

dr Fedor Skuban

Materijali u optici i sočiva

I godina studija Optometrije

Departman za fiziku, PMF Novi Sad

1

Materijali u optici

- Značaj materijala u oftalmološkoj optici se ogleda, osim što uslovljavaju **oblik sočiva**, i u njihovoj **korektivnoj funkciji vida**.
- Materijali za sočiva su i **nosioči za prevlake**, tanke slojeve koji imaju razne zaštitne i antirefleksione uloge.
- Ubrzani razvoj nauke u XVIII i XIX veku doveo je do novih saznanja na polju strukture materije.
- Materija se sastoji od sitnih delića - atoma (dimenzije reda 10^{-10} m), koji su sastavljeni od jezgra (protoni i neutroni) i elektrona.
- Sva materija u vasioni se sastoji od kombinacije 100-injak vrsta atoma sistematizovanih u Periodni sistem elemenata.

2

- Prema **kompleksnosti** (složenosti) materijalna tela su podeljena u sledeće grupe:
 1. **Elementarne supstance** (prosta tela) - sačinjena od **jednog tipa atoma** (kiseonik, silicijum, gvožđe, ...).
 2. **Jedinjenja** (složena tela) - sastavljena od **jednog tipa molekula** (NaCl, Al₂O₃, SiO₂, H₂O, ...).Elementarne supstance i jedinjenja zajednički nose naziv **čiste supstance**.
- 3. **Smeše** - kombinacija elementarnih supstanci i jedinjenja, nisu strogo definisane hemijskim formulama (drvo, med, krv, čelik, vazduh, ...).

- Prema **vrsti**, prirodi **atoma**, materijalna tela su podeljena u sledeće grupe:
 1. **Neorganska** (mineralna) **materija** - čiste supstance i smeše sastavljene od elemenata koji se pojavljuju u Zemljinoj kori. Molekuli ovih tela sadrže manje od 20 atoma Periodnog sistema.
 2. **Organska materija** - čiste supstance i smeše koje su sadržane u živom (biljnom i životinjskom) svetu i fosilnim ostacima. Molekuli su sastavljeni od **velikog broja** (i po nekoliko hiljada) **nekoliko vrsta** atoma (vodonik - H, kiseonik - O, ugljenik - C i azot - N).

Periodni sistem elemenata Mendeljevea

	Ia	IIa											IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	O																
1	¹ H																	² He	1															
2	³ Li	⁴ Be											⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne	2															
3	¹¹ Na	¹² Mg	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIII				IB	IIb	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar	3														
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr	4															
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe	5															
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn	6															
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac																	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu	6
				⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr		7															

Zelena boja - elementi koji često ulaze u sastav materijala za oftalmološku optiku.

Crvena boja - elementi organske materije.

5

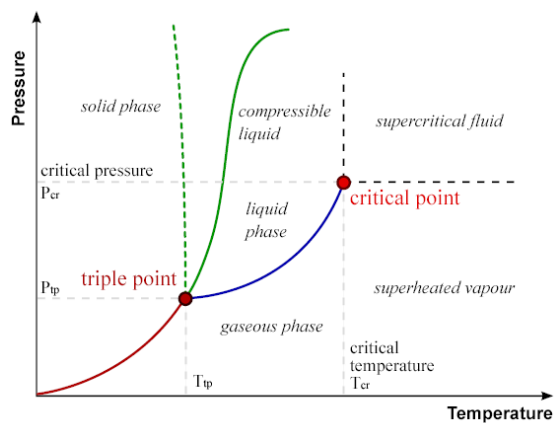
Materijali u optici i sočiva

▪ Materija se može naći u tri osnovna agregatna stanja:

1. **gasovito agregatno stanje** - pod normalnim uslovima privlačne međumolekulske sile su slabe da bi držale molekule (koji se haotično kreću) na okupu, zapremina i oblik je zavisen od prostora koji gas ispunjava.
2. **tečno agregatno stanje** - karakteristično za materiju na nižim temperaturama od gasovitog, međumolekulske (kohezije) sile drže molekule na malim međusobnim rastojanjima, a oblik tečnih tela zavisi od prostora u kome se nalaze.
3. **čvrsto agregatno stanje** - karakteristično za još niže temperature od tečnog stanja materije, molekuli samo osciluju oko svog ravnotežnog položaja koji je tačno određen u prostoru.

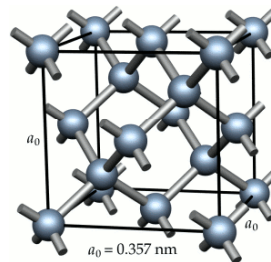
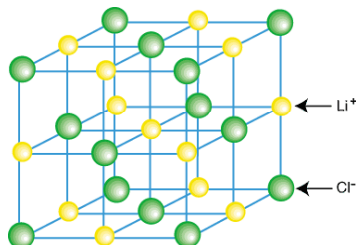
6

- Iz jednog u drugo agregatno stanje supstance prelaze u tzv. **faznim prelazima**, većinom na tačno određenim, definisanim temperaturama.



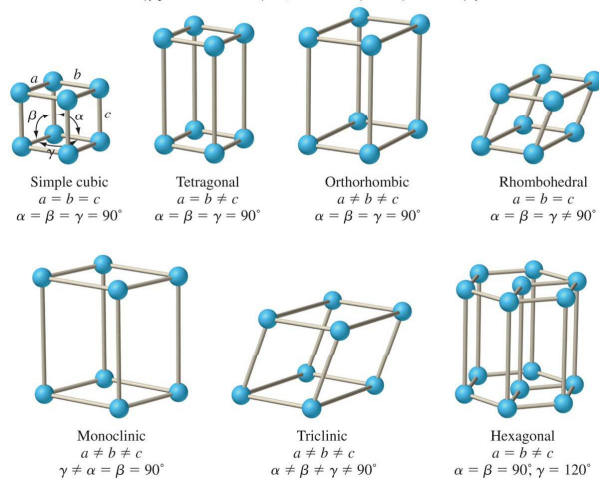
7

- Čvrsta materija se može podeliti i **prema stepenu uredenosti unutrašnje strukture**:
- Kristalno stanje materije** - potpuna **trodimenzionalna uredenost** strukture; atomi, joni ili molekuli su periodično raspoređeni u prostoru i čine tzv. **kristalnu rešetku**, a dužina i uglovi između hemijskih veza su konstantni.



8

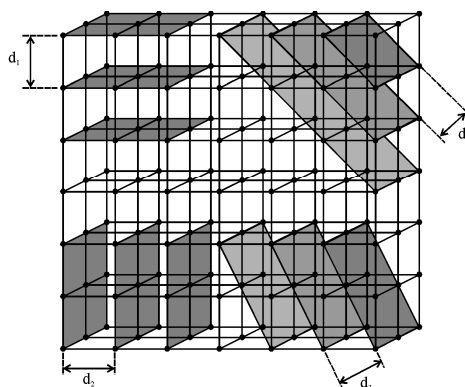
Primeri kristalnih rešetki



9

Kristalno stanje materije

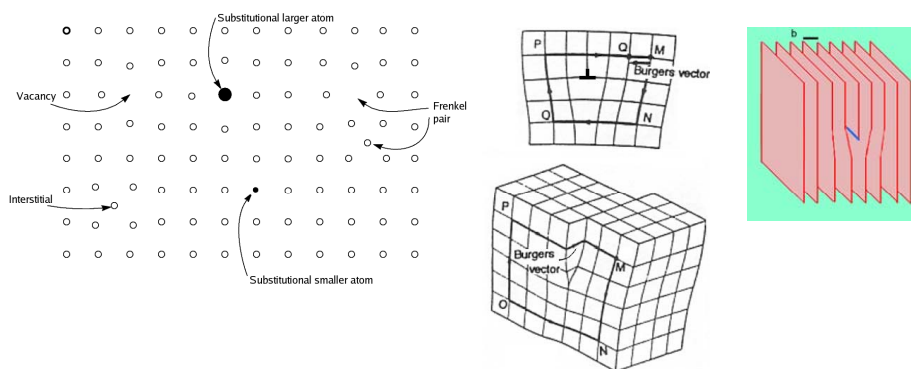
- Kristalnu materiju karakteriše tzv. **dugodometno uređenje strukture**.
- Većina materije u čvrstom stanju u prirodi je sa kristalnom unutrašnjom građom.
- Periodičnost kristalne strukture se može analizirati preko pojava **difrakcije** (rasejavanja, reflektovanja) **X-zraka** (ili neutrona, elektrona, ...).



