

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
Prirodno-Matematički Fakultet  
Institut za fiziku

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	18 ЈУН 2001
ОРГАНИЗЈЕД:	БРОЈ
0603	9 / 236

## Fizičke karakteristike smeša nekih holesteričkih tečnih kristala

# DIPLOMSKI RAD

MENTOR:  
*Dr Dušanka Ž. Obadović*

KANDIDAT:  
*Mrazovac Sanja*

NOVI SAD, 2001. god.

*Zahvaljujem*

*svom mentoru dr Dušanki Ž. Obadović na velikoj pomoći pri izradi ovog rada;*

*mr Mileni Staničić na pomoći pri izvođenju eksperimentalnog dela rada*

*dr Vladimиру Divjakoviću na obezbeđenju uslova za izvođenje velikog dela*

*eksperimenta*

*dr Dušanu Lazaru na korisnim sugestijama u toku rada*

*dr Dragoslavu Petroviću, mr Sonji Skuban, mr Fedoru Skuban, mr Maji Garić i*

*ostalim članovima Laboratorije za Eksperimentalnu fiziku čvrstog stanja na*

*obezbeđenju tehničkih uslova za rad*

## SADRŽAJ

<b>A. TEORIJSKI DEO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>2</b>
<b>2. PODELA I STRUKTURNΑ GRAĐA TEČNIH KRISTALA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. TERMOTROPNI TEČNI KRISTALI .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1. Nematski tečni kristali .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1.1. Spiralni nematici.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1.2. Smektički tečni kristali .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2.1. Smektici A.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2.2. Smektici B.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2.3. Smektici C.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2.4. Smektici D .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.5. Smektici E.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.6. Smektici I, F, G i H.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.1.3. Holesterički tečni kristali.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3.1. Selektivna refleksija .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.3.2. Optička aktivnost.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.3.3. Cirkularni dihroizam .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3.4. Teksture holesteričkih struktura .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3.4.1. Planarna tekstura Granžana (Grandjean) .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3.4.2. Teksture neplanarnih holesteričkih struktura.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3.5. Promena koraka holesteričke spirale.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3.5.1. Uticaj spoljašnjeg električnog polja                             na korak spirale .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3.5.2. Uticaj temperature na korak spirale .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.3.5.3. Uticaj hemijskih primesa na korak spirale.....</b>	<b>21</b>

<b>2.2. LIOTROPNI TEČNI KRISTALI .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1. Lipidi .....</b>	<b>22</b>
<b>3. TEČNI KRISTALI U BIOLOŠKIM SISTEMIMA .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1. MODEL MEMBRANE .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2. ULOGA TEČNIH KRISTALA U ŽIVOTNIM PROCESIMA.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3. PROMENA FAZE .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4. LIPIDNA MEZOFAZA U NERVNOM TKIVU .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5. LIPIDI I LIPOPROTEINI U TKIVU I TELESNOJ TEČNOSTI .....</b>	<b>28</b>
<b>3.6. HOLESTEROL U FIZIOLOŠKIM I PATOLOŠKIM STANJIMA..</b>	<b>28</b>
<b>3.7. ĆELIJSKI I MEĐUĆELIJSKI KONTAKTI; MOLEKULARNA         UKLAPANJA I VEZE.....</b>	<b>29</b>
<b>3.8. MAKROMOLEKULI U KOLOIDIMA I GELOVIMA .....</b>	<b>29</b>
<b>4. JONIZUJUĆE ZRAČENJE.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. DEJSTVO JONIZUJUĆEG ZRAČENJA         NA ŽIVE ORGANIZME.....</b>	<b>30</b>
<b>5. PRIMENA HOLESTERIČKIH TEČNIH KRISTALA .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1. POVRŠINSKA TERMOGRAFIJA .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2. OTKRIVANJE ATMOSferskih ZAGAĐIVAČA .....</b>	<b>33</b>
<b>5.3. HISTEREZISNI HOLESTERICI.....</b>	<b>33</b>
 <b>B. EKSPERIMENTALNI DEO .....</b>	 <b>35</b>
<b>1. KARAKTERISTIKE SUPSTANCIJA .....</b>	<b>36</b>
<b>1.1. ČISTE SUPSTANCIJE .....</b>	<b>36</b>
<b>1.2. FORMIRANJE DVOKOMPONENTNIH I         TROKOMPONENTNIH SMEŠA .....</b>	<b>38</b>
<b>2. OPTIČKA ISPITIVANJA.....</b>	<b>40</b>
<b>2.1. HOLESTERIL OLEIL-KARBONAT (50%)         I HOLESTERIL KAPRONAT (50%) .....</b>	<b>41</b>

<b>2.2. HOLESTERIL NONANOAT (70%), HOLESTERIL OLEIL-KARBONAT (10%) I HOLESTERIL KAPRONAT (20%).....</b>	<b>43</b>
<b>2.3. HOLESTERIL NONANOAT (70%), HOLESTERIL OLEIL-KARBONAT (10%) I HOLESTERIL FORMIJAT (20%) .....</b>	<b>50</b>
<b>3. MERENJE INDEKSA PRELAMANJA ABEOVIM (ABBE) REFRAKTOMETROM.....</b>	<b>53</b>
<b>4. REFLEKSIONI SPEKTRI .....</b>	<b>55</b>
<b>5. METODA DIFRAKCIJE X-ZRAKA .....</b>	<b>60</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>71</b>
<b>7. REFERENCE .....</b>	<b>73</b>

## **A. TEORIJSKI DEO**

## 1. UVOD

Tečno-kristalne supstancije otkrivene su krajem 19. veka. Austrijski botaničar F. Rajnicer (F. Reinitzer) [1], profesor Botaničkog instituta u Gracu (Graz), zaslužan je za otkriće specifične prelazne faze, koja nastaje prilikom zagrevanja nekih supstancija, a koje se po fizičkim karakteristikama nalaze između kristalne i tečne faze. Rajnicer je proučavao uticaj nekih organskih supstancija na rast biljaka, pri čemu su neke pripadale i estrima holesterola. Primetio je da jedna od njih, holesteril benzoat, prilikom topljenja obrazuje mutnu fazu u oblasti temperatura od 145-178°C. Izgledalo je da se radi o dvofaznom sistemu, pri čemu jedna faza, kristalna, pri zagrevanju menja boju i dvojno prelama svetlost. Pokušaj razdvajanja komponenata ovakve smeše ostao je bez rezultata, te se obratio O. Lemanu (O. Lehman) [2], koji se u to vreme bavio plastičnim osobinama monokristala srebrojodida. Zadivljujuće za njega je bilo da monokristali srebrojodida mogu da trpe veliku deformaciju bez kidanja. Zaključio je da se u tom slučaju ne obrazuje prostorna rešetka, nego su atomi raspoređeni haotično, kao kod amorskih tela. Zbog toga on smatra da pored čvrstih kristala treba uvesti i pojam neke vrste tečnih kristala, koji se rastaču pod dejstvom sopstvene težine. Posmatrajući holesteril benzoat pod polarizacionim mikroskopom, zaključio je da se prelazna faza sastoji od optički anizotropnih međusobno neuredenih oblasti, na čijim granicama se svetlost rasejava i čini rastop mutnim. Sve supstancije, koje prilikom topljenja obrazuju takvu prelaznu fazu, naziva tečnim kristalima, a ovu prelaznu fazu mezofazom.

Holesterol i estri holesterola egzistiraju u ćelijama, mišićnim tkivima, telesnim tečnostima itd., u tečno-kristalnom stanju, a od esencijalnog su značaja za žive organizme. Organele ćelija, moždane ćelije, lipoproteinska vlakna, eritrociti, mijelinski omotači nervnih vlakana itd., imaju tečno-kristalnu fazu. Biohemijska aktivnost makromolekula kao što su nukleinske kiseline, lipidi, proteini, enzimi itd., narušava se pod uticajem jonizujućeg zračenja. Zato je sa biološkog stanovišta interesantno proučavati uticaj jonizujućeg zračenja na tečno-kristalne supstancije, odnosno njihove kako hemijske, tako i fizičke karakteristike. U ovom radu izvršeno je ispitivanje nekih dvokomponentnih i trokomponentnih smeša holesteričkih tečnih kristala koje su izložene kontinualnom spektru x-zraka u periodu od 30 i 60 minuta. Ispitivanja su preduzeta sa ciljem da se ispita uticaj jonizujućeg zračenja na fazne prelaze tečno-kristalnih supstancija i njihove fizičke karakteristike.

Pored biološkog aspekta tečno-kristalne supstancije interesantne su i sa teorijskog stanovišta. G. Frank (G. Frank) [3] krajem šezdesetih godina postavlja teoriju kontinuma za tečne kristale. De Žen (De Gennes) [4] 1992. god. dobija Nobelovu nagradu za objedinjenu teoriju kojom povezuje osobine tečno-kristalnih supstancija, polimera i magnetnih materijala, a otkriće G. Hajlmajera (G. Heilmeyer) [5] koji 1968. god. prezentuje tečno-kristalne displeje koji rade na sobnoj temperaturi, svrstava ih u sam vrh interesovanja naučnika širom sveta.



## 2. PODELA I STRUKTURNI GRAĐA TEČNIH KRISTALA

Tečni kristali po mehaničkim osobinama podsećaju na tečnost. Njihov viskozitet se menja u širokim granicama, a raspored težišta molekula je uređen na blizinu. Molekuli obrazuju rojeve unutar kojih su paralelno uređeni, dok su rojevi neuredeni. Molekuli tečnih kristala nisu sferno-simetrični, već dugi, paličasti ili u obliku diska.

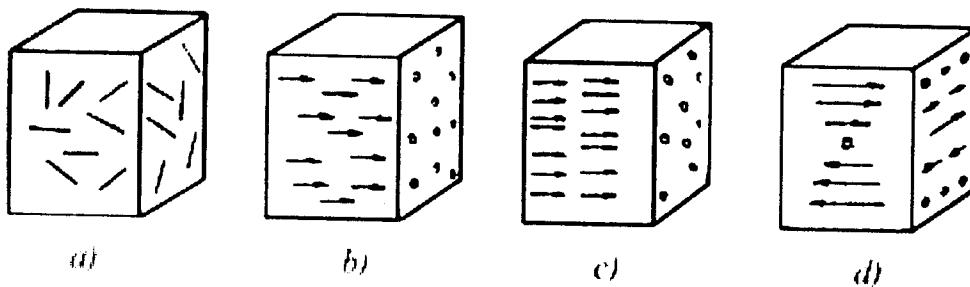
Jedinjenja koja obrazuju mezofaze nazivaju se mezogena jedinjenja. Delimo ih na dve grupe: amfifilna i neamfifilna. Amfifilna mezogena jedinjenja spadaju u grupu liotropnih tečnih kristala koji obrazuju mezofazu rastvaranjem u vodi ili organskim rastvaračima, pri čemu temperaturni interval obrazovanja mezofaze zavisi od koncentracije rastvora. Neamfifilna jedinjenja obrazuju mezofazu u procesu grejanja ili hlađenja i spadaju u grupu termotropnih tečnih kristala. U slučaju amfifilnih organskih jedinjenja, deo molekula lako ostvaruje kontakt sa organskim rastvaračem ili vodom i naziva se hidrofilnim, a drugi deo suprotnih osobina naziva se hidrofobni deo. Neamfifilna mezogena jedinjenja čine izvesna nepolarna ili slabo polarna organska jedinjenja. Amfifilne i neamfifilne supstancije obrazuju tri tipa mezofaze: nematsku, smektičku i holesteričku, a neamfifilna jedinjenja sa molekulima u obliku štapića mogu formirati i tzv. plastičnu (kubnu) mezofazu. Mezofaze neamfifilnih jedinjenja zasnivaju se na struktURNOM uređenju individualnih molekula. Mezofaze amfifilnih supstancija zasnovane su na uređenosti multimolekularnih jedinica nazvanih agregati ili miclele koje su i same tečnog karaktera. [6]

Tečne kristale delimo na:

1. Termotropne, koji se dele na:
  - a) *monotropne* – tečni kristali koji obrazuju mezofazu samo u procesu hlađenja iz izotropne faze,
  - b) *enantiotropne* – tečni kristali koji obrazuju mezofazu kako u procesu zagrevanja tako i u procesu hlađenja.
2. Liotropne tečne kristale čine supstancije koje mezofazu obrazuju prilikom rastvaranja u vodi ili organskim rastvaračima.

### *Tipovi mezofaza*

Postoje tri osnovna tipa faznih prelaza: nematski, smektički i holesterički (sl. 2.1) [7]. Kod nematske faze molekuli su uređeni u jednom pravcu, ali su težišta molekula haotično raspoređena. Kod smektičke faze molekuli su uređeni u paralelnim ravnima, a uzdužne ose molekula su normalne na te ravni ili stoje pod određenim uglom. Kod holesteričke faze u jednoj ravni molekuli su paralelni medusobno, a u odnosu na molekule u susednim ravnima zaokrenuti su za izvestan mali ugao, te se na taj način obrazuje karakteristična spiralna struktura.

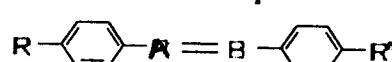


Sl. 2. I. a) izotropna faza; b) nematska faza; c) smektička faza;  
d) holesterička faza

Mnoge termotropne supstancije između kristalne i izotropne faze obrazuju više vrsta mezofazi, te takve supstancije nazivamo polimorfnim. Holesterička faza se može javiti umesto nematske, ali ne ni pre ni posle nje. Osnovna karakteristika polimorfnih supstancija je da se na nižim temperaturamajavljaju uređenje strukture.

