}-10^{13}$)
dilatometrijska temperatura omekšavanja, T_{sp}	$10^{9.6}-10^{11}$
temperatura fluidnosti (Litltona), T_E	$10^{6.6}$
temperatura topljenja, T_{mp}	$10^{1.5}$

103

4. Određivanje temperature ostakljavanja t_g

- ♦ Temperatura ostakljavanja t_g se, osim u dilatometrijskim merenjima, može odrediti i diferencijalnom skenirajućom kalorimetrijom (DSC).
- ♦ Najčešća metoda je da se karakteristične temperature odrede u preseku produžetaka delova krive toplotnog fluksa u funkciji temperature koji prethode i koji slede iza promene nagiba te krive.



104

Električne osobine

- ♦ Električne osobine karakterišu efekte uticaja elektromagnetnih talasa i elektriciteta na materijale.
- ♦ Neke električne veličine povezuju **električne i optičke** karakteristike materijala (kao što je **indeks prelamanja**). U tom smislu se izdvajaju:
 - **Dielektrična jačina** (*dielectric strength*), predstavlja maksimalnu jačinu električnog polja pri kojoj još uvek **ne dolazi do proboja** dielektrika (u [V/m]).
 - **Faktor dielektričnih gubitaka** (*dielectric loss factor*) pri zadatoj frekvenciji ($\tan\delta$), reprezentuju gubitke električne snage u materijalu i ukazuju na njegove dielektrične karakteristike, tj. kvalitet kao izolatora (dielektrika).

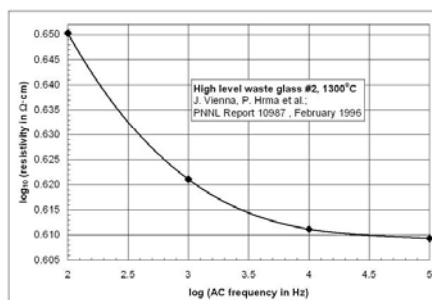
105

Električne osobine

- ♦ Električna provodljivost materijala je okarakterisana ili **specifičnom električnom provodljivošću** σ ($[\Omega^{-1}\text{m}^{-1}]$) ili specifičnom otpornošću ρ .
- ♦ Kod **oksidnih** stakala provodljivost je posledica pokretljivosti i koncentracije **jona** u strukturi materijala.
- ♦ Predstavlja se zavisnošću ovih veličina od **temperature** ili **frekvencije** primenjenog spoljašnjeg električnog polja.
- ♦ Električna provodljivost je koeficijent srazmernosti između gustine struje J i jačine električnog polja E :

$$J = \sigma E$$

Zavisnost **specifične otpornosti** od **frekvencije** električnog polja. →



106

Hemijske osobine

- ♦ Hemijske osobine karakterišu **reakciju materijala** prema raznim hemijskim supstancama, i to u:
 - **procesu proizvodnje**; za vreme brušenja i poliranja (joni u suspenziji za brušenje)
 - **uslovima korišćenja** oftalmoloških sočiva (delovanje atmosfere vlage, vode - tople, hladne, slane i slatke, pare, gasova (CO₂, ...) , neodgovarajućih sredstava za čišćenje...)
 - **specijalnim uslovima** (kisljine, baze, razni organski rastvarači).
- ♦ Posledica delovanja raznih hemijskih supstanci je da ponekad stakla u toku proizvodnje i skladištenja **promene boju**.
- ♦ Veliki značaj hemijskih osobina materijala je upravo zbog stalne izloženosti i prevlaka i osnovnih materijala spoljašnjim uticajima.

107

Hemijske osobine

- ♦ Testiranje otpornosti se vrši pod posebnim uslovima i za svaki uticaj posebno. Najčešće se otpornost procenjuje na osnovu **gubitka mase** uzorka materijala u toku eksperimenta pri delovanju vode, nekih posebnih kiselina ili baza.
- ♦ Takođe se izdržljivost materijala usled delovanja određenih hemikalija ponekad procenjuje i preko **promena na površini**, koje se mogu zapaziti ili merenjem transparentije ili posmatranjem pod mikroskopom.
- ♦ **Klasifikacija** materijala je takođe **posebna za različite uticaje**.

108

Hemijske osobine - primeri

- ♦ Test otpornosti **praha** ispitivanog materijala na uticaj **vode** [RW(p)] i **kiseline** [RA(p)]

- ❑ **Staklo** se usitni (samelje) do veličine zrna < 600 µm;
- ❑ odgovarajuća masa materijala se stavi u platinsku posudicu i sve to u ključali reagent (voda, pH 6.5–7.5 ili kiselina, 0.01N rastvor azotne kiseline) u trajanju od 60 min;
- ❑ meri se **gubitak u masi** (u %) ispitivanog materijala, i na osnovu rezultata se materijal klasifikuje.