10

Kristalno stanje materije

- **Idealna kristalna** (strukturno-uređena) **tela** nemaju defekata i periodičnost u prostoru je savršena.
- U **realnim kristalnim telima** postoje defekti u strukturi koji donekle narušavaju periodičnost (**tačkasti defekti**, vakancije - prazna mesta u kristalnoj rešetki, prekinute hemijske veze, ... ili **linijski defekti**, dislokacije, ...)



11

Amorfno stanje materije

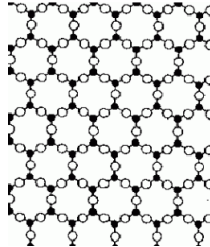
2. **Amorfno stanje materije** je sistem statistički ravnomerno i apsolutno bez periodične uređenosti raspoređenih atoma (jona, molekula) u neprekidnoj prostornoj mreži.
 - ♦ Ova **idealna amorfna struktura** ne postoji, jer čak i u rastopima i rastvorima postoji izvestan stepen uređenosti.
 - ♦ Amorfno stanje uređenosti materije je **širi pojam** koji obuhvata i **staklasto stanje materije**.
 - ♦ **Realna stakla** poseduju izvesnu uređenost u I koordinacionoj sferi (među najbližim susedima), tzv. **kratkodometnu uređenost strukture**.
 - ♦ Kratkodometna uređenost podrazumeva da se **koordinacioni broj, tip okolnih atoma, dužinu i tip hemijskih veza i međuatomska rastojanja i uglovi između hemijskih veza** tek neznatno razlikuju od onih u kristalnom obliku iste supstance.

12

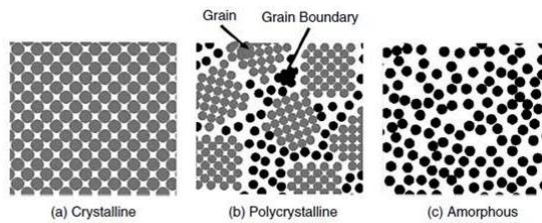
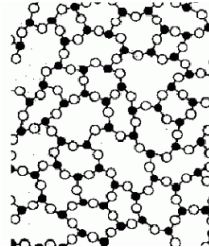
Amorfno stanje materije

- ♦ **Udaljavanjem** od prve koordinacione sfere deformacije u rasporedu strukturnih elemenata postaju u toj meri brojne da **uređenost prestaje da postoji**, čak i u aproksimativnom smislu.

Kristalna materija



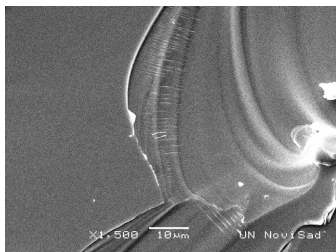
Amorfna materija



13

Amorfno stanje materije

- ♦ **Stakla** se karakterišu sledećim osnovnim osobinama:
 - dobijaju se isključivo **hlađenjem rastopa**;
 - na **prelomu**, pojava **površine proizvoljnog oblika**, najčešće školjkastog;
 - **odsustvo kristalne faze**, bilo u kompaktnom, bilo u dispergovanom obliku;

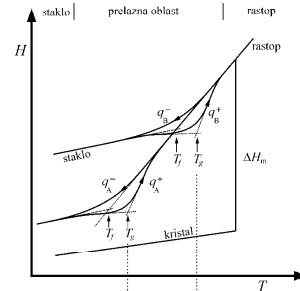
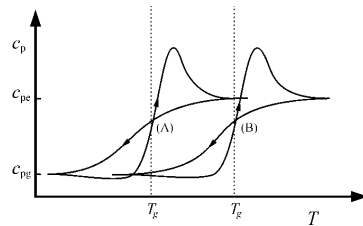


Školjkasti izlom kod stakala

14

Amorfno stanje materije

- **izotropnost fizičkih osobina**, tj. **nezavisnost od pravca**;
- posjedovanje **veće unutrašnje energije** u poređenju sa kristalnom materijom;
- postojanje **temperaturnog intervala ostakljavanja**, odnosno omekšavanja (postepena promena osobina) i karakterističnih temperatura u tom intervalu (T_g - temperatura ostakljavanja).



- ♦ Jedna od najsveobuhvatnijih definicija stakla tvrdi:

Staklom se naziva amorfna, **termodinamički nestabilna**, ali **kinetički stabilna** materija, koja se formira kao rezultat zamrzavanja strukture tečnosti (rastopa) pri **snižavanju njene temperature** ili **povećanju pritiska**.

Oftalmološki materijali

- ◆ Da bi se kod korisnika sočiva obezbedili optimalni uslovi korekcije vida, **naočalna sočiva treba da su:**
 - ❑ otporna prema formiranju ogrebotina na površini,
 - ❑ bezbedna za korišćenje pod normalnim uslovima,
 - ❑ da se lako mogu proizvesti i po razumnoj ceni,
 - ❑ optički i mehanički stabilna,
 - ❑ što je moguće tanja,
 - ❑ što je moguće lakša,
 - ❑ bez aberacije (hromatične ili sferne),
 - ❑ da ne ispoljavaju refleksiju sa površine.
- ◆ Ovi kriterijumi treba da opredele **izbor materijala** sočiva, iako prednosti na jednoj strani obično povlače neke nedostatke na drugoj strani.

16

Oftalmološki materijali

- ◆ **Idealni materijal** za naočalna sočiva treba da poseduje:
 - ❑ visok indeks prelamanja,
 - ❑ malu hromatičnu disperziju (velik Abeov broj),
 - ❑ malu gustinu,
 - ❑ sposobnost postavljanja antirefleksionih, tvrdih, hidrofobnih i svih ostalih vrsta prevlaka i slojeva,
 - ❑ sposobnost primanja svih vrsta boja,
 - ❑ sposobnost primanja fotohromnih aditiva ili slojeva,
 - ❑ sposobnost izrade asferičnih sočiva,
 - ❑ sposobnost izrade svih multifokalnih oblika, i
 - ❑ otpornost prema svim vrstama oštećenja i lomova.

17

Oftalmološki materijali

Osobine materijala koje su pod našom kontrolom su:

- ❑ indeks prelamanja,
- ❑ prosečna veličina sočiva i
- ❑ oblik.

Osobine materijala koje nisu pod našom kontrolom su:

- ❑ unutrašnji kvalitet sočiva,
- ❑ potrebe korisnika sočiva.

♦ Osnovna podela oftalmoloških materijala prema **prirodi materijala** (sastavu):

- **stakla,**
- **plastike (polimerni materijali).**

18

Oftalmološki materijali

Stakla

♦ Stakla (kao i plastike) se mogu podeliti u podvrste prema:

- **sastavu,**
- **indeksu prelamanja** (normalni, srednji, visoki, veoma visoki)
- **apsorpcionim osobinama** (providna ili bezbojna, bojena, fotohromna, sa specijalnim prevlakama, ...)
- **nameni** (zaštitne, sunčane, itd.) ...

♦ Stakla su **čvrsti, amorfni materijali** (neuređene unutrašnje strukture), koji su **tvrdi i lomljivi** (krti) na sobnoj temperaturi, a na visokom temperaturama postaju **viskozni**.