Strukturu tečno-kristalnih supstancija uglavnom čine:

1. organski molekuli sa opštom formулom:



gde su R i R' kratki elastični lanci,

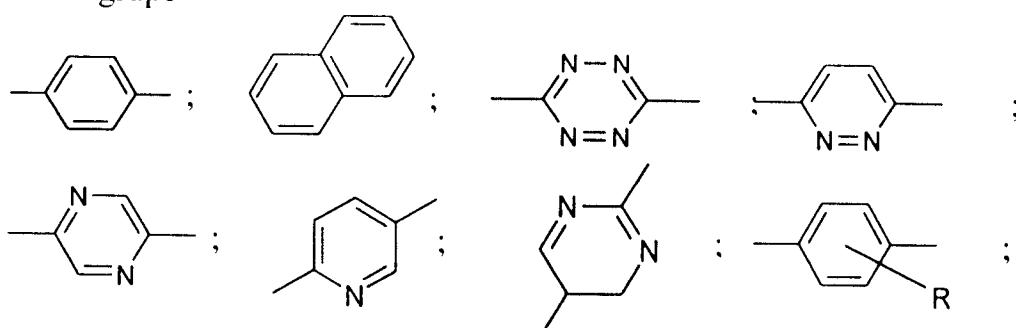
2. estri holesterola,
3. izdužena spiralna jezgra koja se javljaju kod sintetičkih polipeptida, DNK, virusa,
4. složenije kombinacije molekula i jona.

O molekulima termotropnih tečnih kristala poznato je:

- a) oblik molekula je izdužen, sastavljeni su od izlomljeno-pravih, spljoštenih jedinica (npr. prstenovi benzola),
- b) molekuli su kruti u pravcu dugih osa i u tom pravcu se najčešće formiraju dvostrukе veze,
- c) molekuli se sastoje iz grupa koje je lako polarizovati i koje su jaki dipoli,
- d) na »repu« molekula nalaze se grupe slabih dipola.

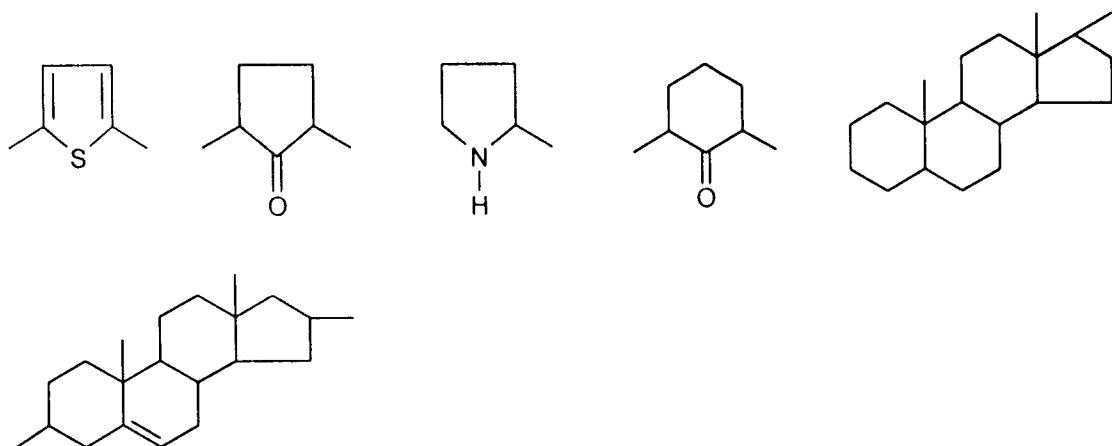
Termotropne tečne kristale čine sledeće grupe: [8]

- a) aromatične grupe

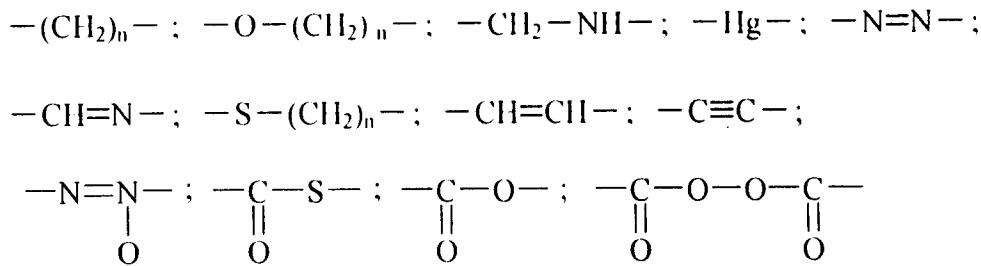


gde je R = CH<sub>3</sub>; F; Cl; Br; I; NO<sub>2</sub>; CN.

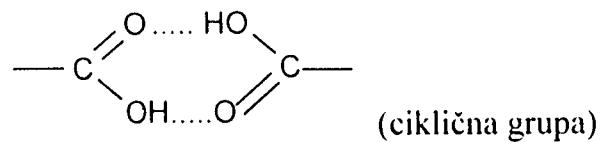
b) ciklične grupe i steroidi:



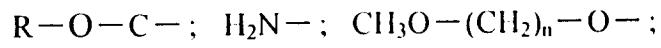
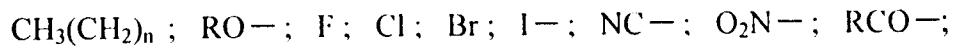
c) vezivni delovi:



kod dimera:



d) »repovi« molekula:



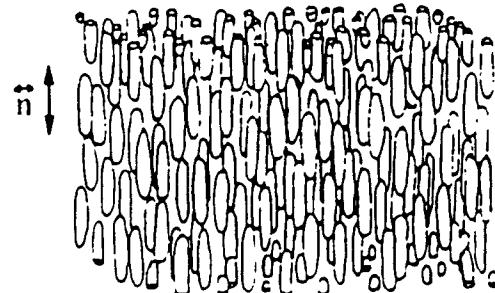
gde je R – alkilna ili aromatična grupa ili Li, Na, K, Rb, Cs.

## 2.1. TERMOTROPNI TEČNI KRISTALI

Molekuli termotropnih supstancija teže da se urede svojim dugačkim osama u jednom pravcu. Prosečan pravac osa molekula karakteriše jedinični vektor  $\vec{n}$  ili direktor. Njegov pravac se obično poklapa sa optičkom osom. Tečno-kristalne supstancije razlikujemo prema položaju direktora i težišta molekula.

### 2.1.1. Nematski tečni kristali

Njihove niti slobodno lebde ili se lepe za zid držača i predstavljaju prekid optičke homogenosti. Pravci molekula nisu fiksni i predstavljaju analogiju dislokacija kod kristala (disklinacije). Sasvim orijentisan nematik bez disklinacija dobija se posebnom obradom površina.



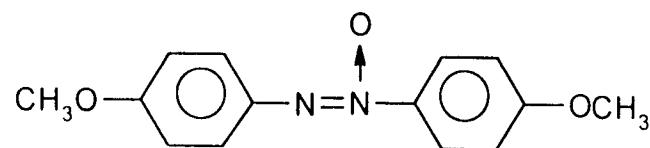
Sl. 2.2. Raspored molekula u nematskom tečnom kristalu

Kod nematika dozvoljena je translacija molekula u proizvolnjem smeru, što povećava viskoznost koja je istog reda veličine kao i kod obične tečnosti.

O nematicima možemo da rezimiramo:

- u rasporedu težišta molekula ne postoji urednost dugog dometa, te zbog toga rentgenogram ne daje bragovske pikove,
- raspored težišta molekula sličan je kao kod tečnosti tj. imaju veliku viskoznost reda  $0,01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,
- kod nematika se pojavljuje uredost u pravcima molekula; oni teže da se postave paralelno nekoj osi koju karakteriše direktor  $\vec{n}$ ,
- pravac  $\vec{n}$  je proizvoljan u prostoru i određen slabim silama,
- smerovi  $\vec{n}$  i  $(-\vec{n})$  se ne razlikuju,
- molekuli koji čine nematsku fazu moraju posedovati osobinu ogledalske simetrije, a ako ovaj uslov nije ispunjen sistem mora da bude racemička smeša (1:1) molekula sa levom i desnom orijentacijom [9]. Ovu fazu obrazuju jedinjenja koja poseduju aktivnu grupu ili na početku ili na sredini lančastog molekula (crepasta struktura). U normalnim uslovima nematici su mutni. Rasejanje

vidljivog dela spektra je  $10^5$  puta jače nego kod izotropnih tečnosti. Tipičan predstavnik nematogenih jedinjenja je para-azoksi anizol (PAA):



Velik broj nematika sadrže dva aromatična prstena u para položaju povezana dvostrukom ili trostrukom vezom.

Ispitivanje tečno-kristalne supstancije obavezno sadrži i određivanje njene teksture, metodom polarizacione mikroskopije. Ako planarnost nije idealna, debeli nematski slojevi ( $100\text{ }\mu\text{m}$ ) pokazuju teksturu pruga (schlieren) [10]. Ako je uzorak nanesen kao tanak film ( $5\text{ }\mu\text{m}$ ) tekstura se menja u teksturu tamnih pruga sa disklinacijama [11]. Ako je uzorak postavljen između dve staklene pločice, disklinacije se često javljaju normalno na pločicu kao tamne mrlje.

#### 2.1.1.1. Spiralni nematici

Oni nastaju pri interakciji molekula nematika sa površinom [7]. Tada su optičke ose molekula paralelne sa površinom. Teksture su u obliku dvostrukih vlaknastih linija, a u zavisnosti od površine može doći do pojave mermerne teksture koju karakterišu oblasti sa različitom orijentacijom molekula. Ako pravci molekula između obradenih površina zaklapaju ugao od  $90^\circ$  između ove dve površine obrazuje se spiralna struktura. Opšte osobine spiralnih nematika slične su kao kod slabo spiralnih holesterika. Takode je moguća i uređenost molekula normalno na površinu, kada se obrazuje pseudoizotropna tekstura.

#### 2.1.2. Smektički tečni kristali

Ovu mezofazu grade jedinjenja koja poseduju polarnu grupu na kraju lanca ili oba kraja lanca, ili u čvrstom stanju imaju slojeve međusobno paralelnih molekula. Smektici inače imaju slojevitu strukturu sa tačno određenim rastojanjem između slojeva (2-3 nm). Ose molekula zaklapaju uglove sa normalom slojeva, ali unutar jednog sloja su istog pravca. Težišta molekula u jednom sloju mogu biti i uređena i neuredena. U zavisnosti od položaja molekula razlikujemo više tipova smektika (A,B,C,D,E,F,G,H,I). Ovu mezofazu karakteriše najveći stepen uređenosti. Slojevi se skoro slobodno kreću jedan u odnosu na drugi, što mu daje mehaničke osobine dvodimenzionog fluida.

### **2.1.2.1. Smektici A**

Ova vrsta smektika ima slojevitu strukturu, a uzdužne ose molekula su normalne na slojeve [12]. Težišta molekula unutar jednog sloja nisu uređena i svaki sloj se skoro slobodno kreće u odnosu na drugi. Ovi smektici se ponašaju kao optički jednoosni, sa optičkom osom normalnom na površine slojeva. Orjentacije ( $\vec{n}$ ) i ( $-\vec{n}$ ) se ne razlikuju.

Teksture SmA faze:

- a) *Planarna tekstura* – najprostija konfiguracija SmA. Ovo uređenje odgovara paralelnim slojevima u odnosu na pločicu na koju se nanosi tečni kristal. Molekuli su orjentisani normalno u odnosu na ravan sloja, pa se svetlost u mikroskopu širi paralelno optičkoj osi preparata. U ovom slučaju tekstura se naziva homeotropnom ili pseudoizotropnom [13]. Ponekad se planarna tekstura javlja u obliku stepeničaste kapi, obično pri uslovima pažljivog topljenja kristala. U SmA se takođe mogu javiti i uljane pruge kao široke trake na tamnoj homeotropnoj podlozi. Otapanjem tankog sloja čvrstog kristala moguće je obrazovanje različitih homogenih domena. Optičke ose domena imaju različite orjentacije, odredene prethodnom orjentacijom kristala čvrste faze. Domeni su odeljeni zrnastom granicom koja sledi izgled kristala u čvrstoj fazi. Ova tekstura se naziva paraamorfna čvrsta faza.
- b) *Prosta poligonalna tekstura* – javlja se u debelim preparatima SmA faze. Smektički slojevi su raspoređeni u Diponove ciklide sa koncentričnim elipsama koje leže u ravni gornje i donje pločice [13].
- c) *Prosta tekstura u obliku lepeze* – ova tekstura se sastoji od kupastih domena sa hiperbolama koje leže u ravni preparacije. Pojavljuje se uglavnom u tankim preparatima. Slojevi su uređeni, uglavnom vertikalno u odnosu na ravan preparacije [6].
- d) *Mehurasta tekstura* – zapaža se kada se preparacija uzorka vrši bez pokrovног stakla. Kod ove tekture mehuri su delovi nepotpuno razvijenih kupastih domena [11].
- e) *Prugasta tekstura* – retko se zapaža, uglavnom pri prelazu iz SmA u nematsku fazu [14].