Otpornost praha stakla na **vodu**:

Klasa	1	2	3	4	5	6
Gubitak mase [%]	<0.05	≥0.05 <0.10	≥0.10 <0.25	≥0.25 <0.60	≥0.60 <1.10	≥1.10

Otpornost praha stakla na **kiselinu**:

Klasa	1	2	3	4	5	6
Gubitak mase [%]	<0.20	≥0.20 <0.35	≥0.35 <0.65	≥0.65 <1.2	≥1.20 <2.20	≥2.20

109

Hemijske osobine - primeri

- ♦ Test otpornosti **površine stakala** na **spoljašnje uticaje**

- ❑ To je ispitivanje materijala u uslovima povećane vlažnosti i povišene temperature. U takvim uslovima se često pojavljuju promene na površini stakala u obliku tankog filma koji daje efekat zamagljenosti i koji se ne može obrisati.
- ❑ Temperatura u komori sa ispoliranim **staklenim** pločicama osciluje između 40 °C i 50 °C u uslovima atmosfere zasićene vodenom parom u toku 30 h.
- ❑ Zatim se pomoću specijalnog instrumenta meri **razlika u zamagljenosti** (*haze difference*) između tretiranog i materijala koji nije bio izložen temperaturi i pari.
- ❑ Materijali (stakla) iz klase CR4 moraju pri skladištenju imati zaštitne prevlake ili biti u strogo kontrolisanim uslovima vlažnosti i temperature.

Klasa otpornosti prema spoljašnjim uticajima (CR)	1	2	3	4
Razlika u zamagljenosti	<0.3 %	≥0.3 % <1.0 %	≥1.0 % <2.0 %	≥2.0 %

110

Hemijske osobine - primeri

- ♦ Test otpornosti površine stakala na spoljašnje uticaje [W(s)]
- ❑ Sveže polirane pločice stakala postavljaju se u komoru na temperaturu od 60 °C i vlažnost od 95 % u trajanju od 24 h.
- ❑ Ukoliko je površina znatno oštećena, test se ponavlja u trajanju od 6 h na novim uzorcima.
- ❑ Klasifikacija se vrši u 4 grupe na osnovu posmatranja tretirane površine pomoću mikroskopa sa uvećanjem 50×

Class	Klasifikacija
1	Ako nema primetnog potamnjenja pri tretmanu od 24 h i posmatranju pri osvetljenosti od 6000 lx
2	Ako nema primetnog potamnjenja pri tretmanu od 24 h i posmatranju pri osvetljenosti od 1500 lx, ali se potamnjenje primećuje pri osvetljenosti od 6000 lx.
3	Ako ima primetnog potamnjenja pri tretmanu od 24 h i posmatranju pri osvetljenosti od 1500 lx.
4	Ako ima primetnog potamnjenja pri tretmanu od 6 h i posmatranju pri osvetljenosti od 1500 lx.

111

Hemijske osobine - primeri

- ♦ Test otpornosti površine stakala na uticaj kiseline (SR) i fosfata (PR)
- ❑ Uzorci stakala se prave dimenzija 30×30×2 mm i ispoliraju se pod specifičnim uslovima.
- ❑ Okače se na platinsku žicu i potope u azotnu kiselinu (pH 0.3) ili u rastvor sirćetne kiseline (pH 4.6) na 25 °C u trajanju od 10 min, 100 min, 16 h ili 100 h.
- ❑ Drugi test predviđa potapanje u rastvor koji sadrži 0.01 mol/l tripolifosfata na 50 °C u trajanju od 15 min, 1 h, 4 h ili 16 h.
- ❑ Gubitak u masi uzorka se određuje na analitičkim terazijama.
- ❑ Vrš se proračun vremena potrebnog da korodira (nestane) površinski sloj debljine od 0.1 μm.

$t_{0.1}$ - vreme (u [h]) neophodno da korodira
 površinski sloj dubine 0.1 μm
 t_e - vreme tretmana u eksperimentu
 ρ - gustina materijala
 S - površina uzorka (u[cm²])
 m_1 - masa uzorka pre testa
 m_2 - masa uzorka posle testa

$$t_{0.1} = \frac{t_e \rho S}{(m_2 - m_1) \cdot 100} \quad [\text{h}]$$

- ♦ Ako je gubitak mase manji od 1 mg posle 100 h izloženosti delovanju kiseline pH 0.3, rezultat eksperimenta je prihvatljiv.

112

Hemijske osobine - primeri

- ♦ Klasifikacija se vrši prema sledećoj tabeli:

Klasa otpornosti prema kiselini (SR)	1	2	3	4	5		51	52	53
pH kiseline	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	4.6	4.6	4.6	4.6
Vreme $t_{0.1}$ neophodno za koroziju 0.1 μm (h)	>100	≤ 100 ≥ 10	<10 ≥ 1	<1 ≥ 0.1	<0.1	>10	≤ 10 ≥ 1	<1 ≥ 0.1	<0.1

- ♦ Klasa SR5 predstavlja prelaz između stakala otpornih na jake kiseline i stakala osetljivih i na slabije kiseline.
- ♦ Dodatni broj u klasifikaciji iza broja 5 je pokazatelj površinskih promena.