19

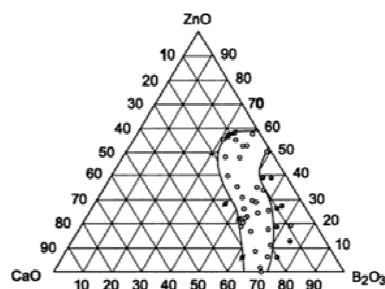
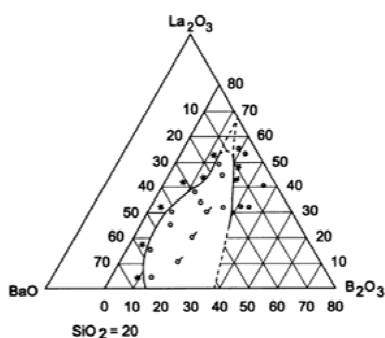
Stakla

- ❑ Stakla se dobijaju **topljenjem smeše oksida** raznih elemenata (Si, Na, Ca, K, B, Ba, Pb, Ti, La, ...) na temperaturama preko 1500 °C.
- ❑ Stakla imaju definisan **hemijski sastav**, ali **nemaju homogenu hemijsku strukturu** (smeše različitih molekula), ni strogo definisanu **temperaturu topljenja**, već ih karakteriše interval temperatura u kojem imaju viskozno-plastična svojstva.
- ❑ Ova osobina omogućava obradu, tj. **oblikovanje** u vrućem stanju.
- ❑ Oblikovana stakla se mogu **brusiti** i **polirati** u čvrstom (ohlađenom) stanju čime dobijaju na kvalitetu transparentnih osobina.

20

Stakla

- ♦ Izuzetni značaj stakala se ogleda u **moгуćnosti velike izmene u sadržaju** sastavnih komponenti, čime se **relativno proizvoljno**, tj. u širokim granicama može **uticati na razne fizičke osobine**.



← Dijagrami formiranja staklaste faze u zavisnosti od sadržaja sastavnih komponenti

21

Šta ulazi usastav stakala uopšte?

1a	2a	3b	4b	5b	6b	7b	8	1b	2b	3a	4a	5a	6a	7a	0		
H															He		
Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Osnovni sastojci mreže stakla

B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , ...

Modifikatori mreže stakla:

Na_2O , K_2O , CaO , PbO , BaO , ...

Fig. 2.11. Elements whose oxides act as glass-formers (hatched) and conditional glass-formers (crossed) for oxide glass systems [2.34]

↑
Oksidi

→
Fluoridi

1a	2a	3b	4b	5b	6b	7b	8	1b	2b	3a	4a	5a	6a	7a	0		
H															He		
Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Fig. 2.12. Elements whose fluorides act as glass-formers (hatched) and conditional glass-formers (crossed) for fluoride glass systems [2.48]

22

Stakla

- ♦ Istorijski razvoj optičkih (ne obavezno i oftalmoloških) stakala je tekao u tri koraka:
- 1. Pre 1880. optički sistemi su konstruisani sa **jednostavnim KRON-staklom** koje ima malu disperziju i **FLINT-staklom** sa velikom disperzijom
- 2. Od 1880. do 1895. godine Oto Šot (Otto Schott) i Ernst Abe (Ernst Abbe) su razvili nova optička stakla uvođenjem B_2O_3 , P_2O_5 i BaO .
- 3. Od 1930. do 1940. su razvijena nova stakla uvođenjem La (lantana) - **lantan-KRON** i **lantan-FLINT** stakla, a kasnije i stakla na bazi **B** i **La** (bora i lantana) i **fosfatna stakla sa fluorom** u svom sastavu.



Otto Schott
(1851-1935)



Ernst Abbe
(1840-1905)

23

Osnovna podela stakala prema vrsti (sastavu)

- ◆ U današnje vreme se proizvodi oko 250 vrsta optičkog stakla.
- ◆ Najznačajnija stakla za oftalmološka sočiva:
 - **Kron** staklo ($n = 1.523$; $v = 59$; gustina $2.54\text{--}2.61\text{ g/cm}^3$)
 - Najčešći materijal za izradu (monofokalnih) sočiva, tj. za naočari za čitanje i do sredine XX veka praktično jedini u upotrebi.
 - Jeftin materijal, veoma tvrd (tvrdi od većine materijala), ali velike krtosti.
 - Koristi se i za izradu veoma efikasnih fotohromnih sočiva.
 - **Flint** staklo ($n = 1.65\text{--}1.75$)
 - Pretežno za bifokalne segmente i ahromatična sočiva.
 - Ima veliku gustinu ($3.9\text{--}4.8\text{ g/cm}^3$).
 - Značajno mekši materijal od kron stakla.

24

Osnovna podela stakala prema vrsti (sastavu)

- **Barijumsko kron** staklo ($n=1.60$; $v=44$)
 - zamenjuje teško (velike gustine) flint staklo u izradi bifokalnih segmenata.
- **Borosilikatno** staklo
- Dodaci titanijuma **Ti**, lantana **La** i niobijuma **Nb** **povećavaju indeks prelamanja**
 - Takvi stakleni materijali se koriste za sočiva velikih jačina.
 - Nedostatak je **povećanje hromatične disperzije** (smanjenje Abeovog broja u oblast između 40 i 30), i povećanje gustine stakala.
 - Često se koriste u estetske (kozmetičke) svrhe.

25

Osnovna podela stakala prema vrsti (sastavu)

Primeri sastava:

Kron-staklo: 70 % SiO_2 15 % Na_2O 12 % CaO

Flint-staklo: 30 % SiO_2 8 % Na_2O 60 % PbO

(takođe više oksida K, As, Ti, Nb, Ta, Zr, ...)

Barijumsko kron staklo: 30 % SiO_2 35 % BaO

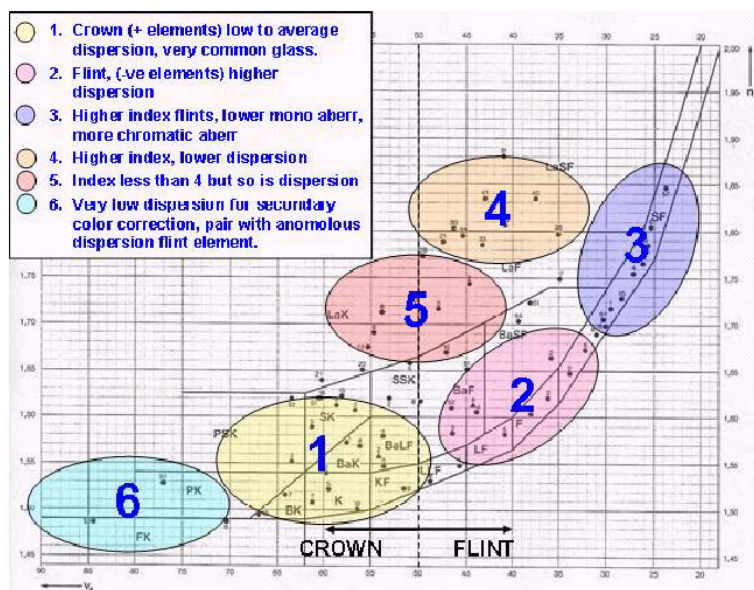
(takođe više oksida Ca, Zn, Al, B, ...)

Borosilikatno staklo: SiO_2 – B_2O_3

Napomena: sadržaje uslovno shvatiti.