### **2.1.2.2. Smektici B**

Unutar slojeva težišta molekula su uređena tako da obrazuju dvodimenzionu heksagonalnu rešetku, ali u pravcu uzdužnih osa molekula nema uređenosti dugog dometa. Mehaničke osobine SmB se razlikuju od osobina trodimenzionalnih kristala, jer uređeni slojevi lako mogu skliznuti u odnosu na susedne. Prema tom modelu su težišta molekula uređena u tri dimenzije, ali molekuli mogu rotirati oko uzdužnih osa. Prema drugom modelu molekuli su uređeni u tri dimenzije, ali krajevi molekula su neuređeni. Ovi modeli tumače jake veze unutar sloja i slabe veze između slojeva. SmB možemo tretirati kao

trodimenzioni kristal sa rotacionom neuređenosti. Slojevi SmB nisu jako savitljivi i pri difrakciji x-zraka opaža se refleksija karakteristična za uredenost sloja iznutra. Karakteristična mikroskopska slika kod ovog tipa smektička je tzv. mozaička tekstura pri kojoj se vide oblasti unutar kojih je sloj spljošten.

SmB modifikacija kod koje su molekuli normalni na slojeve sa heksagonalnom simetrijom optički je jednoosna. »Prirodna« tekstura SmB modifikacije je mozaička, kod koje se u unutrašnjosti gradivnih elemenata (raznih optički homogenih zrna) vide konstantne interferentne boje, ako su polarizator i analizator ukršteni. Optičke ose zrnastih oblasti su najčešće normalne na površinu stakla (homeotropna orijentacija). Ova tekstura se najlakše dobija pri prelazu iz izotropne ili nematske u SmB fazu. Homeotropna zrna zaobljenog oblika i izdužena zrna sa paralelnom orijentacijom pojavljuju se simultano. Homeotropne grane poseduju skoro izotropnu brzinu rasta. Izduženi štapići rastu brže u longitudinalnom nego u lateralnom pravcu. Mali štapići se mogu okrenuti i formirati homeotropna zrna. SmB slojevi nisu stabilni u distorgovanoj konfiguraciji. Prelaz iz SmA u SmB fazu je izuzetno težak.

#### 2.1.2.3. Smektici C

Kod SmC translaciona simetrija je narušena najmanje u jednoj dimenziji. Molekuli uglavnom zaklapaju određene uglove sa normalom na slojeve [16]. Debljina sloja iznosi  $d=l\cos\theta$  ( $\theta$ -ugao između ose molekula i normale na ravan kristala).

SmC strukture imaju sledeće osobine:

- supstancija je optički dvoosna,
- SmC su optički neaktivni, ali ako im se dodaju optički aktivni molekuli u strukturi se javlja spiralna konfiguracija što izaziva jaku optičku aktivnost.

Teksture SmC faze:

##### 1. Planarne teksture:

- a) *Homogene teksture* – u nekim slučajevima SmC slojevi se mogu orijentisati između izbrazdanih staklenih površi [17]. Slojevi mogu biti uređeni u ravni sa projekcijama nagnutih molekula koje su paralelne sa brazdama. Ovakvo uredenje se dobija kada smektička faza prelazi iz nematske, a u slučaju da su molekuli nematika uredeni tako da su im ose paralelne sa pravcem brazde. Pri prelazu iz nematske u smektičku fazu, molekuli ostaju usmereni u pravcu brazdi, a pravac SmC slojeva je tangencijalan u odnosu na duplu kupu obrtanja, čija osa leži paralelno brazdama. Ugao kupe odgovara uglu nagiba molekula u sloju. Svi pravci slojeva koji su tangencijalni na kupu energetski su ekvivalentni.
- b) *SmC linija (schlieren) tekstura* – slična je nematskoj linijskoj teksturi. Zapažamo tanke tamne pruge koje polaze iz određenih tačaka [18]. Ova tekstura ima tačke iz kojih uvek polaze četiri linije. Ova tekstura se javlja u

dve varijante: jedna sa širokim tamnim trakama i druga sa oštrim tamnim linijama.

## 2. Neplanarne teksture:

- a) *Tekstura izlomljenih koncentričnih kupa* [19] – ova tekstura egzistira u dve varijante: izlomljena poligonalna tekstura i izlomljena lepezasta tekstura. Osnovno uređenje teksture izlomljenih koncentričnih kupa se objašnjava uredenjem slojeva u Diponove cikloide. Elipse su vidljive u izlomljenoj poligonalnoj teksturi, a grane hiperbole u izlomljenoj lepezastoј teksturi. Mogući defekti su cik-cak helikoidalne disklinacije, Granžanovi zidovi...
- b) *Spiralna tekstura* [19] – spiralna SmC faza može imati planarnu teksturu sa osom spirale normalnom u odnosu na ravan stakla. Ona pokazuje osobine optičke rotacije i selektivne refleksije kružno polarizovane svetlosti. Ako nije homogeno orjentisana možemo primetiti zamagljenu teksturu linija. U istoj supstanciji u ovoj fazi može postojati i izbradana lepezasta tekstura. Ona može posedovati razne defekte tipa cik-cak, kvadrilateralni, sferuliti sa cilindričnom simetrijom [20].

### 2.1.2.4. Smektici D

Između dve anizotropne faze, SmA i SmC faze može se primetiti prisustvo izotropne faze. U ovoj fazi molekuli se grupišu i grade kubnu strukturu.

Najstabilnija tekstura SmD fazę je optički izotropna tekstura bez zrnastih granica. Ova tekstura odgovara velikim monokristalnim oblastima. Ako se obrazuje iz SmC faze pojavljuju se izotropne oblasti u obliku kvadrata, pravougaonika, romba...

Ako nastaje iz izotropne SmA faze obrazuje se mozaička tekstura koja se ubrzo spontano menja u izotropnu SmD teksturu.

### 2.1.2.5. Smektici E

Spuštanjem temperature ispod one potrebne za SmB fazu zamrzava se rotacija molekula oko uzdužne ose, čime nastaje SmE faza. U toj fazi kraće ose molekula međusobno zaklapaju isti ugao gradeći karakterističan oblik riblje kosti.

SmE modifikacija je optički dvoosna, obično se javlja u obliku mozaičke teksture. Ne poseduje homeotropne grane [21].

### 2.1.2.6. Smektici I, F, G i II

Snižavanjem temperature molekuli unutar jednog sloja mogu da se urede u heksagonalnu strukturu. U zavisnosti od odnosa konstanti dvodimenzione rešetke imamo SmI ( $a/b < 1$ ) ili SmF ( $a/b > 1$ ). Na nižim temperaturama se obrazuju SmG i SmH. Duge ose su u ovim fazama nagnute u odnosu na normalu slojeva,

težišta se unutar slojeva uređuju u kristalnu rešetku, a kratke ose molekula mogu zauzeti tri ili šest različitih pravaca.

#### *Tekstura SmG*

Ova tekstura slična je teksturi SmE faze, te se obično javlja mozaička tekstura ili njene paraamorfne varijante. U zavisnosti od polazne smektičke faze iz koje dobijamo SmA moguće je dobijanje paraamorfne varijante, kao i lepezaste tekture koja zagrevanjem prelazi u mozaičku teksturu. Dobijanje SmG faze moguće je i prelazom iz nematika.

#### *Tekstura SmI*

Struktura ove faze je kao kod SmB faze, ali su molekuli nagnuti u odnosu na ravan sloja. Osnovna tekstura ove faze je mozaička. Tekstura SmI faze je u obliku linija, sadrži tačke sa po četiri tamne grane, a pojedinačna zrna mozaičke tekture pokazuju prisustvo linija koje se završavaju na njihovim granicama.

#### *Tekstura SmH*

Ukoliko se ova faza obrazuje iz mozaičke SmG ili linijske tekture SmC, pojavljuje se mozaička tekstura čiji mozaički domeni sadrže dodatne krakove i difuzne granice zrna. Ako se ova faza obrazuje iz SmG ili SmC faze koje se javljaju u obliku paraamorfne izlomljene tekture lepeza, ona se javlja u obliku izrazite paraamorfne H tekture.

### **2.1.3. Holesterički tečni kristali**

Ako molekuli nematika, koji su optički neaktivni, sadrže jedan ili više aktivnih atoma ugljenika javlja se spiralna struktura. Četiri različite grupe vezane su za ugljenikov atom, te grade tetraedar. Na ovaj način se mogu obrazovati dve različite molekulske strukture koje nisu ogledalski simetrične, što uslovljava specifičnu prostornu konfiguraciju. Ovakva struktura se javlja kod estara holesterola odakle i potiče naziv spiralne faze – holesterička.

Uredenost po pravcu kod holesterika ostvaruje se samo u molekularnim ravnima, dok su molekuli u jednom sloju zaokrenuti za izvestan ugao u odnosu na molekule susednog sloja [22]. Zbog mnogobrojnosti slojeva smer uzdužnih osa molekula opisuje zavojnicu, pri čemu osa zavojnice leži normalno na granice slojeva. Holesterička faza može se smatrati nematskom tvorevinom sa zavojičastom strukturom koja se obrazuje usled optičke aktivnosti molekula. Nematike možemo, međutim, smatrati holestericima sa beskonačnim korakom spirale.

Orijentaciju molekula holesterika karakteriše direktor  $\vec{n}$ , međutim, njegov pravac nije postojan u prostoru, već obrazuje spiralnu konfiguraciju. Ako z-osu uzmemos za osu spirale tada su komponente direktora [23]:

$$\begin{aligned}
 n_x &= \cos\left(\frac{2\pi z}{|P|} + \varphi\right) \\
 n_y &= \sin\left(\frac{2\pi z}{|P|} + \varphi\right) \\
 n_z &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

$P$  – korak spirale ;  $\varphi$  – proizvoljan ugao.

Ovakva struktura je periodična po  $z$  i ukoliko su  $n_i$  (- $n$ ) ekvivalentni, prostorni period predstavlja polovinu koraka spirale:

$$L = P/2 = \pi/|\vec{q}_0| \tag{2}$$

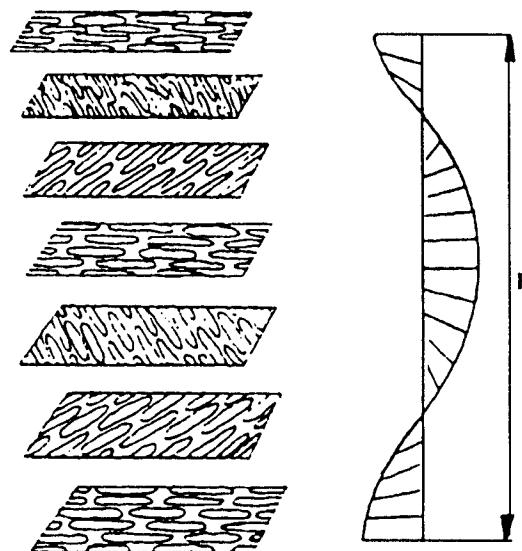
gde je  $|\vec{q}_0| = 2\pi/P$  talasni vektor.

Tipična vrednost za  $L$  je  $\sim 300$  nm. Ova veličina dovodi do selektivne refleksije svetlosti u vidljivom području i karakteristična je za holesterike.

Različiti supstituenti (»repovi«) izlaze iz ravni molekula prema dole ili gore. Zbog toga molekuli u susednim slojevima moraju da se zaokrenu za izvestan ugao da bi se obezbedilo gusto pakovanje. Menjanjem  $R$  grupe dobijamo različita holesterička jedinjenja.

Prema pravcu okretanja spirale razlikujemo desni i levi hod zavojnice. Pravac hoda zavojnice označava se predznakom koraka spirale. Za desni hod  $P$  je pozitivan, a za levi hod  $P$  je negativan. Mešanjem supstancija sa levim i desnim hodom može se menjati korak spirale holesterika, pa i njegove optičke osobine.

Što se tiče optičkih osobina, holesterici se ponašaju kao lokalno jednoosni, i ispoljavaju selektivnu refleksiju, veliku optičku aktivnost i cirkularni dihroizam.

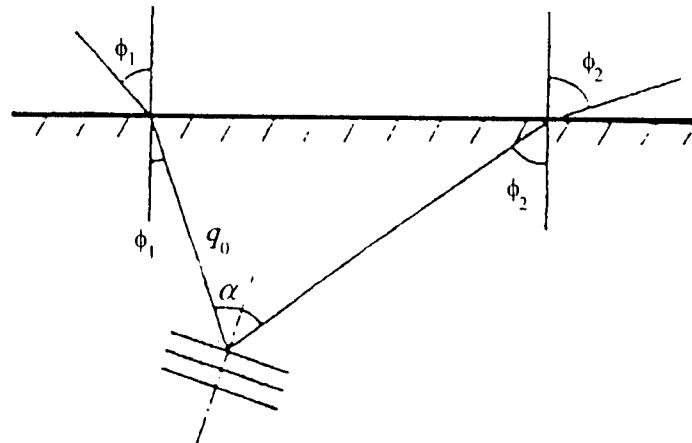


Sl. 3.1. Formiranje holesteričke zavojnice

### 2.1.3.1. Selektivna refleksija

Važna osobina holesterika je i selektivna refleksija. Ako se površina holesterika osvetli belom svetlošću, ona će reflektovati svetlost jedne od boja u vidjivom području sa pojasom širine 10 nm. Selektivna refleksija se objašnjava na osnovu analogije sa refleksijom od niza tankih pločica. Ova pojava je posledica interferencije zraka odbijenih sa granica između slojeva. Do refleksije dolazi ako slojevi imaju različite indekse prelamanja.

Do konstruktivne interferencije dolazi ako je razlika optičkih puteva zrakova odbijenih sa različitih slojeva jednakacelobrojnom umnošku talasne dužine reflektovane svetlosti.