Dodatni broj	Površinske promene
.0	nema vidljivih promena
.1	providno, ali je površina nepravilna (talasasta, sa sitnim porama)
.2	interferentne boje (slabo selektivno razdvajanje)
.3	athezivni tanak beli sloj (jaka selekcija)
.4	slabo athezivni deblji sloj (površinska ljuska, pokorica)

113

Hemijske osobine - primeri

- ♦ Klasifikacija prema otpornosti na fosfate se vrši prema sledećoj tabeli:

Klasa otpornosti prema fosfatima (PR)	1	2	3	4
Vreme $t_{0.1}$ neophodno za koroziju 0.1 μm (h)	>240	≤ 240 ≥ 60	<60 ≥ 15	<15

- ♦ Ako se ispitivanje vrši u drugoj vrsti alkalnog fosfata i klasifikacija povezana sa vremenom potrebnim za koroziju sloja debljine 0.1 μm se nešto razlikuje. Zato je neophodno naglasiti i vrstu hemikalija koje se koriste u testiranju hemijske otpornosti.
- ♦ I ovde postoje dodatni brojevi u klasifikaciji koji su pokazatelji površinskih promena i koje se zapažaju golim okom.
- ♦ Postoje i testovi na delovanje baza (AR) - u natrijum-hidroksidu na 50 °C, pH 12, kao i na otpornost materijala (stakala) prema formiranju mrlja, pojavu obojenosti, ...

114

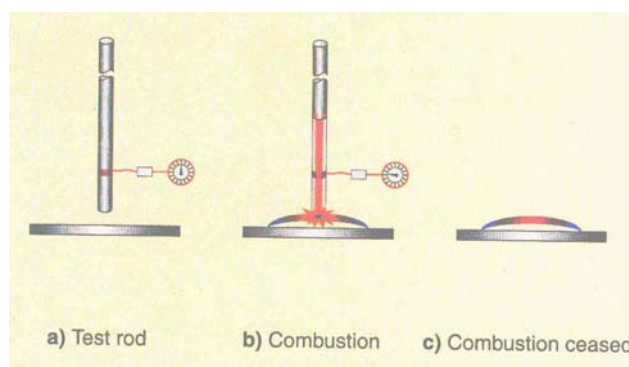
Hemijske osobine

- ◆ **Zapaljivost** materijala je od značaja za **plastična** sočiva izrađena od polimernih materijala organskog porekla.
- ◆ Testovi prema delovanju visoke temperature su raznovrsni i ocene se svode na **vizuelni pregled** tretiranog materijala.
- ◆ **Primer:**
 - ❑ Jedna grupa metoda podrazumeva, na primer, da se plastični materijali oblika epruvete širine 20 mm i dužine 40 mm izlažu delovanju otvorenog plamena prečnika 10 mm.
 - ❑ Kada se epruveta zapali, plamen se sklanja i prati efekat gorenja na dužini 10 mm. Na osnovu vremena potrebnog da sagori određeni deo epruvete i vizuelnih zapažanja izvode se zaključci o zapaljivosti oftalmoloških plastičnih materijala.

115

Hemijske osobine - primer

- ❑ Čelična šipka dužine 300 mm i prečnika 6 mm sa ravnim vrhom i montiranim termoparom na 20 mm od donjeg kraja zagreje se do 650 °C u dužini od 50 mm.
- ❑ Zatim se nasloni na plastično sočivo da svojom težinom vrši pritisak u trajanju od 5 s.
- ❑ Nakon toga se prati da li se nastavlja sagorevanje plastičnog materijala ili ne.



116

Termičke osobine - pregled

r.br.	Termička osobina	Fizička veličina	oznaka
1	toplotna provodljivost	koeficijent toplotne provodljivosti	λ
2	toplotni kapacitet	specifična toplota	c
3	termičko širenje	termički koeficijent linearnog širenja	α
4	termička stabilnost	karakteristične temperature oblasti omekšavanja (t. ostakljavanja, dil. t. omekšavanja, t. topljenja)	T_g T_{sp} T_{mp}

117

Električne i dielektrične osobine - pregled

r.br.	Električna ili dielektrična osobina	Fizička veličina	oznaka
1	dielektrična jačina	napon ili električno polje proboja	$U_{\max}$ $E_{\max}$
2	gubici električne snage	faktor dielektričnih gubitaka	$\operatorname{tg} \delta$
3	električna provodljivost	specifična provodljivost	σ
		specifična otpornost	ρ

118

Hemijske osobine - pregled

r.br.	Hemijska osobina	Fizička veličina	oznaka
1	otpornost materijala prema raznim uticajima (vlaga, voda, vodena para, kiseline, baze, ...)	klasifikacija prema: • gubitku mase materijala izloženog hemikalijama, • prema promenama u optičkim osobinama tretirane površine, • prema vremenu potrebnom za koroziju (gubitak) izvesnog sloja materijala	
2	zapaljivost	klasifikacija prema izazvanom efektu na površini materijala	