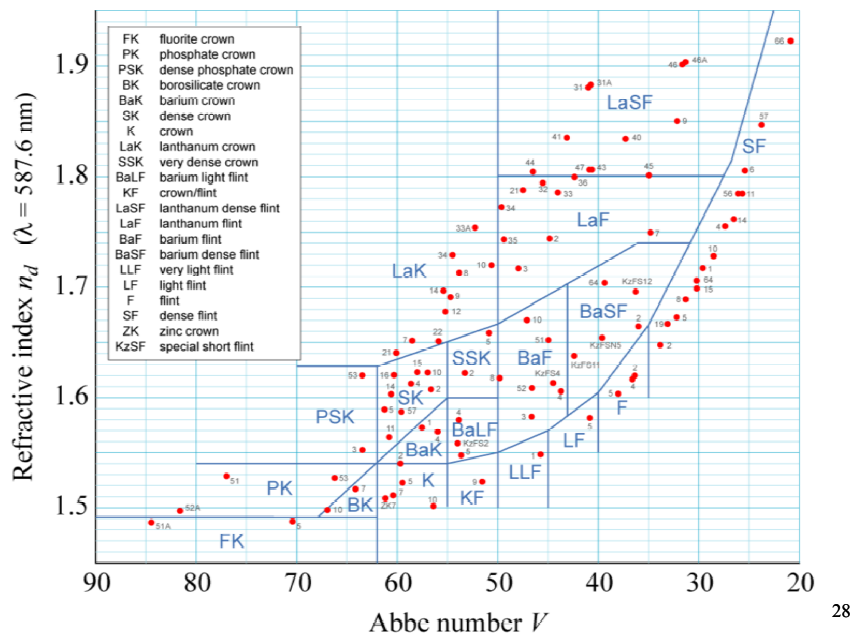
26

Abeov dijagram i razne vrste kron- i flint stakala



27

Tabela sastava stakala prema ranijoj osnovnoj podeli



Stakla – podela prema indeksu prelamanja

Stakla se prema indeksu prelamanja dele na

- ◆ **standardnog** (normalnog) indeksa prelamanja $n_d < 1.54$
 - ◆ **srednjeg** indeksa prelamanja $n_d = 1.54-1.64$
 - ◆ **visokog** indeksa prelamanja $n_d = 1.64-1.74$
 - ◆ **veoma visokog** indeksa prelamanja $n_d > 1.74$
- Stakla **standardnog** (normalnog) indeksa prelamanja ($n_d < 1.54$) i **srednjeg** indeksa prelamanja ($n_d < 1.64$) sadrže približno:
- 60-70 % SiO_2 , a ostatak čine oksidi **Na**, **Ca**, **K**, ..., pa i **B** i **Ti**.
- U ovu grupu stakala spadaju:
- **Na-Ca** (**natrijum-kalcijum**) stakla, (indeks relativno mali, 1.5, Abeov broj oko 60);
 - **borosilikatna** stakla (veći sadržaj oksida **B**, zatim **Zr**, indeks je veći (1.6), koriste se za fotohromna stakla).
 - **titanijumska** stakla (veće učešće oksida titanijuma)

Stakla – podela prema indeksu prelamanja

- Stakla srednjeg indeksa prelamanja su uvedena u upotrebu kao:
 - **Kompromis** između stakala indeksa 1.70 i velike gustine i hromatične disperzije i optički kvalitetnog, ali relativno velike debljine kron stakla.
 - Gustina ovih stakala se kreće u intervalu od **2.4–2.75** g/cm³ (kao i kron-staklo), a indeks prelamanja od **1.54–1.64**. U današnje vreme ove vrednosti i osobine ne predstavljaju neke značajne prednosti.
 - Skuplja su od kron stakla, dok Abeov broj ($\nu=41–44$) nije više bolji od mnogih stakala tipa 1.70.
 - **Dve prednosti** zbog kojih su stakla srednjeg indeksa još atraktivna i aktuelna su:
 - dobre **fotohromne** osobine, i
 - mogućnost konstrukcije **monofokalnih asferičnih** sočiva sa dobrim osobinama.

30

Stakla – podela prema indeksu prelamanja

- Stakla visokog i veoma visokog indeksa prelamanja ($n_d \geq 1.64$) sadrže u većem procentu:
 - takođe okside **Ti**, ali i okside **elemenata retkih zemalja – lantana i niobijuma** (**La, Nb, ...**) što utiče i na gustinu materijala i na težinu, sada tanjih i manje zakrivljenih sočiva. Abeov broj ovih stakala je nizak, za stakla sa Ti uobičajeno ispod 40, što ukazuje na povećanu hromatičnost.
- U ovu grupu stakala spadaju:
- **titanijum-lantan** stakla
 - **lantani-niobijum** stakla

31

Stakla – podela prema indeksu prelamanja

- Stakla visokog i veoma visokog indeksa prelamanja su uvedena u upotrebu:
 - sa ciljem da se **smanji debljina** sočiva velikih jačina, što, u stvari, ukazuje na veliki **estetski značaj** tanjih sočiva i njihovu **osnovnu svrhu** upotrebe.
 - Gustina ovih stakala se kreće u intervalu od **3–4.8 g/cm³**, a indeks prelamanja od **1.64–1.9**.
 - Podložna su stvaranju ogrebotina, a takođe su i krta.
 - Skuplja su od kron stakla.
 - Abeov broj varira u širokom intervalu ($v=27-42$).
 - Veoma često se koriste za:
 - izradu bifokalnih segmenata i asferična sočiva (visoki indeks).

32

Tabela sastava stakala prema indeksu prelamanja

Component	Oxide	GLASS MATERIAL TYPES							
		Sodium-Calcium		Borosilicate		Titanium	Titanium/ Lanthanum	Lanthanum/Niobium	
		1.5 clear	1.5 tinted	1.5 photo	1.6 photo	1.6 clear	1.7 clear	1.8 clear	1.9 clear
Silicium	SiO ₂	70	71	57	48	56	36	29	7
Aluminum	Al ₂ O ₃	1	-	6	-	1	-	-	-
Boron	B ₂ O ₃	1	-	18	15	6	10	2	17
Sodium	Na ₂ O	11	12	4	1	9	2	-	-
Potassium	K ₂ O	5	6	6	5	8	-	-	-
Lithium	Li ₂ O	-	-	2	2	4	6	4	-
Magnesium	MgO	1	-	-	-	-	-	-	-
Calcium	CaO	9	11	-	-	-	9	15	14
Barium	BaO	2	-	-	6	-	-	-	-
Zirconium	ZrO ₂	-	-	5	7	1	5	5	8
Titanium	TiO ₂	-	-	2	6	15	6	9	9
Niobium	Nb ₂ O ₅	-	-	-	8	-	9	15	21
Lanthanum	La ₂ O ₃	-	-	-	-	-	14	21	24
Strontium	SrO	-	-	-	2	-	3	-	-
Iron	Fe ₂ O ₃	-	1	-	-	-	-	-	-

33

Stakla – podela prema apsorpcionim osobinama

- ◆ Prema **apsorpcionim** osobinama, stakla (pa i plastike) se svrstavaju u:

- ❑ **providna** (čista, bezbojna, bistra, *clear*),
- ❑ **bojena** (nijansirana, zatamnjena, *tinted*).

Bojeni stakleni materijali se još dele na materijale sa:

- **permanentnim** apsorpcionim osobinama (permanentnom bojom - **zapreminski** ili **površinski** bojena stakla)
- **promenljivim** apsorpcionim osobinama (**fotohromni**),
a kao posebnu vrstu mogu se izdvojiti:
 - **filtri**.

34

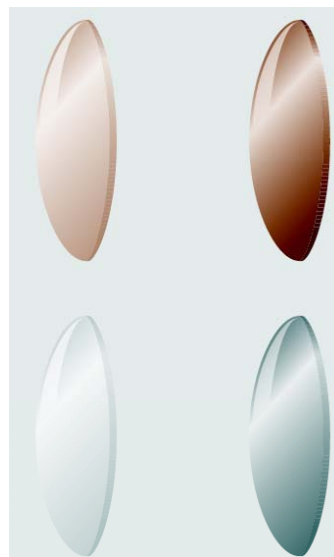
Stakla – podela prema apsorpcionim osobinama

- ◆ **Zapreminski** (masivno) **bojena stakla** (spadaju u grupu **stakala sa permanentnom bojom**) se proizvode uvođenjem:
 - **sol** ili **oksida metala** sa specifičnim apsorpcionim osobinama u sastav stakala.
 - Boja je uniformno raspoređena u celoj zapremini materijala.
- ◆ Na konačan rezultat bojenja (apsorpcione osobine) najviše utiču
 - **vrsta i količina** aditiva,
 - **uslovi topljenja** smeše sirovina u proizvodnji,
 - **temperatura** rastopljene smeše i temperature u toku raznih koraka proizvodnje, kao i **vreme** trajanja obrade,
 - **atmosfera** u kojoj se vrši proizvodnja.
- ◆ **Površinski bojena staklena sočiva** se dobijaju **vakuumskim naparavanjem** (vakuum 10^{-5} mbar) tankog **uniformnog** sloja na **jednu stranu** sočiva.