Sl. 3.2. Refleksija sa polidomena holesterika

Uslov Bragove (Bragg) refleksije je:

$$P \cos \alpha = m\lambda' = m\lambda / n \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{Pn \cos \alpha}{m} \quad (3)$$

P - korak holesteričke spirale

$\alpha$  - ugao između talasnog vektora i zraka svetlosti

m - ceo broj

$\lambda'$  i  $\lambda$  - talasna dužina svetlosti u holesteriku i vakuumu  
respektivno

n - srednja vrednost indeksa prelamanja

Maksimum refleksije je :

$$\lambda_{\max} = P \cdot n \quad (4)$$

Na osnovu sl. 3.2. :

$$2\alpha = \phi'_1 + \phi'_2$$

$$\sin \phi_1 = n \cdot \sin \phi'_2$$

$$\sin \phi_2 = n \cdot \sin \phi'_1$$

pa se talasna dužina može napisati preko spoljašnjih uglova  $\phi_1$  i  $\phi_2$  :

$$\lambda = \frac{Pn}{m} \cos \left[ \frac{1}{2} \arcsin \left( \sin \frac{\phi_1}{n} \right) + \frac{1}{2} \arcsin \left( \sin \frac{\phi_2}{n} \right) \right] \quad (5)$$

Iz jednačine (3) zaključujemo da  $\lambda_{\max}$  zavisi od koraka holesteričke spirale (P), a ne od debljine sloja tečnog kristala i od srednje vrednosti indeksa prelamanja.

### 2.1.3.2. Optička aktivnost

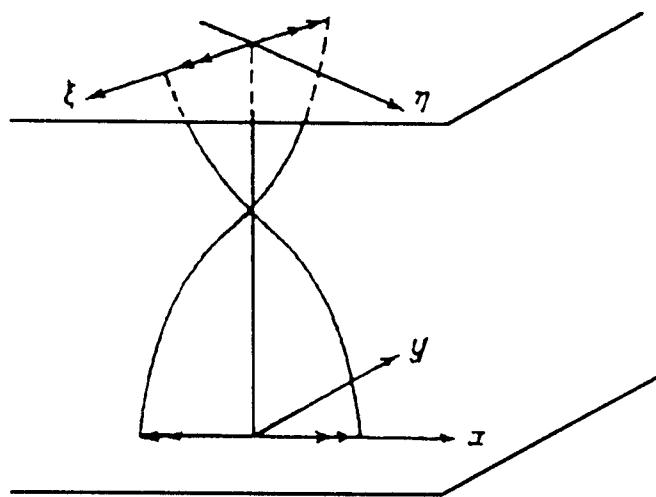
Izuzetno velika optička aktivnost jednoznačno uređene holesteričke strukture ogleda se u obrtanju ravni polarizacije upadne svetlosti. Velika optička aktivnost može se pripisati uređenju molekula holesteričke mezofaze u obliku zavojnice. Električna indukcija, u tački sa radijus vektorom  $\vec{r}$  holesteričke mezofaze,  $\vec{D}(\vec{r})$  je linearna funkcija električnog polja  $\vec{E}(\vec{r})$  u toj tački [6]:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_a \vec{n} (\vec{n} \cdot \vec{E}) \quad (6)$$

gde je  $\epsilon$  – tenzor električne permeabilnosti, a  $\epsilon_a = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$  je dielektrična anizotropija u tački definisanoj radijus vektorom  $\vec{r}$  holesteričke mezofaze. Za talas koji se kreće duž z-ose spirale vektori  $\vec{D}$  i  $\vec{E}$  se nalaze u xy – ravni. U svakoj tački  $\vec{r}$  sredina se smatra jednoosnom, ali po svojoj simetriji ona bi mogla biti dvoosna sa dielektričnim permeabilnostima  $\epsilon_{\perp}$  i  $\epsilon_{||}$  u xy-ravni i  $\epsilon_{zz}$  duž z-ose. Holesterička mezofaza sa korakom P dobija se pri rastvaranju optički aktivne materije u matrici nematika. U tom rastvoru P je mnogo veće od talasne dužine vidljive svetlosti.

Tanak sloj ovog rastvora u intervalu ( $z, z+dz$ ) male debljine u odnosu na P, ali ne velike u odnosu na  $\lambda$  vidljive svetlosti, može se smatrati jednoosnim sa optičkom osom duž vektora  $\vec{n}$ . Indeks prelamanja duž vektora  $\vec{n}$  je  $n_e = \epsilon_{||}^{1/2}$ , normalno na  $\vec{n}$  je  $n_o = \epsilon_{\perp}^{1/2}$  [6]. Izražena preko komponenti vektora električnog polja, ova struktura glasi:

$$\left. \begin{array}{l} \text{mod "e"} \\ \left\{ \begin{array}{l} E_x = \cos \theta \cos \left[ \omega \left( \frac{zn_e}{c} - t \right) \right] \\ E_y = \sin \theta \cos \left[ \omega \left( \frac{zn_e}{c} - t \right) \right] \end{array} \right. \\ \text{mod "o"} \\ \left\{ \begin{array}{l} E_x = \sin \theta \cos \left[ \omega \left( \frac{zn_e}{c} - t \right) \right] \\ E_y = -\cos \theta \cos \left[ \omega \left( \frac{zn_e}{c} - t \right) \right] \end{array} \right. \end{array} \right\} \lambda \gg P(n_e - n_o) \quad (7)$$



Sl. 3.3. Smer lokalnih osa u rotiranom nematiku

Ako kroz sloj ove strukture propustimo duž z-ose svetlosni snop polarizovan po x-ravni, on će u z=d izaći kao linijski talas polarizovan duž ξ-ravni sa kašnjenjem u fazi  $\Phi_c = \omega n_c d/c$ . Snop polarizovan po y-ravni za z(0), i u z(d) će biti polarizovan duž η-ravni sa kašnjenjem u fazi  $\Phi_o = \omega n_o d/c$  (d-debljina sloja; c-brzina svetlosti). Ovaj efekat omogućava merenje ugla obrtanja ravni polarizacije.

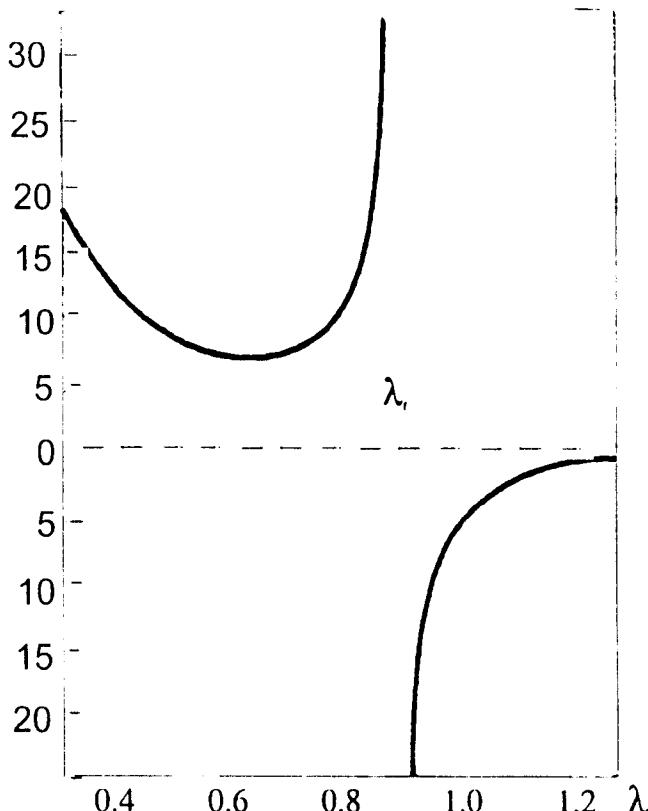
Za slučaj da je  $\lambda > P(n_c - n_o)$ , pri čemu ćemo isključiti slučaj  $\lambda = P$ , pri normalnom upadu svetlosti, planarna tekstura je optički aktivna sredina. To znači da se za poznatu vrednost frekvencе  $\omega$  dva sopstvena moda koji se prostiru duž z-ose javljaju kružni talasi sa različitim indeksima prelamanja,  $n_1$  i  $n_2$ . Ako na sloj z=0 pada linearno polarizovan talas:

$E_x = \cos \alpha \cos \omega t$  i  $E_y = \sin \alpha \cos \omega t$ ; izlazni talas z=d je takođe linearno polarizovan, ali je njegova ravan polarizacije zaokrenuta za ugao  $\psi = d\omega(n_1 - n_2)/2C$ . Kod holesteričkih kristala je obrtanje ravn polarizacije ( $\psi/d$ ) oko  $10^4$  °/mm. Po teoriji de Vria (de Vries) [24]:

$$\frac{\psi}{d} = \frac{q_0}{32} \left( \frac{n_c^2 - n_0^2}{n_c^2 + n_0^2} \right)^2 \frac{1}{\lambda'(1 - \lambda')^2} \quad (8)$$

gde je  $\lambda' = \lambda/p$ , a  $n_c$ ,  $n_0$  indeksi prelamanja redovnog i neredovnog zraka.





*Sl. 3.4. Optička rotacija u funkciji talasne dužine za estre holesterola  
(P=600 nm, n=1,50)*

Analiza gore navedene jednačine:

1. Za velike vrednosti  $\psi/d$ :  $\lambda'=0,7$ ;  $(n_e^2-n_o^2)/(n_e^2+n_o^2)=0,1$   
 $\psi/d \sim 10^{-3} q_0$ ;  $P = 1 \mu\text{m}$   $q_0 = 6 \cdot 10^4 \Rightarrow \psi/d \sim 60 \text{ rad/cm.}$
2. »Anomalna disperzija« nastaje pri Bragovskoj refleksiji  $\lambda'=1$ ; u tim uslovima jednačina je neupotrebljiva.
3. Optička rotacija ravni polarizacije za veliko  $\lambda$  ( $\lambda > P$ ) je proporcionalna  $P^3/\lambda^4$ .
4. Optička rotacija ravni polarizacije za  $\lambda > P$  je proporcionalna sa  $P/\lambda^2$ .

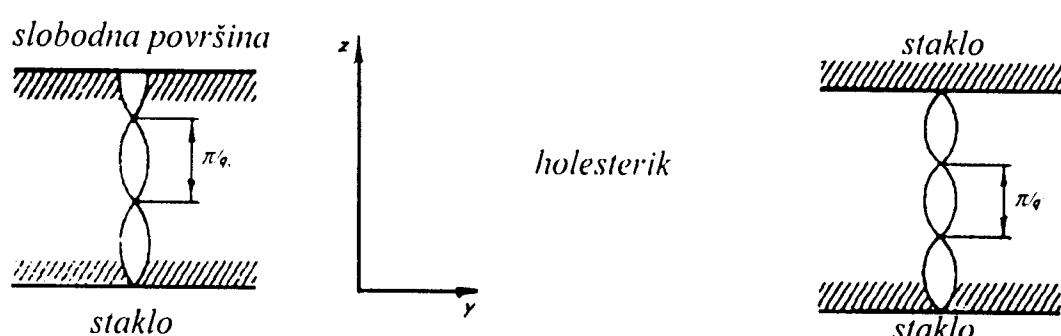
### 2. 1.3.3. Cirkularni dihroizam

Svetlost koja pada na holesterik razlaže se na dve komponente. Električni vektor jedne komponente obrće se u smeru kazaljke na časovniku, a električni vektor druge komponente u suprotnom smeru. Kroz neke supstancije može proći samo jedna komponenta, i ovu pojavu nazivamo cirkularni dihroizam. Pri nastupanju cirkularnog dihroizma boja supstancije postaje blistava.

### 2.1.3.4. Teksture holesteričkih struktura

#### 2.1.3.4.1. Planarna tekstura Granžana (Grandjean)

Planarna tekstura Granžana obrazuje se u slučaju tankih slojeva holesteričkih materijala ( $d \sim 100$  mm), ako su granični uslovi na obema stranama sloja tangencijalni pri čemu postoji mogućnost obrazovanja monokristalnog holesterika. U tom slučaju monokristal je opisan jednačinama (1).



Sl. 3.5. Način formiranja planarne tekture:

- a) spirala sa optimalnim korakom
- b) korak spirale se menja pod uticajem graničnih uslova

Prikazana tekstura je planarna i obrazuje se u sledećim slučajevima [25]:

- između paralelne staklene površine i slobodne površine. Na staklenoj površini ( $Z=0$ ) ugao  $\phi(0)$  je određen pravcem brazda koje potiču od mehaničke obrade (poliranja). Na slobodnoj površi ( $Z=d$ ) ugao  $\phi(d)$  je proizvoljan.
- između dve polirane površine (ili u raseču dve površine, klinu) – ovde su fiksirana oba ugla i  $\phi(0)$  i  $\phi(d)$ .

Spirala mora izmeniti korak da bi zadovoljila granične uslove, a talasni vektor  $q'$  će se razlikovati od  $q_0$ . Pri tome je:

$$|q_0| \cdot d = \phi(d) - \phi(0) + n\pi \quad (9)$$

gde je  $n$  ceo broj, čija je veličina određena uslovom da  $|q' - q_0|$  bude minimalno tj. da bude minimalna energija uvrtanja [6].