35

Fotohromna stakla

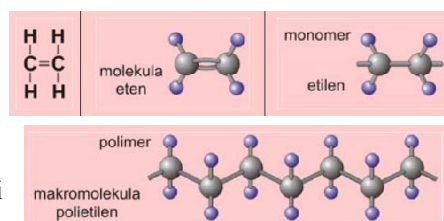
- ♦ **Fotohromizam** je osobina staklastih i plastičnih materijala za sočiva da pod uticajem sunčeve svetlosti **menja apsorpcione osobine**.
- ♦ **UV** zračenje aktivira proces potamnjenja, a **toplota** vraća providnost.
- ♦ Suština pojave je u **aktivaciji molekula** fotohromne supstance ugrađene u materijal.
- ♦ Rezultantna apsorpcija je određena **ravnotežom** između molekula aktiviranih UV zračenjem u molekula deaktiviranih toplotom.



36

Plastični (polimerni) materijali

- ❑ Plastični materijali su supstance **organskog** (C, H, O, N) ili **neorganskog porekla** složenog molekulskog sastava i strukture.
- ❑ Reč polimer je nastala od grčkih *poli* (mnogo) i *meros* (deo).
- ❑ **Polimer** – materija sastavljena od velikih molekula (makromolekula – velike molekulske mase i dimenzija) koji su nastali spajanjem (povezivanjem) velikog broja manjih gradivnih jedinica, molekula, koji se nazivaju **monomeri**.
- ❑ Hemijske veze između molekula unutar makromolekula su **kovalentne**, a između makromolekula mogu biti i drugog tipa (**Van-der-Waalsove**, **vodonični mostovi**, **dipol-dipol interakcije** ...)
- ❑ Mogu se **podeliti** na različite načine:
 - Prema **načinu nastajanja (poreklu)**:
 - prirodni,
 - **polusintetički** (modifikovani prirodni), i
 - **sintetički** (veštački).

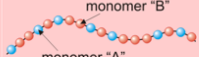
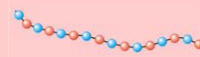
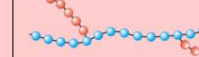


37

Plastični (polimerni) materijali

➤ Prema **vrsti molekula** koji koji stvaraju makromolekule:

- **homopolimeri** (jedna vrsta monomera), i
- **kopolimeri** (dve ili više vrsta monomera).

nasumični kopolimeri	naizmjenični kopolimeri	blok-kopolimeri	cijepljeni kopolimeri
			

➤ Prema ponašanju pri zagrevanju i **elastičnim svojstvima**:

- **plastomeri** (pri zagrevanju omekšavaju i mogu se preoblikovati),
- **duromeri** (pri zagrevanju ne omekšavaju, ne mogu se preoblikovati),

i jedni i drugi čine **plastike**, a postoje i:

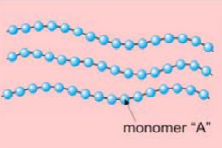
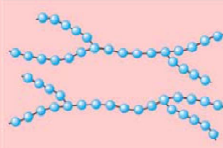
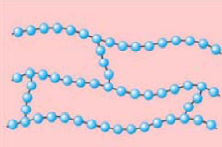
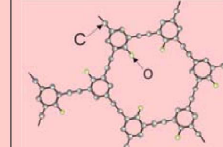
- **elastomeri** (izražena elastična svojstva, slabe sile između makromolekula - guma), i
- **elastoplastomeri** (imaju elastična svojstva na sobnim temperaturama, a ponašaju se kao plastomeri na povišenim).

38

Plastični (polimerni) materijali

➤ Prema **strukтури** (obliku) makromolekula:

- **linearni**,
- **razgranati**,
- **poprečno povezani**, i
- **umreženi**.

linearni polimeri	granati polimeri
	
poprečno vezani polimeri	umreženi polimeri
	

➤ Prema **načinu polimerizacije**:

- **adicionom polimerizacijom** nastaju adicioni ili lančani polimeri,
- **kondenzacionom (stepenastom) polimerizacijom** nastaju kondenzacioni (stepenasti) polimeri, i kao nusproizvod – kondenzat (voda).

39

Plastični (polimerni) materijali

➤ Prema **uređenosti** unutrašnje strukture:

- amorfni,
- delimično kristalni (stepen kristaličnosti ide i preko 90 %), i
- orijentisani.

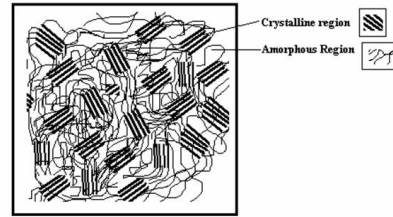


Fig 1. Mixed Amorphous Crystalline Macromolecular Polymer Structure

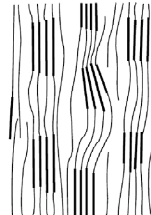
Amorfni polimer



Semikristalični polimer



Orijentirani polimer



40

Plastični materijali

❑ Plastični materijali za oftalmološka sočiva se mogu podeliti u dve osnovne grupe, uglavnom zbog različitog načina proizvodnje i zbog različitih osobina (različito ponašanje pri zagrevanju):

1. **Termoočvršćavajuće smole** (*thermosetting resins*) – (duromeri, duroplasti, termostabilni polimeri)
2. **Termoplastične smole** (*thermoplastic resins*) – (plastomeri, termoplasti, termoplastični polimeri)

41

Plastični materijali

1. Termoočvršćavajuće smole

- Očvršćavaju pod uticajem toplote, ali ih je **nemoguće naknadno** omekšati i oblikovati;
- Imaju molekule koji se uređuju u **tri dimenzije** (poprečno povezivanje ili umrežavanje) za vreme procesa polimerizacije (povezivanja molekula u skupove molekula); to ovim materijalima daje veću otpornost prema abraziji, habanju (stvaranju ogrebotina) nego prema udarcu.
- **Povećanje indeksa prelamanja** se može vršiti na dva osnovna načina:
 - **modifikacijom elektronske strukture** polaznih molekula (uvođenjem aromatičnih molekula) ili
 - **uvođenjem teških atoma**, kao što su halogeni elementi (Cl, Br) ili sumpor.

42

Plastični materijali

1. Termoočvršćavajuće smole

- Sočiva koja se proizvode od termoočvršćavajućih smola, dobijaju se **livenjem u kalupe** u **monomernom** obliku, uz dodatak **katalizatora**, za ubrzavanje procesa polimerizacije, i zatim očvršćavanjem. Proces polimerizacije se izaziva **toplotom**.
- Čine **većinu** plastičnih materijala korišćenih u optici, a glavni predstavnik i najzastupljeniji na tržištu je **CR 39**.

43

Plastični materijali

2. Termoplastične smole

- **Mogu se naknadno oblikovati** u termički izazvanom omekšanom stanju;
- imaju molekulsku strukturu u obliku dugačkih **dvodimenzionalnih** lanaca;
- termoplastični materijali, **ubrizgavaju se u kalup** u obliku vrele tečnosti, a zatim hlade i formiraju dugačke lančaste molekule koji mogu **klizati** jedan preko drugog, čime se stvara struktura u kojoj je manje izražena otpornost prema habanju, a više **otpornost prema udarcu**;
- tipični predstavnici su **PMMA** (polimetil metakrilat ili pleksiglas, slabo otporan na habanje) i, u novije vreme, **polikarbonati**.

44

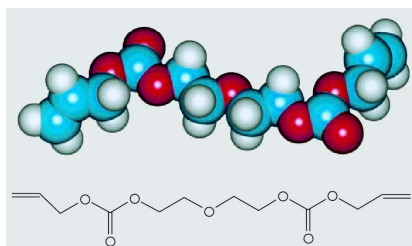
Plastični materijali standardnog indeksa

Termoočvršćavajuće smole - **CR39**

- ❑ **CR 39** (dietilen glikol, ili alil diglikol karbonat) je polimerizujuća **termoočvršćavajuća** smola.
- ❑ U osnovnom obliku je monomer u tečnom stanju, a pod uticajem **toplote** i **katalizatora** (diizopropil peroksidikarbonata (IPP)) koji se dodaje radi ubrzavanja reakcije polimerizacije - očvršćava.