#### 2.1.3.4.2. Teksture neplanarnih holesteričkih struktura

##### Konfokalna tekstura

Ako se holesterik u izotropnom stanju postavi među staklene pločice i ohladi, nastaje uređenje u kome se ravni planarne strukture deformišu u iskrivljene površine. Da bi ovu strukturu narušili potrebno je malo pomeriti jednu

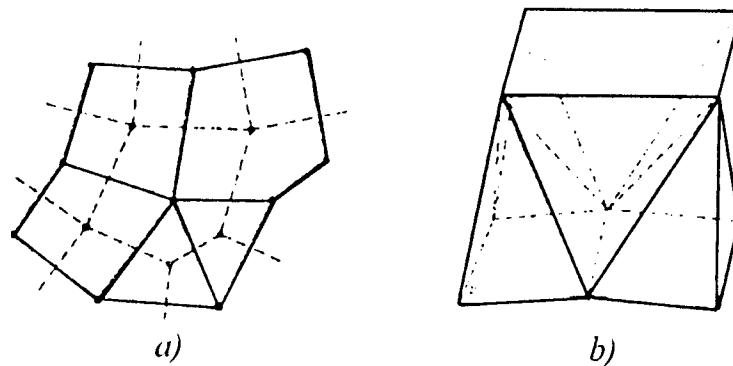
staklenu pločicu. Geometrijska slika ove teksture holesterika je slična konfokalnoj teksturi SmA mezofaze, jer se u oba slučaja radi o slojevitim strukturama koje se lako deformišu pri uslovu da se debljina slojeva ne menja. Kod holesterika ta debljina iznosi oko  $1 \mu\text{m}$  i mnogo je veća nego kod smektičkih.

Holesteričke materije mogu imati teksture neplanarnog tipa, i to:

1. teksture oblika lepeze,
2. poligonalne teksture.

U oba ova tipa teksture prisutan je kvazilamelarni karakter holesteričkog stanja i oba tipa liče na odgovarajuće smektičke teksture.

#### *Poligonalna tekstura*

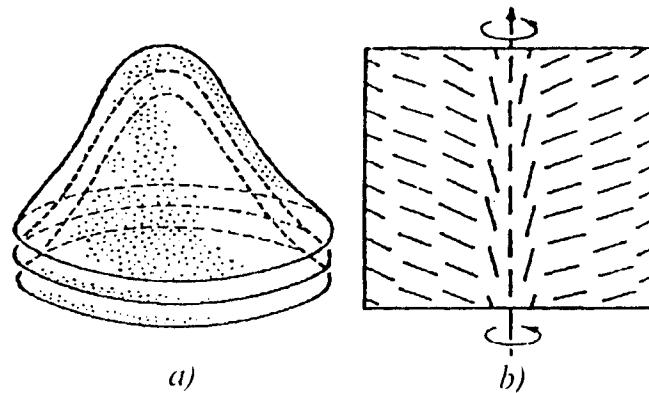


Sl. 3.7.

- a) *Poligonalna rešetka, punе linije označavaju poligone na gornjoj površini, a isprekidane na donjoj površini,*
- b) *Elementi jednog poligona u poligonalnoj teksturi: tri piramide, tri tetraedra.*

Ova tekstura se može formirati od piramida i tetraedara. Definiše je set horizontalnih eliptičnih segmenata na nivou gornjeg pokrovog stakla [6]. Oni formiraju poligonalne oblasti. Vertikalni segmenti dodiruju svaku poligonalnu ivicu. Drugi set defekata odgovara segmentima hiperbola na nivou donjeg stakla kao i vertikalnim segmentima koji polaze od ivica donjeg poligona. U slučaju maksimalne zakrivljenosti ovi defekti se nazivaju linijama bljeska. Projekcija uglova donjeg poligona leži u centru gornjeg poligona. Karakteristika ove teksture je dubletna spiralna, a indikacija je postojanja zakrivljenosti holesteričkih slojeva.

### *Lepezasta tekstura*



Sl. 3.8. Topologija linija bljeska:

- a) zakrivljenost slojeva bliskih centru linija,
- b) presek duž centra linije (kratke crte označavaju molekulske ose holesterika ili smektička).

Ova tekstura sadrži translacione dislokacije, disklinacije i linije bljeska. Linije bljeska su često u obliku cilindričnih kupa.

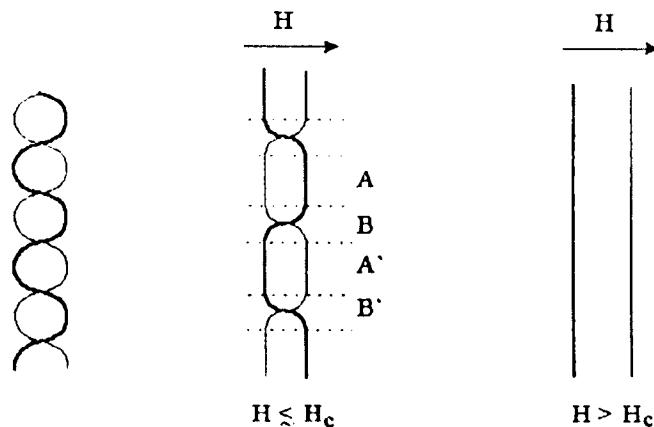
### *Tekstura plave faze*

Ova faza egzistira kod nekih holesterika u malim temperaturnim intervalima između obične holesteričke i izotropne faze [26]. Naziv potiče od rasejanja plave svetlosti koju je daleko lakše zapaziti u refleksiji, nego u transmisiji. Pojavljuje se u obliku ploča koje su obojene, ako se posmatra pod polarizacionim mikroskopom sa ukrštenim polarizatorima. Ona je optički izotropna i ne može se objasniti interferencijom reflektovane svetlosti sa tankih slojeva, a prisustvo širokih traka bliskih ultravioletnim je posledica rasejanja svetlosti od izotropskih čestica čije su dimenzije približne talasnoj dužini vidljive svetlosti.

#### **2.1.3.5. Promena koraka holesteričke spirale**

Korak holesteričke spirale može se menjati pod uticajem faktora koje delimo u tri grupe:

1. dejstvo spoljašnjih polja,
2. uticaj temperature,
3. fizičko hemijski faktori.



Sl. 3.6.

*Promena koraka holesteričke spirale pod uticajem spoljašnjeg magnetnog, odnosno električnog polja.*

#### 2.1.3.5.1. Uticaj spoljašnjeg električnog polja na korak spirale

Promena koraka spirale uzrokuje promenu talasne dužine difraktovanog zraka pri datom ugлу tj. promenu boje difraktovane svetlosti. Monohromatska svetlost se rasejava pod raznim uglovima promenom napona. Električno polje kod ovog efekta je reda veličine 0,5–10 V/ $\mu$ m. Debljina tečno-kristalnog filma je 6–50  $\mu$ m, a potreban je napon od nekoliko volti. Između ravnih elektroda molekuli holesteričkog tečnog kristala se postavljaju dvojako. Osa spirale je ili paralelna ili normalna na površinu. Spirala molekula u oba slučaja gradi rešetku i zbog toga svetlost koja pada na nju bragovski se rasejava. Bela svetlost koja pada na tečno-kristalni film razlaže se na boje. Ako je osa spirale paralelna na površima elektroda i ako na čeliju priključimo električno polje normalno na osu spirale, spirale će težiti da se postave paralelno polju, čime se menja korak spirale, što uslovjava i promenu ugaone raspodele rasejanog zračenja. Promenom intenziteta električnog polja može se menjati boja rascjane svetlosti u određenom pravcu. Vreme uspostavljanja dilatacije spirale je teorijski 0,1 ms, a eksperimentalno postignuto 1 ms.

Električnim poljem se može prouzrokovati fazni prelaz. Analogna pojava primećena je i u magnetnim poljima veće jačine. Pri kritičnoj vrednosti polja dolazi do ispravljanja holesteričke spirale i prelaza holesterik → nematik [23]. Interesantna je činjenica da pri smanjenju električnog polja, prвobитно rasejavajuće stanje se uspostavlja drugim putem, na nekoj temperaturi dva do tri puta nižoj od prve kritične temperature. To znači da sistem ima dva stabilna stanja. Sličan optički efekat može se postići sa supstancijama negativne dielektrične anizotropije, a osa spirale tada mora biti normalna na elektrode u početnom stanju.

Električno polje prvo obara osu spirale paralelno sa elektrodama i tek tada se odvija fazni prelaz holesterik → nematik.

#### *2.1.3.5.2. Uticaj temperature na korak spirale*

Kod većine holesterika  $P$  je opadajuća funkcija temperature  $dP(T)/dT < 0$

Priroda ovih pojava nije sasvim objašnjena. Promena koraka spirale dovodi do promene boje, ako selektivna refleksija pada u vidljivi deo spektra. Najveći broj holesterika pri hlađenju menja boje sledećim redosledom: ljubičasta, plava, zelena, žuta, crvena boja i ponovo bezbojan. Daljim hlađenjem supstancija prelazi u smektičku mezofazu, koja je takođe bezbojna. Kod holesterika određenoj boji odgovara odredena temperatura. Mešanjem različitih holesteričkih supstancija može se dobiti skoro proizvoljna zavisnost temperatura-boja, što se može iskoristiti za merenje temperature. Višekomponentnim holesteričkim smešama danas je već omogućeno merenje temperature u intervalu  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+250^{\circ}\text{C}$ . Moguće je napraviti i smeše koje menjaju boju sa crvene na plavu pri promeni temperature za  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Merenje temperature vrši se nanošenjem tankog sloja holesterika na ispitivanu površinu ili naslanjanjem unapred pripremljene folije. Gradijent temperature  $\Delta T$  koji dovodi do promene maksimuma talasne dužine selektivno reflektovane svetlosti ( $\lambda_{\max}$ ) u pojasu širine 10 nm za različite smeše holesterika iznosi od 0,8 K do 120 K [27].

#### *2.1.3.5.3. Uticaj hemijskih primesa na korak spirale*

Temperaturni interval obrazovanja holesteričke mezofaze, veličina i znak zavoja spirale menjaju se u prelazu iz jednog ka drugom holesteričkom jedinjenju [28]. I svojstva smeše holesterika mogu se menjati izmenom vrste komponenti i procentualnog sastava komponenata. Za veliki broj komponenti komercijalnih holesterika uvratanje holesteričke spirale smeše je:

$$q'(T) = \sum_i q_i(T) \cdot c_i$$

gdje je  $c_i$  masena koncentracija komponente, a  $q_i(T)$  uvratanje holesteričke spirale komponente [6]. Ima smeša koje odstupaju od ovog pravila.

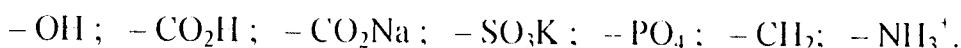
Neke primese izazivaju znatnu izmenu  $P$  i boju selektivno reflektovane svetlosti. Na tom principu radi uredaj za pretvaranje UV zračenja u vidljivo. Ako se u matrici nematika rastvori u maloj koncentraciji ( $c$ ) optički aktivno jedinjenje dolazi do stvaranja holesteričke mezofaze sa korakom spirale  $P$ , pri čemu je zadovoljen uslov:

$$Pc = \text{const.}$$

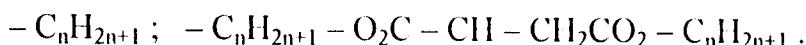
## 2.2. LIOTROPNI TEČNI KRISTALI

Tečne kristale koji nastaju rastvaranjem nekih organskih supstancija u vodi ili odgovarajućim organskim rastvaračima nazivamo liotropnim tečnim kristalima. Najpoznatija liotropna supstacija je kalijum-oleat [29].

Molekul liotropne supstancije u pogledu ponašanja prema rastvaraču može da se razdvoji na dva dela. Jedan deo molekula veoma lako ostvaruje kontakt sa odgovarajućim rastvaračem (koji je najčešće voda) i zato se taj deo naziva hidrofilnim. Drugi deo liotropnog molekula izbegava kontakt sa vodom i zato se zove hidrosobnim. Na hidrofilnom delu elektronski oblak se ne raspoređuje ravnomerno, nego su pozitivna i negativna mesta razdvojena u prostoru. Ovaj deo je polaran, čime se i objašnjava lako vezivanje sa vodom. Tipični hidrofilni delovi:



Hidrosobni deo se najčešće sastoji iz ugljovodoničnog lanca. Ovaj deo nije polaran, a lako stupa u kontakt sa mastima, lipidima. Zato se koristi i naziv lipofilni. Tipični predstavnici ovog dela molekula su:



I hidrofilni i hidrosobni deo ovih molekula lako se rastvara u određenim rastvaračima, ali različitih tipova. Jedinjenja kod kojih se javljaju ovi uslovi su amfifilna.

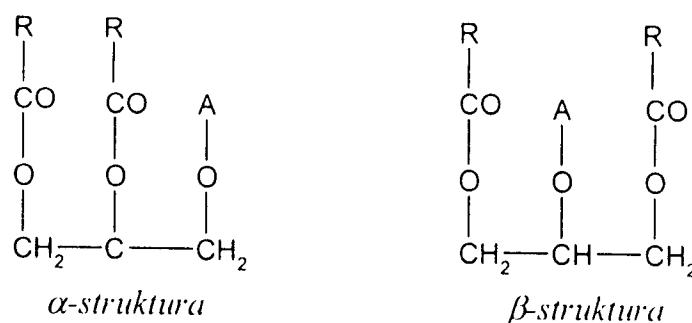
Na stabilnost ovih sistema utiču elektrostatičke i disperzione interakcije. Elektrostatička interakcija (hidrofilni deo) potiče od jona i dipola. Interakcije tipa jon-dipol, jon-jon i dipol-dipol su uglavnom privlačne. Disperziona interakcija (hidrosobni deo) igra važnu ulogu u razmeštanju dugih ugljovodoničnih lanaca.

### 2.2.1. Lipidi

Tečni kristali u živim organizmima su najčešće izgradeni od lipida. Biološki gledano u lipide ubrajamo i nepolarne supstancije sa hidrosobnim osobinama, i polarne supstancije sa hidrofilnim osobinama [8].

Polarni lipidi sastoje se iz ugljovodoničnog lanca i hidrofilnih grupa koje se vezuju uz lanac. Fizičke osobine su funkcije broja ugljenika.

U biološkim ultrastrukturama veoma su važni lipidi glicerofosfatidi koji se javljaju u  $\alpha$  ili  $\beta$  strukturi zavisno od položaja jonske grupe A:



Fosfolipidi grade u vodi faze gde se ugljovodonici lanac izoluje od vode.

Izmedu lanca i vode deluju slabe interakcije, što uzrokuje nastajanje biomolekularnih lipidnih slojeva ili zatvorenih tvorevina sfernog ili cilindričnog oblika – micele. Njihove jonske grupe se okreću prema vodi: oblik i raspored micela menja sa sa koncentracijom. Micele sadrže 20–100 molekula prečnika 10–20 nm. Ispitivanja rentgenske difrakcije pokazuju da je sistem fosfolipid-voda najčešće lamelarne strukture, mada može da se obrazuje i heksagonalna struktura.

U zavisnosti od koncentracije i temperature, jedna liotropna struktura može da pređe u drugu (polimorfija liotropnih tečnih kristala). Liotropne tečno-kristalne strukture mogu se javiti samo iznad odredene temperature. Ta temperatura se zove Kraftova (Kraft) temperatura ( $T_k$ ). Ispod ove temperature kristali plivaju u rastvaraču. Na velikim temperaturama intenzivna toplotna kretanja molekula razrušavaju tečno-kristalnu strukturu.

Male količine vode imaju značajne efekte na mezmorskično ponašanje. Promatranje fosfolipida u prisustvu rastućih količina vode pokazuje da kako količina vode raste tako označena endotermička prelazna temperatura za dati fosfolipid opada. Prelazna temperatura opada do odredene granične vrednosti bez obzira na koncentraciju vode. Postoji velik broj osobina povezanih sa prelaznom temperaturom za lipide kada su u prisustvu vode. Prva od njih je da mogućnost raspršivanja masti u vodi značajno raste iznad prelazne temperature.

Samo oni fosfolipidi koji daju prelaze kada su smešteni u vodu ispod ili blizu sobne temperature spontano grade mijelinske oblike. Visokozasićeni fosfolipidi koji imaju visoku prelaznu temperaturu ne grade mijelinske oblike na sobnoj temperaturi. Ako je temperatura povišena do tačke menjanja ovi fosfolipidi grade mijelinske oblike. Još jedna od osobina sistema lipid-voda je njihovo monoatomatočko ponašanje.

Visokozasićeni fosfolipidi obrazuju na sobnoj temperaturi monoatomatače koji su više zgasnuti, nego nezasićeni fosfolipidi koji sadrže cis ugljovodonične lance. Zasićeni lipidi uvek zauzimaju manje površine na niskim površinskim pritiscima nego zasićeni derivati.

Holesterin se dosta lako ugraduje medu lipidne slojeve. Kod fosfolipida dispergovanih u vodi dodavanjem holesterina ugljovodonični lanci gube karakteristike koje su imali u vodenom rastvoru. Slabo ionizovan molekul holesterola je mnogo manji od molekula fosfolipida. U dvostrukom lipidnom sloju holesterin se ugraduje oko sredine ugljovodoničnog lanca i ne prodire u

jonski deo lipidnog molekula. Holesterin-fosfolipidna interakcija je veoma važna u biološkim membranama, u mijelinskom sloju, u membranama crvenih krvnih zrnaca. Još 1925. g. Lits (Leathes) je pokazao da holesterol pomešan sa nekim masnim kiselinama u monomolekularnim filmovima na vodi izaziva umanjenje površine zahvaćene masnim kiselinama. Holesterol može da se doda mešavini lecitina i vode do molekularnih razmara 1:1. Svaki višak holesterola iznad proporcije izdvaja se kao kristal holesterola. Dodavanje holesterola lecitinu pri konstantnoj koncentraciji vode teži da blago podeblja omotač lipida. Efekat holesterola je u raskidanju uredenog niza ugljovodoničnih lanaca lipida u fazi gela, i kada su molekuli holesterola i lecitina prisutni u ekvimolarnim proporcijama svi lanci su u tečnom stanju. Prisustvo jednakog broja molova holesterola sa lipidima uzrokuje mešavine koje imaju sposobnost raspršivanja u vodi preko mnogo širih temperaturnih područja nego onih koji se pojavljuju kod individualnih fosfolipida.

Ispitavanjima sistema lipid-belančevina u različitim uslovima ustanovljeno je da belančevine menjaju površinski napon lipidnih slojeva koji su rastvoreni u vodi [30]. Belančevine koje graniče sa polarnim krajevima fosfolipida daju monomolekularne slojeve. Neke belančevine menjaju fizičke osobine dvostrukog lipidnog sloja, smanjuju specifičnu otpornost. Biološki lipo-proteidi su veoma labilna jedinjenja i teško se proizvode. Razlikujemo dve lipo-proteidne strukture:

- lipo-proteidne plazme,
- lamelarni lipo-proteidi.

### **3. TEČNI KRISTALI U BIOLOŠKIM SISTEMIMA**

U sastav živih organizama ulazi voda, belančevine, lipidi, ugljovodonik, nukleinske kiseline. Sve navedene supstancije pokazuju tečno-kristalne osobine. Liotropne tečne kristale karakteriše fluidnost i sposobnost difuzije. U etarskom ekstraktu čovečjeg mozga zapažene su lamelarne strukture i heksagonalna PH-2 struktura.

Centralnu belančevinu nervnog vlakna obmotava više slojeva fosfolipida, obrazujući mijelinski sloj. Ovaj sloj igra važnu ulogu u prenošenju nervnih impulsa. Oko 80% izolovanog mijelina izgrađen je od lipida, a sadrži i holesterin, belančevine, vodu... Polovina lipida su fosfolipidi (fosfatidil-holin (25-35%), fosfatidil-etanol-amin i cerebrozid (25%)). Nervni omotači se ponašaju kao izolatori jer sprečavaju isticanje signala i kratke spojeve. Kompleksna micela sfernog oblika može se tretirati kao model jednostavnih bakterija. U živim tkivima je otkriven fenomen dvojnog prelamanja čiji se stepen povećava pri istezanju, a smanjuje pri kontrakciji.

#### **3. 1. MODEL MEMBRANE**

##### *Veštacke membrane*

Spontana formacija fosfolipida u vodi, iznad njihove prelazne temperature, od globula koje sadrže bioomotače od lipida odvojene vodenim omotačem dovela je do njihove upotrebe kao modela membrane.

Joni mogu biti zarobljeni u vodenim prostorima. Koristeći ovaj model mogu se oponašati razni efekti koji se pojavljuju kod prave membrane.

U drugom modelu membrane fosfolipid se iznad svoje prelazne temperature boji preko otvora, odvajajući dve vodene sredine. On se spontano istanjuje i formira jedan omotač. Ovaj model se može koristiti prilikom posmatranja propustljivosti, toka vode. Model membrane je potpuno stabilan, a nešto od ove stabilnosti je povezano sa osobinama protočnosti fosfolipida u njegovoj fazi tečnog kristala [31].

##### *Prirodne membrane*

Iako kompleksne, prirodne membrane su uspešno proučavane korišćenjem istih tehniki kao i kod prostih lipida i vode.

### *Kalorimetrijska proučavanja*

Našlo se za potrebno ispitati da li se termički prelazi pojavljuju kod ćelijskih membrana sličnih onima sa samim fosfolipidima. Kod membrana koje ne sadrže holesterol uočen je snažan endotermički prelaz. Kod membrana koje sadrže holesterol, kao npr. membrane crvenog krvnog zrnca, nije uočen termički prelaz sa lipidnom komponentom. Tečnost membrana može biti povezana sa prelaznim temperaturama njihovih komponenti. Membrane koje sadrže fosfolipide koji su manje nezasićeni biće manje tečne nego one koje sadrže fosfolipide koji su više nezasićeni.

Efekti holesterola na proste lipidne vodene sisteme nagoveštavaju da je moguća uloga holesterola u membranama kontrola tečnosti ugljovodonicih lanaca fosfolipida, obezbeđujući koherentnu strukturu stabilnu na širokim rasponima temperature i dopuštajući neke širine u sadržaju masnih kiselina komponentnih lipida.

## **3. 2. ULOGA TEČNIH KRISTALA U ŽIVOTNIM PROCESIMA**

Organska materija mora se posmatrati kao produkt organskog hlađenja. Neorganski svet od uredenih struktura poznaće samo kristale. Hlađenje je omogućilo reakcije ugljenika i ostalih elemenata koji formiraju jedinjenja koja se sastoje od linearnih helikalnih i cikličnih molekula, od kojih se neki ponašaju kao tečni kristali pod određenim termičkim uslovima. Takva jedinjenja često ostaju stabilna na ekstremnim temperaturama i zaista mogu biti produkti kondenzacija i ciklizacija sprovedenih na visokim temperaturama. Veza između života i liotropskih mezomorfnih sistema iziskuje sledeće fizičko-hemijske karakteristike žive materije [32]:

1. mogućnost da replicira esencijalne strukture beskonačno,
2. mogućnost da preuzima energiju iz svoje okoline i da je skladišti tokom neaktivnih perioda,
3. pretvaranje energije iz hemijskog u kinetički oblik radi kretanja i deobe plazme,
4. korišćenje malih skokova u energetskim nivoima za sve protoplazmatične reakcije,
5. obrazovanje polimera od identičnih ili sličnih pojedinaca,
6. obrazovanje makromolekula od različitih pojedinaca,
7. kombinacija nepromenljivih sa promenljivim hemijskim i fizičkim strukturama radi obrazovanja koloida, disperzija i koacervata,
8. uredeni rast i diferencijacija hemijskih i fizičkih konstituenata u trajne ili ćelijske oblike protoplazme,
9. uredenje molekula i makromolekula različite složenosti na način koji dopušta, simultano, a zadržavanje reda individualnosti u stanju kinetičke i termalne pokretljivosti.

10. očuvanje fizičke i hemijske osobenosti tokom promena u spoljašnjem okruženju.

### 3.3. PROMENE FAZE

Živo tkivo ne može postajati bez prisustva makromolekula kao što su lipidi, nukleinske kiseline i proteini, koji poseduju biohemiju reaktivnost isključivo u prisustvu vode. Elementarna reakcija prvog reda recimo kao što su enzimska hidroliza i sinteza, gasna ili jonska razmena i difuzija, može se odvijati u koloidnim amorskim izotropnim jedinjenjima, ali svi strukturalni uslovi potrebni za obrazovanje i individualno funkcionalisanje zasebnih ćelija i tkiva ne mogu se sresti u amorskim izotropnim jedinjenjima, niti i u jednoj fazi materija, osim u tečnim kristalima. Reakcija četvrtog reda, npr., pojavljuje se kada je više od jednog tipa molekula uključeno u jednu ili više fazu u odabranoj orijentaciji kao kod ćelijskih membrana u kojima su fosfolipidi i proteini esencijalne komponente [32].

Sa biosfizičkog stanovišta, granice života ćelije ili tkiva su granice fazno zavisnih reakcija te ćelije ili tkiva. Takođe, mora se voditi računa o faznoj ravnoteži i faznoj tranziciji. Može se još reći i da jednom razbijena živa ćelija više ne može biti oživljena.

Razni faktori mogu ometati faznu ravnotežu i veze živog tkiva te izazivaju oštećenje ili smrt, čak i kad hemijska promena nije značajna. Promena faze i bioenergetska transformacija u živim sistemima, mora se obaviti u relativno niskim granicama koje termodinamički ograničavaju reaktivnost, ali biosfizički predstavljaju bezgranične mogućnosti (viskoznost, konduktivnost, hidrofilija, osmoza...). Rast i razvoj ćelije zavise i od regulacije uredene faze, dok je degeneracija rezultat obrnutog procesa.

Ako je fazna ravnoteža poremećena jednostavnim fizičkim delovanjem, dovoljnim da utiče na ravnotežu slabih sila koje uredenu tečnost čine kristalom, rezultat je isti kao i kod promene faze, ali biološki, to je degeneracija ili smrt ćelije, tkiva. Možemo reći i da je smrt ćelije ili tkiva uzrokovana promenom slabih medumolekularnih sila u uredenom stanju.

### 3.4. LIPIDNA MEZOPHAZA U NERVNOM TKIVU

Većina supstancija za koje se zna da prouzrokuju promenu u funkciji nervnih ćelija i tkiva, rastvorljive su u mastima. Uticaj droge na nervnu ćeliju proporcionalan je njenoj rastvorljivosti u masti. Na taj proces utiče veličina molekula i slobodna energija apsorpcije hemikalije u lipidnoj fazi. Narkotički i anestetički efekti zavise od sposobnosti ovih supstancija da obrazuju hidrate

stabilizovane u linjske lance proteina u akvatičnoj fazi ćelijske supstance. Bitne su i promene u ćelijskim katjonima  $K^+$  i  $Ca^{++}$  [33]. Anestetici svoju aktivnost zahvaljuju rastvorljivosti u mastima tj. mogućnosti da prođu u amfifilični omotač, uđu u lipidnu monofazu nervnih ćelija i nekako naruše stanje metaboličke i fizičke ravnoteže povezane sa svešću.

### **3.5. LIPIDI I LIPOPROTEINI U TKIVU I TELESNOJ TEČNOSTI**

Kompleksne supstance generastvorljive u vodi su biološki korisne samo kada se rastvore ili rasprše u emulzijama koje sadrže vodu. Holesterol je hidrofoban, ali samo umereno lipofilan i odlično ilustruje probleme fizioloških faznih transformacija. Prisustvo holesterola u lamelarnoj mezofazi ima stabilizujući efekat tako da, uprkos osjetljivosti površinski aktivnih agenasa, mezofaza koja sadrži holesterol može izdržati visokoenergetsko zračenje [32].