↓ Polimer CR 39

Monomer CR 39 ↓



45

**Plastični materijali standardnog indeksa prelamanja
Termoočvršćavajuće smole - CR39**

Karakterišu ga:

- ❑ indeks prelamanja kao kod standardnih stakala ($n_d = 1.498$);
- ❑ gustina $\rho = 1.32 \text{ g/cm}^3$, što kao konačan rezultat daje sočiva upola manje težine u odnosu na sočiva od kron stakla;
- ❑ mala hromatičnost ($v_d = 58-59$);
- ❑ visoka transparentija;
- ❑ lako se može bojiti i tretirati raznim prevlakama (tvrdim, AR i hidrofobnim);
- ❑ neosetljiv na većinu rastvarača;
- ❑ otpornost na udarce, ali i
- ograničena otpornost prema habanju (meka površina).

46

Plastični materijali standardnog indeksa prelamanja – Trivex

Trivex ne upada ni u jednu od uvedenih klasifikacija plastičnih materijala.

Karakterišu ga:

- ❑ indeks prelamanja $n_d = 1.532$;
- ❑ gustina $\rho = 1.1 \text{ g/cm}^3$;
- ❑ Abeov broj $v_d = 43-46$;
- ❑ velika otpornost prema pojavi naponskih sila u strukturi – pogodan za izradu sočiva za bezokvirne naočari;
- ❑ poboljšana hemijska otpornost;
- ❑ izuzetno velika otpornost na udarce.

47

Plastični materijali srednjeg i visokog indeksa prelamanja

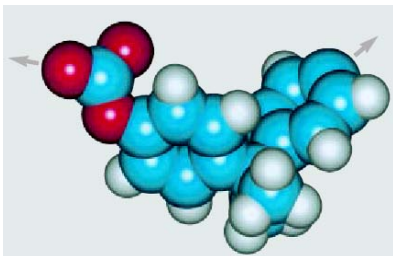
- ❑ U novije vreme zabeležen je znatan napredak u razvoju plastičnih materijala srednjeg i visokog indeksa prelamanja ($n_d \geq 1.56$).
- ❑ Imaju **sličnu gustinu** kao i raniji plastični materijali, pa omogućavaju proizvodnju tanjih i lakših sočiva (pokazatelj CVF).
- ❑ Pružaju dobru UV zaštitu.
- Imaju nešto **veću hromatičnost** ($v_d \leq 45$), neki i osetljivost prema toploti.
- Mana većine ovih materijala je **ograničena otpornost prema habanju**, tako da se moraju prevlačiti raznim zaštitnim prevlakama.

48

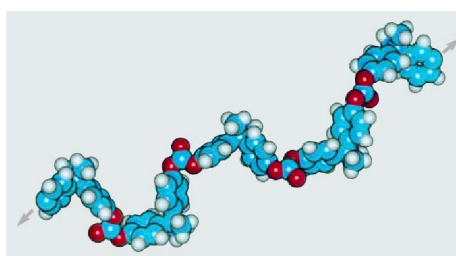
Termoplastične smole - **Polikarbonat**

- ◆ **Polikarbonati** spadaju u termoplastične materijale (linearna polimerna termoplastika).
- ◆ Dobija se topljenjem granulata i ubrizgavanjem u kalup, a u procesu hlađenja se vrši polimerizacija i stvaranje čvrste strukture.

Monomer polikarbonata ↓



↓ Polimer polikarbonata



49

Termoplastične smole - Polikarbonat

Karakterišu ga:

- ❑ Izvrsna **otpornost prema udarcu** (10 puta veća od CR 39) – odličan za zaštitne naočari;
- ❑ visoke vrednosti indeksa prelamanja ($n_d = 1.586$);
- ❑ visoka otpornost prema toploti ($T_g > 140\text{ °C}$);
- ❑ mala gustina, $\rho = 1.20\text{ g/cm}^3$;
- ❑ efikasna zaštita od **UV** zračenja;
- otežano **bojenje**;
- **složena proizvodnja**, oivičavanje (isecanje za okvir), kontrola kvaliteta;
- relativno **visoka hromatičnost** ($v_d = 28\text{--}30$);
- **ograničena otpornost prema habanju** - neophodna zaštita tvrdim prevlakama;
- **osetljiv** na mnoge **rastvarače**.

50

Plastični materijali sa promenljivim apsorpcionim osobinama

Fotohromni plastični materijali

- ❑ Kao i kod stakala, i plastični fotohromni materijali pod uticajem UV zračenja potamne.
- ❑ Mehanizam potamnjenja je potpuno drukčiji u poređenju sa staklima, a razlike postoje i u zavisnosti od fotohromnog aditiva.
- ❑ U plastike se dodaju drugi fotohromni materijali, kao što su **spiro-oksazini**, **spiro-pirani** ili **spiro-fulgidi**.
- ❑ Dodavanje se vrši ili pre polimerizacije (mešanje sa monomerom) ili natapanjem (upijanjem) posle polimerizacije.
- ❑ Pod uticajem UV zraka dolazi do **strukturnih promena**, usled čega se menjaju apsorpcione osobine.

51

Fizički podaci za neke staklene materijale

Materijal	n_d	Abeov broj	gustina [g/cm ³]	CVF	UV cut-off	aps. UVA / UVB	ρ (%)	R [%]
Stakla								
belo kron	1.523	59	2.5	1	320	20 / 70	4.3	8.2
laki flint	1.600	42	2.6	0.87	334	61 / 100	5.3	10.1
1.7 stakla	1.700	35	3.2	0.75	340	76 / 100	6.7	12.6
	1.701	42	3.2	0.75	320		6.7	12.6
1.8 stakla	1.800	25	3.4	0.65		81 / 100	8.2	15.2
	1.802	35	3.7	0.65	332		8.2	15.2
	1.830	32	3.6	0.63	340		8.6	15.8
1.9 stakla	1.885	31	4.0	0.59	340	76 / 100	9.4	17.2

52

Fizički podaci za neke plastične materijale

Materijal	n_d	Abeov broj	gustina [g/cm ³]	CVF	UV cut-off	aps. UVA / UVB	ρ (%)	R [%]
CR39	1.498	59	1.3	1	355	90 / 100	4	7.7
CR607	1.497	57	1.3	1		100 / 100	4	7.7
PMMA	1.490	58	1.2	1.02			3.9	7.5
INDO Superfin	1.523	48	1.4	0.95	350		4.3	8.2
Trivex	1.532	46	1.1	0.94	380	100 / 100	4.4	8.4
Sola Spectralite	1.537	47	1.2	0.93	385	98 / 100	4.5	8.6
CR424	1.554	38	1.2	0.90			4.7	9.0
Corning SunSensors	1.555	38	1.2	0.90	380		4.7	9.0
PPG HIP	1.56	38	1.2	0.89	370		4.8	9.2
Essilor Ormex	1.56	37	1.2	0.89		100 / 100	4.8	9.2
Polikarbonati	1.586	30	1.2	0.85	385	100 / 100	5.2	9.9
Hoya Eyas 1.6	1.600	42	1.3	0.83	380		5.3	10.1
MR-8 1.6	1.6	41	1.3	0.83		100 / 100	5.3	10.1
MR-6 1.6	1.6	36	1.3	0.83		100 / 100	5.3	10.1
Sola Finalite	1.6	42	1.2	0.83		100 / 100	5.3	10.1
Poliuretani	1.600	36	1.3	0.83	380		5.3	10.1
	1.660	32	1.4	0.75	375		6.2	11.7
	1.670	32	1.4	0.74	395		6.3	11.9
MR -7 1.67	1.66	32	1.3	0.75		100 / 100	6.3	11.9
MR-10 1.67	1.66	32	1.4	0.75		100 / 100	6.3	11.9
Hoya Eyry 1.7	1.695	36	1.4	0.72	380	100 / 100	6.7	12.6
Hoya Teslaid	1.710	36	1.4	0.70	380		6.9	12.9
Veoma visoki indeks	1.740	33	1.5	0.67	400		7.3	13.6
Nikon	1.740	32	1.4	0.67			7.3	13.6

53

Prednosti različitih tipova materijala

Prednosti **staklenih** naočalnih sočiva

- ❑ otpornost površine prema habanju,
- ❑ povećana postojanost,
- ❑ dostupnost u širokom spektru indeksa prelamanja od 1.5 do 1.9 – veoma visoki indeksi omogućavaju dobijanje sočiva velikih optičkih jačina,
- ❑ ređa pojava obojenih pruga (kao posledica hromatične aberacije) po ivicama predmeta u poređenju sa plastičnim materijalima uporedljivog indeksa prelamanja,
- ❑ stabilnost na visokim temperaturama.