### **3.6. HOLESTEROL U FIZIOLOŠKIM I PATOLOŠKIM STANJIMA**

Rastvorljivost holesterola u ljudskoj jetri odredena je koncentracijom žučnih soli i lecitina u kvarternarnim vodenim sistemima [34]. U nekim patološkim stanjima, koncentracija holesterola je povećana iza tačke rastvorljivosti, vodeći do taloženja holesterola i obrazovanja žučnog kamena. Bez obzira na visoku rastvorljivost holesterola u mastima, fiziološki procesi koji uključuju holesterol zavise uglavnom i od vodenih i delimično vodenih faza, uključujući i transport jona ili proteina ili enzimske hidrolize. Holesterol u eritrocitima, serumu i lipoproteinskim kompleksima tkiva je u raspršenom ili tečno-kristalnom stanju. U tom obliku se identificuje kao intra- ili ekstra-ćelijski, kao anizotropske čestice u različitim situacijama, uključujući leukocite, nervno tkivo, adrenalni korteks, retku  $\beta$ -lipo-proteinsku frakciju plazme i aterosklerotične arterije. U ranim godinama života holesterol i njegovi estri se prenose u  $\alpha$ -lipo-proteinskim frakcijama. U starijem dobu se povećava količina  $\beta$ -lipo-proteina koji prenosi veće koncentracije holesterola i redi je. Kod nelečenog dijabetesa, hipotiroidizma i nekih oblika hroničnog nefritisa, retka  $\beta$ -lipo-proteinska faza je uočljivo veća, a taloženje mezofaze sa sadržajem holesterola u arterijama raste primetno [35].

### **3.7. ĆELIJSKI I MEĐUĆELIJSKI KONTAKTI; MOLEKULARNA UKLAPANJA I VEZE**

Struktura i funkcija svih tkiva zavisi od lokalnih kontakata i površinske aktivnosti ćelija od kojih se sastoji. Membrana je uredeni, sterol-stabilizovani biomolekularni fosfolipid, nastala od unutarćelijskog fosfolipida omotanog proteinom koji je propustljiv za lipidno rastvorljive supstance, relativno nepropustljiv za jone nerastvorljive u vodi i visokog električnog otpora. Sa biosfunkcionalnog stanovišta prisustvo »pora« i amfifilna priroda ćelijске membrane ostvaruje transport hidrofilnih i lipofilnih molekula u koloidnom obliku, dok pritisak na površini utiče na adheziju i međućelijske kontakte [36].

Često visoko uredeni molekuli postoje i deluju nezavisno od ćelija, mada su poreklom iz ćelija ili su oslobođeni njihovim raspadom. Antitela su visoko specifična zbog funkcionalne inertnosti osim ako odgovaraju datom antigenu ili njegovom delu, strukturalno. U imunološkom sistemu interakcija između antigena i antitela je precizna.

### **3.8. MAKROMOLEKULI U KOLOIDIMA I GELOVIMA**

Liotropska mezofaza je nastala interakcijom komponenti prvobitno prisutnih u dve ili više faza [37]. Visoko uredeni sistemi tipa tečni kristali, opstaju u koloidima i gelovima [38]. Stabilno stanje (uredeno) može se postići i održati i između velikih molekula kad su njihove polarne grupe vezane privlačnim silama, a nepolarne Van der Valsovim silama.

## 4. JONIZUJUĆE ZRAČENJE

Dosad navedene činjenice o biološkim sistemima i činjenica da su holesterol i estri holesterola od esencijalnog značaja za vitalnost živog organizma, daju osnovu za ispitivanje tečno-kristalnih supstanci sa radioekološkog stanovišta, tj. ispitivanje uticaja jonizujućeg zračenja na sмеše holesteričkih tečnih kristala [39].

Jonizujuće zračenje predstavljaju:

- čestice i elektromagnetsko zračenje nastalo pri transformacijama atomskog jezgra,
- elektromagnetsko zračenje nastalo interakcijama u elektronskom omotaču.

Jonizujuće zračenje delimo na:

- elektromagnetsko ( $\text{x-}$  i  $\gamma$ -),
- korpuskularno (snop neutralnih ili nanelektrisanih čestica).

Naziv jonizujuće potiče od karakteristike da pri interakciji sa materijom vrši ionizaciju.

Izvori jonizujućeg zračenja mogu biti:

- prirodni (kosmičko zračenje i prirodni radioaktivni izotopi),
- veštački (svi izvori nastali veštački izazvanim i kontrolisanim nuklearnim reakcijama, kao npr. kod akceleratora, kao i nekontrolisanim nuklearnim reakcijama kakve su havarije, eksplozije...).

### 4.1. DEJSTVO JONIZUJUĆEG ZRAČENJA NA ŽIVE ORGANIZME

Organizam je sposoban da apsorbuje jonizujuće zračenje (energiju) i pretvoriti je u toplotu ili energiju hemijskih reakcija. U ljudskom tkivu se nalazi oko 70% vode, a u plazmi krvi i do 95%, te najveći deo energije apsorbuje voda [40]. Osnovni proces pri ovoj apsorpciji je interakcija jonizujućeg zračenja sa elektronskim omotačem atoma organskih molekula.  $\text{x-}$  i  $\gamma$ - zračenja vrše primarnu ionizaciju pri direktem sudaru (fotoefekat ili komptonovo rasejanje). Mali deo jonizujućeg zračenja dovodi do biološkog oštećenja. Najveći deo se troši na povećanje unutrašnje energije.

Izbačeni elektroni imaju širok spektar energija te mogu izazvati sekundarnu eksitaciju i ionizaciju. Nazivamo ih  $\delta$ -zraci.

Snop jonizujućeg zračenja napada vitalne centre kao DNK u hromozomima ćelijskog jedra. Jonizujuće zračenje na DNK deluje:

- 1) direktna interakcija (kidanje kovalentnih veza, cepanje molekula...),
- 2) indirektna interakcija (radiolizom vode) [41].

Hemijske promene mogu oštetiti molekul DNK prekidanjem jednog ili oba polinukleotidna lanca, kidanjem vodoničnih veza između purinskih i pirimidinskih baza ili strukturnom promenom baza. Ovo može izazvati genetske mutacije, gubitak sposobnosti deobe, prestanak životno važnih funkcija ćelije, trenutno uništenje...

Na dejstvo jonizujućeg zračenja najneosetljivije su bakterije, jednoćelijski organizmi, a najosetljiviji sisari i čovek. Biološki štetne efekte može izazvati doza od 2,5 mC/kg. Minimalna smrtna doza iznosi 103 mC/kg do 155 mC/kg [42]. Trenutnu smrt izaziva doza od 387 mC/kg. Jonizujuće zračenje pri oštećenju izaziva somatske i genetske efekte. Oštećenje genetske supstance u bilo kom tkivu, osim generativnog, ne prenosi se naslednjim putem. To su somatski efekti, poremećaji hromozoma u ćelijama limfocita, jetre i kanceri. Ovi efekti mogu biti akutni, koji se neposredno manifestuju, i hronični. Povrede genetske supstance generativnog tkiva mogu se preneti na potomstvo. Genetske mutacije nastaju oštećenjem pojedinih gena, hromozoma ili grupe hromozoma. Jonizujuće zračenje je veoma jak mutagen. Mutageno delovanje x-zračenja je kumulativno. Zbog ovog štetnog dejstva na žive organizme neophodno je iznaći što efikasniji detektor jonizujućeg zračenja. Obzirom da tečno-kristalne supstancije primanjem jonizujućeg zračenja deluju promenom boje i pomeranjem temperature mezomornog faznog prelaza, mogu se koristiti i kao detektori jonizujućeg zračenja.

Obzirom na smrtnost humane populacije i primljene doze jonizujućeg zračenja i činjenice da estri holesterola u sastavu ćelije, tkiva i telesnih tečnosti poseduju tečno-kristalnu fazu, ispitivanje uticaja jonizujućeg zračenja na holesterike dobija na značaju. Holesterična tečno-kristalna supstancija pod uticajem jonizujućeg zračenja može ukazati na promene u strukturi i mutaciji ćelija živih organizama.

## 5. PRIMENA HOLESTERIČKIH TEČNIH KRISTALA

Važna upotreba holesteričkih tečnih kristala proizlazi iz jedinstvenih osobina tankih filmova mezosaza ovih jedinjenja. Oni bojom pokazuju temperaturu površine na kojoj se nalaze. Ovim tečnim kristalima meri se i energija mikrotalasnog zračenja, infracrvene i vidljive svetlosti, laserska produktivnost, a imaju i potencijalnu primenu kao detektori malih količina zagađenja u atmosferi. Temperaturna zavisnost njihove boje omogućava korišćenje filmova holesteričnog materijala na Granžanovoј ravanskoj teksturi da bi se pokazale temperature površina na koje su naneseni. Ova se primena uobičajeno zove površinska termografija. Film holesterične mezosaze ne reflektuje obojenu svetlost kada je maksimum talasnog zračenja u infracrvenom ili UV delu spektra.

Važna osobina je i ugaona zavisnost talasne dužine reflektovane svetlosti. Kada se film holesterika osvetli normalno na ravan filma, talasna dužina reflektovane svetlosti je maksimalna u pravcu normalnom na film. Prilikom upotrebe holesterika za meranje apsolutne ili realne površinske temperature, mora se uzeti u obzir i ugaona zavisnost talasne dužine reflektovane svetlosti, jer će se posmatrana boja promeniti sa uglom osvetljenja i uglom posmatranja.

Najčešće nam je potreban holesterik koji je u mezosazi na sobnoj temperaturi. Zbog toga se holesterogeni najčešće koriste u čistom stanju, mada se koriste i smeše da bi se snizila tačka topljenja u poređenju sa čistim.

Ako je film holesterika brzo ohladen često se dobija staklasta materija koja nastavlja da reflektuje. To je zbog potrebe za vremenom da bi struktura reagovala na temperaturne promene.

### 5.1. POVRŠINSKA TERMOGRAFIJA

*Kožna termografija* [43]: – termalna mapa izvedena uz pomoć filma holesterika pokazuje puteve vena i arterija. Potkožni tumorci se mogu takođe detektovati na ovaj način.

*Površina termografija u elektronskoj industriji*: – koristi se za otkrivanje tačaka kvarova.

*Aerodinamička testiranja* [44]: – za otkrivanje razgraničenja područja gde se laminarna i turbulentna struja javljaju.

*Međustriktivni testovi laminata* [45]: – postavlja se film holesteričkog tečnog kristala jednom stranom na laminat i posmatra se protok toplote kroz uzorak na drugoj strani.

## **5.2. OTKRIVANJE ATMOSFERSKIH ZAGAĐIVAČA**

Difuzija nečistoća u holesterički film utiče na kraj heliksa i menja talasnu dužinu i boju reflektovane svetlosti. Ova metoda se koristi u otkrivanju atmosferskih zagadivača, budući da su gasovi određenih različitih organskih rastvarača stvorili različite boje u mešavinama holesterogena različitih kompozicija. Ako je gas rastvoren u holesteriku, promena boje je reverzibilna, dok se rastvarač gubi mezofazom, ali ako se pojavi hemijska interakcija promena boje je stalna [46].

## **5.3. HISTEREZISNI HOLESTERICI**

Danas se izučavaju i histerezisni holesterički materijali koji su obojeni, ali se menjaju do amorfne tečnosti, kao posledica temperaturnih promena ili prisustva nekih zagadivača. Kada se ukloni uzrok oni se vraćaju do bezbojnih holesteričkih stanja, ali je potrebno vreme da bi se vratila prvobitna boja. Korišćeni materijali su mešavina holesterogena koja obično sadrže holesteril ili holestanil halid [47]. Holesterični filmovi sa ovim osobinama bitni su za otkrivanje bilo kritične temperature, napona ili nivoa zagadenja koja se očitavaju neko vreme nakon uočavanja efekta.

Holesterički tečni kristali imaju još širok spektar upotrebe, od kojih možemo da navedemo neke:

- uredaj za pretvaranje UV zračenja u vidljivo,
- detekcija pare u tragovima,
- skladištenje informacija u tečnim kristalima:
  - a) konzervisanje stanja dinamičkog rasejanja – u kombinaciji sa nematicima,
  - b) ispis informacija infracrvenim laserskim zračenjem,
  - c) hologram,
- primena u medicini i veterinarstvu:
  1. termometri,
  2. dijagnoza oboljenja krvnih sudova,
  3. dijagnoza raka,
  4. kontrola presadivanja kože,
  5. iskazivanje upale i istezanja,
  6. diagnostika u veterinarstvu,
- primene u tehnici i industriji:
  1. ispitivanje mikropukotina,
  2. ispitivanje integrisanih strujnih kola,
  3. ispitivanje aerodinamičnosti,

4. ispitivanje mikrotalasnog prostora,
5. ispitivanje ultrazvučnog prostora,
6. merenje graničnih temperatura.
7. pretvaranje infracrvenog zračenja u vidljivo.