54

Prednosti različitih tipova materijala

Prednosti **plastičnih** naočalnih sočiva

- ❑ lagani materijali, koji obezbeđuju visok komfor pri korišćenju,
- ❑ pogodni u slučajevima kada se zahteva povećana bezbednost, kao kod sportista ili dece,
- ❑ većina materijala se lako boji,
- ❑ veoma prilagodljivi većini tipova okvira,
- ❑ izbor indeksa prelamanja trenutno od 1.5 do 1.74,
- ❑ visoka otpornost prema hemijskim rastvaračima,
- ❑ otpornost prema delovanju toplote do 100 °C i prema malim vrelim letećim česticama kao što su iskre pri zavarivanju.

55

Proizvodnja sočiva

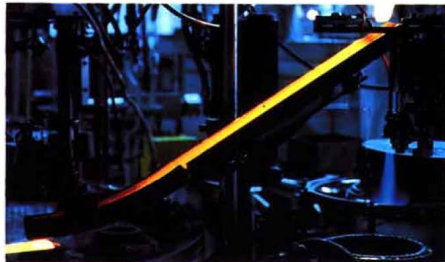
Proizvodnja staklenih sočiva

Početna faza:

1. **Mešanje** polaznih komponenti.
2. **Topljenje.**
3. **Ukalupljivanje usijane mase** stakla - dobijanje fizički i hemijski homogene čvrste supstance sa amorfnom strukturom.

56

1 - Flow process



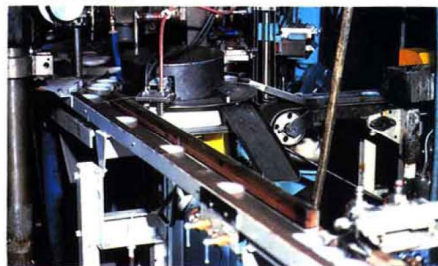
2 - Liquid glass casting



3 - Blank cooling



4 - Blank casting



5 - Blanks leaving the casting line

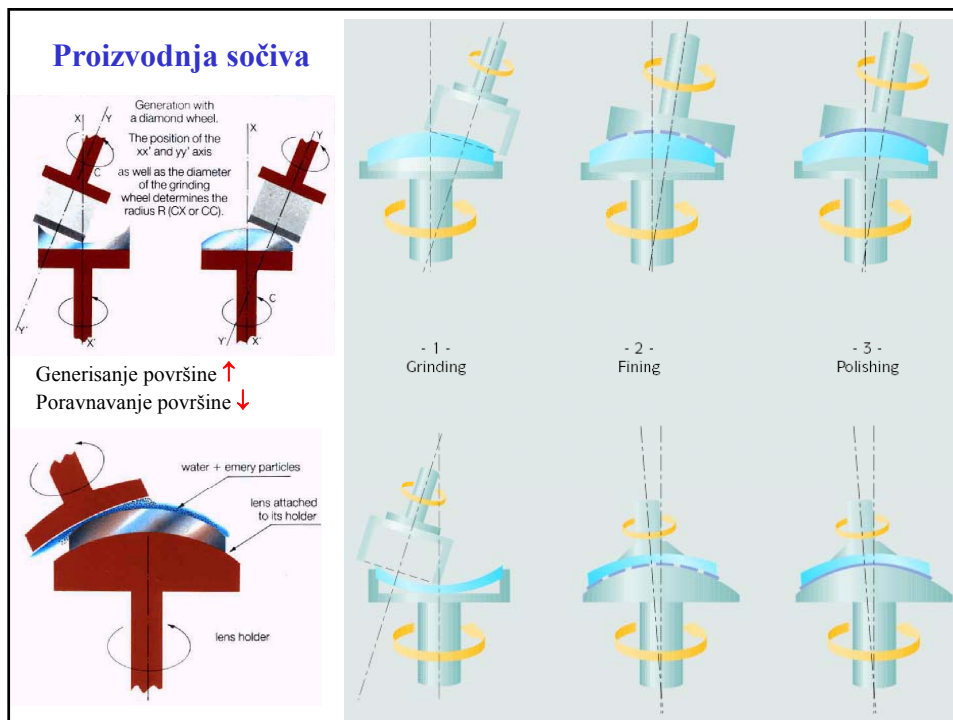
57

Proizvodnja sočiva

Obrada površina se sastoji od **3 faze**, a prva faza može imati tri osnovna oblika:

1. **a) Grubo brušenje** – obrada površina pomoću brusnog alata, dijamantskog valjka do dobijanja **konačnog** oblika, ali grube površine. Koristi se u masovnoj proizvodnji i zahteva posebni alat za svaki oblik krivine.
- b) Generisanje** – obrada površina pomoću mašine za generisanje (ima rotirajući nož sa zakrivljenim krajem) površine proizvoljnog (sfernog ili toroidalnog) oblika. Koristi se u manjim laboratorijama gde se izrađuju sočiva prema receptu (potrebama ko-risnika).
- c) Rezanje** (sečenje, isecanje) – obrada površina pomoću jednostrukog (jednotačka- stog, *single point cutter*) rezača, koji za vreme obrade osciluje u odnosu na sočivo.
2. **Fino brušenje** – **poravnavanje** malih neravnina bez modifikacije krivina. Vršiti se abrazivnim jastučetom ili diskom, uz korišćenje rastvora (suspenzije) abraziva (**korund** u vodi).
3. **Poliranje** – vrši se diskom za poliranje i rastvorom (suspenzijom) abrazivnog sredstva (**Ce** ili **Ti oksid** u vodi). Sočivo dobija krajnje transparentne osobine.

58



Proizvodnja sočiva

- Jedan od postupaka proizvodnje **staklenih** sočiva koji se primenjuje u slučaju polugotovih **progresivnih** sočiva je tzv. “sleganje” (“*slumping*”).
- U prvoj fazi se proizvodi keramički blok (kompjuterski kontrolisanim mašinama za brušenje) koji ima oblik gornje površine kao što zahteva progresivno sočivo.
- Polirani planarni (sa paralelnim stranama) stakleni odlivak se postavlja na keramički blok i izlaže pažljivo kontrolisanom procesu grejanja – dovoljno da omogući krivljenje, ali ne i topljenje.
- Nakon postizanja oblika bloka (prednja, progresivna strana), sočivo se skida sa njega i podvrgava površinskoj obradi zadnje površine.



Proces "sleganja" (*slumping*) stakla.

60

Proizvodnja sočiva

Proizvodnja **plastičnih** sočiva - termoočvršćavajuće smole

- ♦ Primer: **CR 39** - **direktna polimerizacija**
- 1. **Priprema monomera** – filtriranje,
 - oslobađanje gasova,
 - dodavanje katalizatora.
- 2. **Priprema kalupa** – dvodelni kalupi (metalni, stakleni) se učvršćuju štipaljkama ili athezivnom trakom.



Delovi korišćeni za livenje sočiva prikazuju elastičnu zaptivku, opružnu štipaljku i gornji i donji deo staklenog kalupa.

61

Proizvodnja sočiva

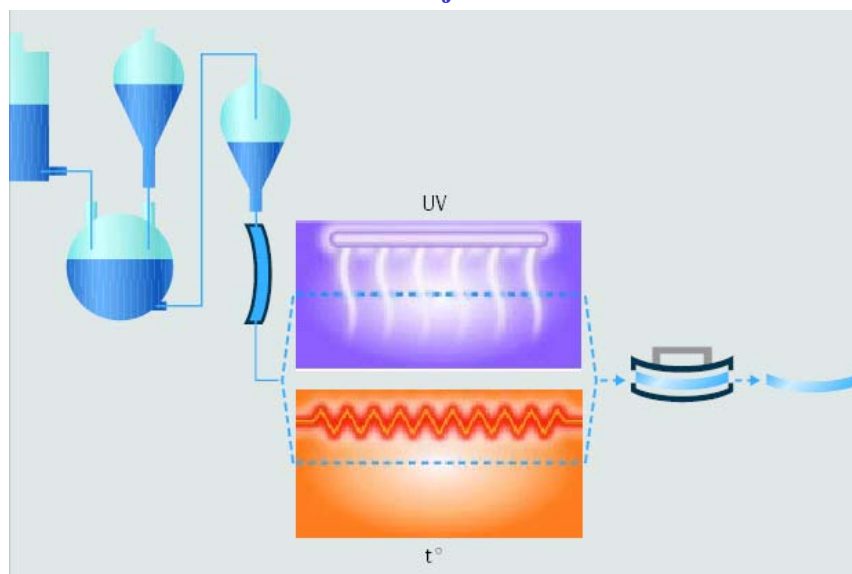
3. **Punjenje** – tečnim monomerom se popunjava prostor kalupa – **livenje**.
4. **Polimerizacija** – kalupi se stavljaju u peć i podvrgavaju **grejnom ciklusu** u trajanju od nekoliko sati (14-16 h) ili se **izlažu delovanju UV zraka** u trajanju od nekoliko minuta radi formiranja polimerne strukturne matrice.
5. **Vađenje iz kalupa.**

U praksi se u masovnoj proizvodnji sočiva često koristi sistem pod nazivom **“open-and-shut”** (“otvori-i-zatvori” sistem) – proizvodnja koja podrazumeva korišćenje istih kalupa za niz uzastopnih kružnih ciklusa.



62

Proizvodnja sočiva



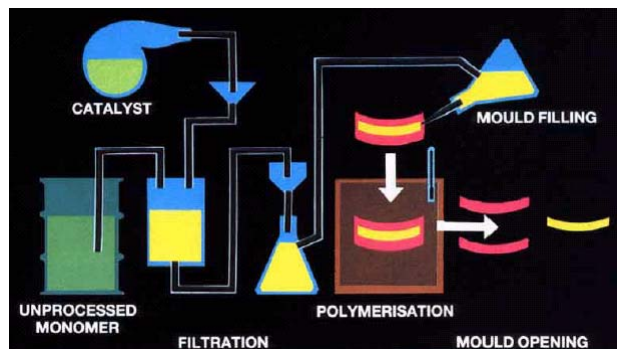
Proizvodnja CR 39 - (termoočvršćavajuća smola)

63

Proizvodnja sočiva

Završne faze:

1. **sečenje** (poravnavanje) **ivica**;
2. **odgrevanje**, čime se eliminišu naponi nastali prilikom livenja;
3. **vizuelne provere**, čime se kontroliše prisustvo eventualnih defekata;
4. **provera optičke moći** sočiva (zakrivljenosti površina);
5. **bojena** ili **sočiva na koje se nanose prevlake** raznih tipova se **ponovo** proveravaju.



64

Proizvodnja sočiva

- ♦ Sočiva **velike optičke moći** ili **velike cilindrične moći** se ne prave postupkom direktne polimerizacije.
- ♦ Velike razlike u debljini sočiva u centru i po obodu sočiva uzrokuju pojavu velikih napona koji mogu dovesti do lomova staklenih kalupa. Razlog leži u **smanjenju zapremine** tečnog monomera CR 39 pri očvršćavanju za oko **14 %**.
- ♦ Postupak kod ovakvih sočiva se odvija **u fazama**, tj. pomoću kalupa se dobija **polugotovo sočivo** čija se površina naknadno obrađuje.
- ♦ **Jedna površina** (sferna strana) se dobija **polimerizacijom** tako da ima krajnju zakrivljenost, a **druga površina** se ostavlja **neobrađenom**. Ovaj postupak polimerizacije **traje duže** nego u slučaju direktne polimerizacije.
- ♦ **Druga površina** se obrađuje na isti način kao i kod stakala: **brušenjem** i **poliranjem**, ali sa drugim vrstama abrazivnih materijala.

65

Proizvodnja sočiva

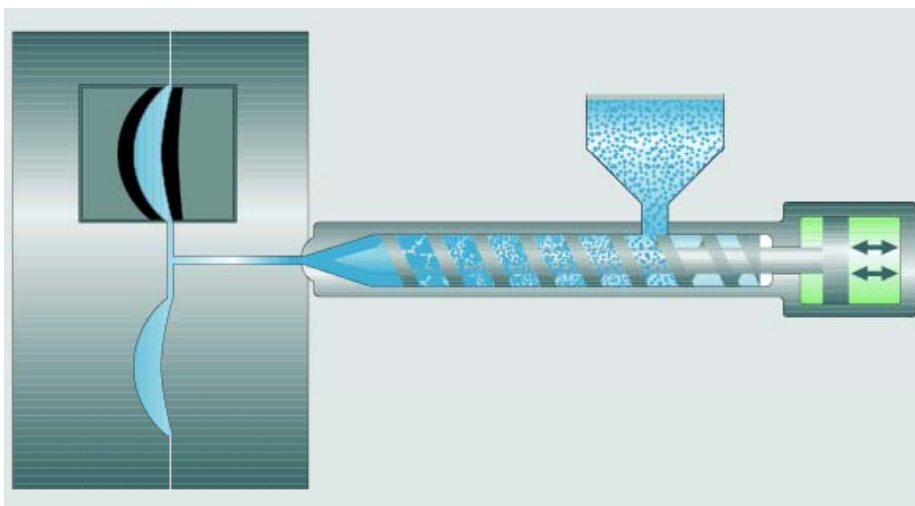
Proizvodnja **plastičnih** sočiva - termoplastične smole

♦ Primer: **polikarbonat**

1. **Priprema materijala** – sušenje granulata i stavljanje u presu.
2. **Priprema prese** – projektovanje kalupa, podešavanje prese, temperature kalupa, vremena ubrizgavanja i hlađenja, kao i grejanje materijala (do oko 300 °C).
3. **Ubrizgavanje** – potiskivanje istopljenog materijala pomoću prese u kalup – kalupljenje (ukalupljivanje) – proces koji se obavlja uz pomoć povišenog pritiska i temperature.
4. **Hlađenje** – očvršćavanje materijala prolaskom kroz kalup.
5. **Vađenje** iz kalupa.

66

Proizvodnja sočiva

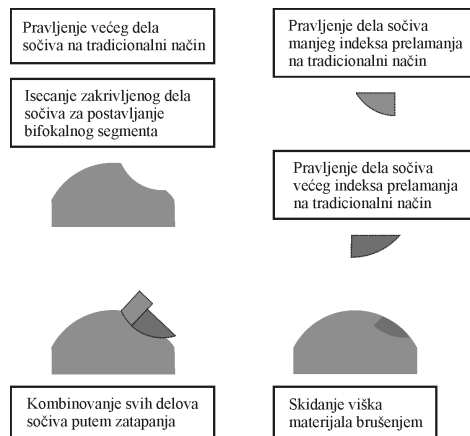


Proizvodnja polikarbonatnog sočiva - (termoplastična smola)

67

Proizvodnja sočiva

- ❑ Jedan od posebnih proizvodnih postupaka, koji se primenjuje i za staklena i za plastična sočiva je i tzv. **spajanje sistema iz više delova**.
- ❑ Najčešći proces koji se primenjuje je proces pravljenja **bifokalnih staklenih sočiva** putem zatapanja bifokalnog segmenta sa drugačijim indeksom prelamanja (drugi materijal).



68

Proizvodnja sočiva

- ❑ Drugi postupak je **laminiranje** – kombinovanje dva tanka laminata da bi se dobilo željeno sočivo.
- ❑ Uobičajeno za manje laboratorije pri izradi sočiva (multifokalnih, progresivnih) prema receptu.
- ❑ **Postupak:** prednji laminat (recimo, multifokalni) se lepi uz pomoć UV zračenja za zadnji laminat koji je pravljen za korekciju vida za odgovarajuću daljinu.
- ❑ Na sličan način se mogu praviti i druge vrste sočiva – polarizujuće, fotohromne, zaštitne, za ronjenje, ...

Primeri:



(c) Spojen ravnomerno obojen sloj – obojeni sloj je obično minimalne debljine sa kojim se može raditi – tipično oko 1 mm.

(d) Laminirano sočivo – međusloj je debljine reda dela milimetra – uporedljivo sa debljinom lista hartije.

69