## **B. EKSPERIMENTALNI DEO**

# 1. KARAKTERISTIKE SUPSTANCIJA

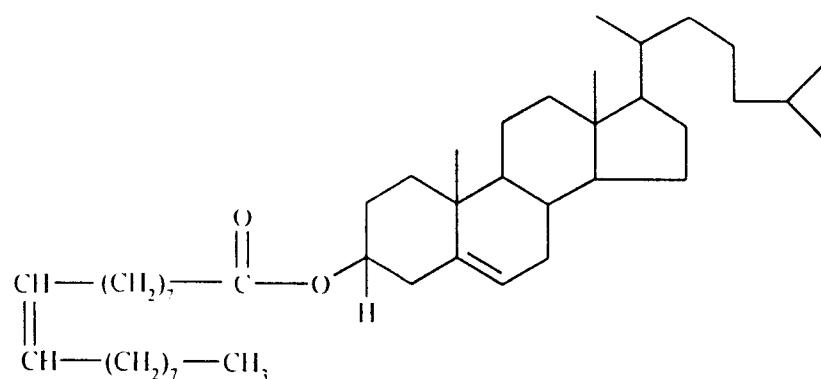
## 1. 1. ČISTE SUPSTANCIJE

U radu su ispitivane smeše sledećih holesteričkih tečno-kristalnih supstancija:

### 1. Holesteril oleil-karbonat

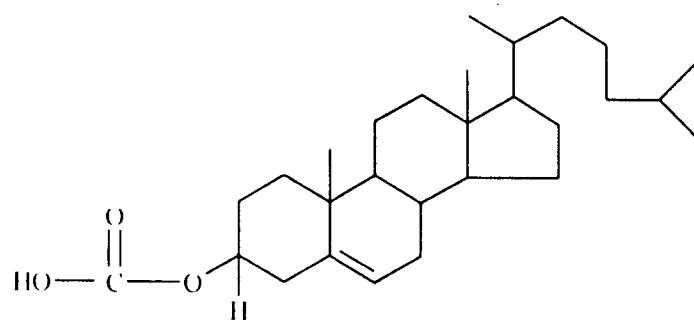
Holesteril oleat ( $C_{45}H_{78}O_2$ ) [39]

- strukturna formula:



Holesteril karbonat ( $C_{28}H_{46}O_3$ ) [39]

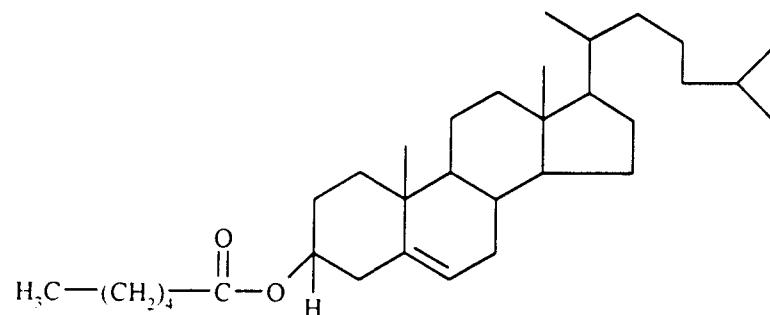
- strukturna formula:



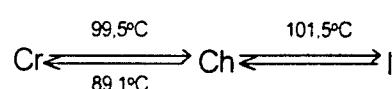
- fazni dijagram:  $Cr \xrightarrow{14^{\circ}C} SmA \xrightarrow{21^{\circ}C} Ch \xrightarrow{38,5^{\circ}C} I$

## 2. Holesteril kapronat ( $C_{33}H_{56}O_2$ )

- strukturna formula:

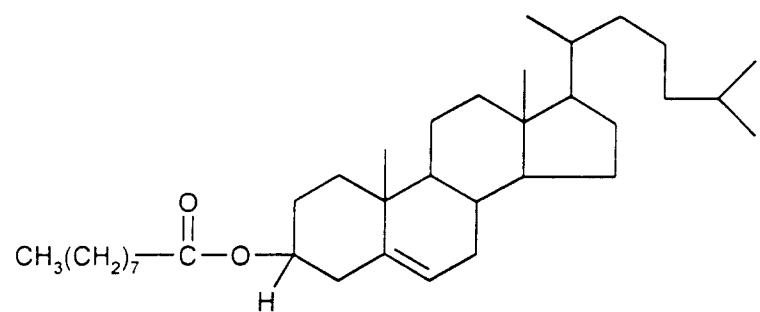


- fazni dijagram:

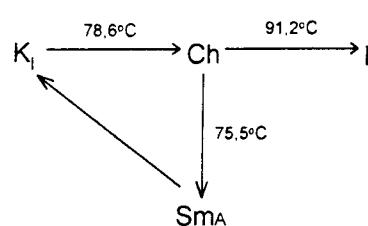


## 3. Holesteril nonanoat ( $C_{36}H_{62}O_2$ ) [48]

- strukturna formula:

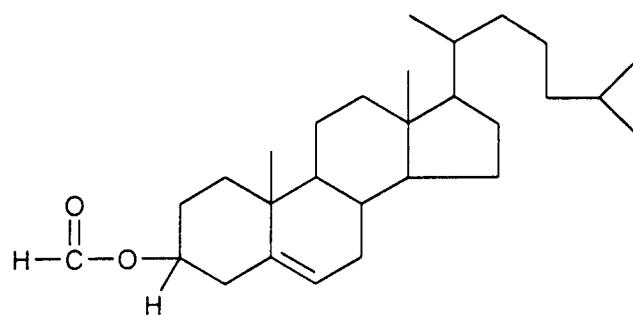


- fazni dijagram:

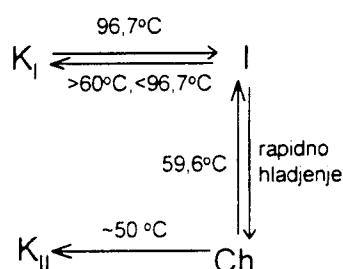


#### 4. Holesteril formijat ( $C_{28}H_{46}O_2$ ) [49]

- strukturna formula:



- fazni dijagram:



## 1.2. FORMIRANJE DVOKOMPONENTNIH I TROKOMPONENTNIH SMEŠA

Navedena četiri estra holesterola smo koristili za formiranje jedne dvokomponentene i dve trokomponentne smeše:

1° holesteril oleil-karbonat (50%) + holesteril kapronat (50%).

2° holesteril nonanoat (70%) + holesteril oleil-karbonat (10%) + holesteril kapronat (20°C),

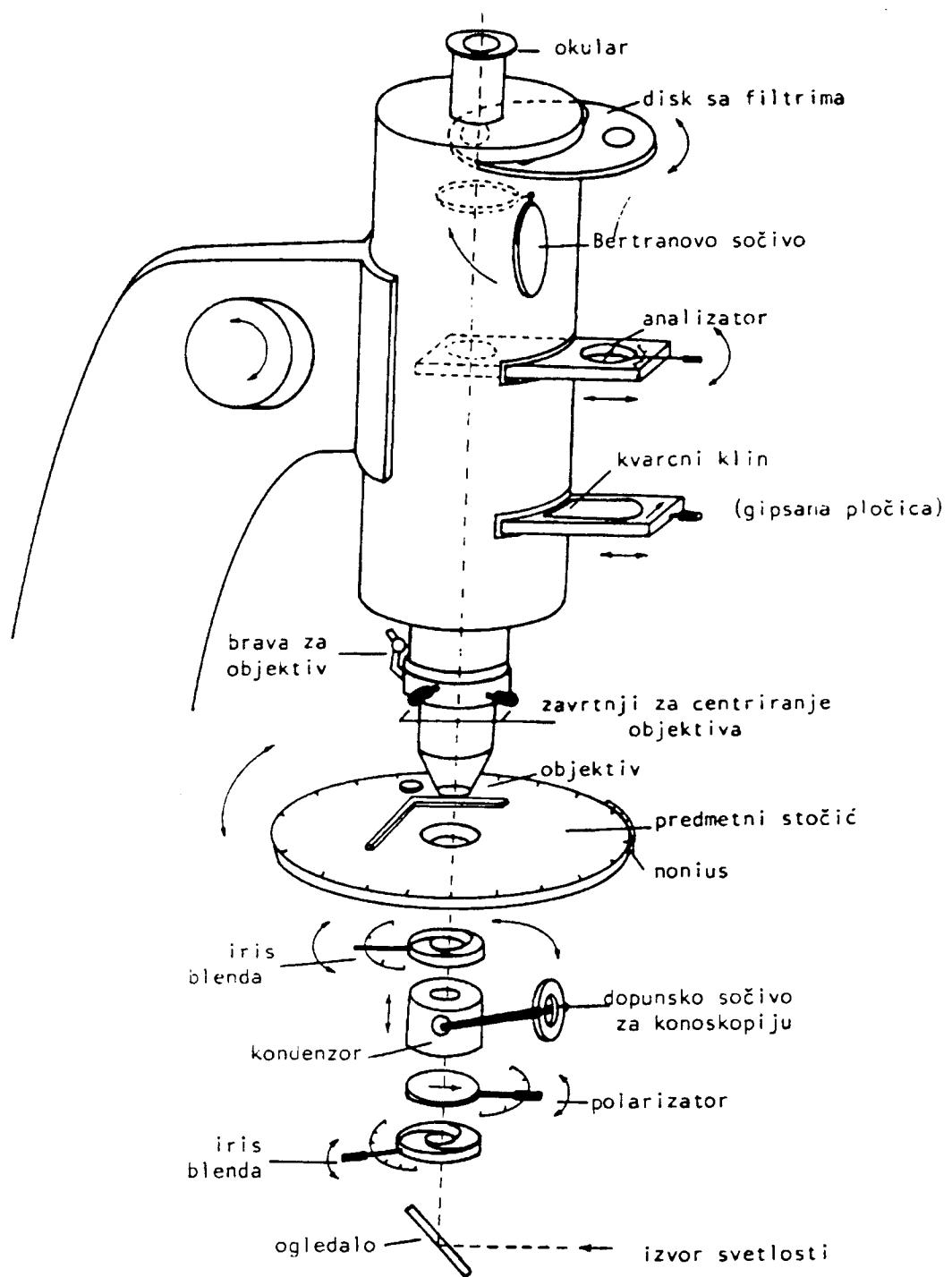
3° holesteril nonanoat (70%) + holesteril oleil-karbonat (10%) + holesteril formijat (20°C).

Smeše su dobijene zagrevanjem inicijalnih smeša u zadnom odnosu do izotropne faze, termostatiranjem u trajanju od dvadeset minuta i hlađenjem do sobne temperature. Sve tri smeše na sobnoj temperaturi obrazuju čvrstu holesteričku fazu.

Zagrevanjem direktno prelaze u izotropnu fazu, a pri hlađenju formiraju holesteričku mezofazu. Smeša 1° najduže drži mezofazu u procesu hlađenja (nekoliko časova), dok smeša 2° ima najkraće vreme relaksacije.

Da bi ispitali uticaj ionizujućeg zračenja na fazne prelaze holesteričkih tečnih kristala, kao i mogućnost korišćenja holesteričkih smeša za detekciju ionizujućeg zračenja, formirane smeše su izložene dejstvu kontinualnog snopa x-zraka u vremenskom periodu od 30 i 60 minuta, pri čemu su apsorbovane doze ( $D_a$ ) 1,25 Gy i 2,5 Gy respektivno.

## 2. OPTIČKA ISPITIVANJA



Sl. 2.1. Šematski prikaz polarizacionog mikroskopa

Optička ispitivanja vršena su pomoću polarizacionog mikroskopa »Carl Zeiss (Jena)« u transparentnoj svetlosti sa posebnim dodatkom za grejanje odnosno hlađenje uzorka »Mettle FP5«.

Uzorci smeše se postavljaju na staklenu mikroskopsku pločicu i poklapaju pokrovnom pločicom. Tako pripremljen preparat stavlja se na grejnu ploču, koja se nalazi na obrtnom postolju polarizacionog mikroskopa. Ispitivanje se vrši u ortoskopskoj tehnici sa ukrštenim polarizatorom i analizatorom. Brzina grejanja i hlađenja bila je  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , a u oblasti faznih prelaza i  $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Postavljanjem fotoadaptera na polarizacioni mikroskop i stavljanjem kasete sa filmom vršeno je fotografisanje uzorka. Uslovi snimanja za sve fotografije su: ortoskopsko posmatranje, polarizatori ukršteni, upotrebljen plavi filter, uvećanje 700 puta, vreme ekspozicije 5 sekundi.

Polarizacioni mikroskop inače koristimo za ispitivanje optički anizotropnih materijala. Optička anizotropija sredine manifestuje se u različitim brzinama prostiranja svetlosti u različitim pravcima, pa prema tome i različitim indeksima prelamanja. U optički anizotropne materijale ubrajaju se kristali ili delimično kristalični materijali u koje spadaju neki polimeri i tečni kristali [50].

Polarizacionim mikroskopom u kombinaciji sa klupom za grejanje možemo dobiti sledeće informacije o uzorku: temperature faznih prelaza, temperatura prelaza u izotropnu fazu, tip tečnog kristala (monotropan, enantiotropan), tip mezofaze kao i tekstura mezofaze.

U sledećem koraku, nakon ispitivanja pripremljenih smeša, vršeno je njihovo zračenje na 30 i 60 minuta. Upoređivanjem faznih prelaza neozračenih i ozračenih smeša vidi se da sa ozračenjem smeše dolazi do pomeranja temperature faznog prelaza ka nižim temperaturama, menja se boja reflektovane svetlosti usled promene strukture mezofaze odnosno promene koraka holesteričke spirale P.

## 2.1. HOLESTERIL OLEIL-KARBONAT (50%) I HOLESTERIL KAPRONAT (50%)

Ispitivanjem je utvrđeno da ova smeša formira monotropnu holesteričku fazu. Na sobnoj temperaturi  $24^{\circ}\text{C}$  ona je u čvrstom holesteričkom stanju. Posmatranjem kroz polarizacioni mikroskop vidi se žuto-zeleno zrnasta struktura (sl. 2.1.).

Zagrevanjem, na temperaturi od  $80^{\circ}\text{C}$  naglo prelazi u izotropnu tečnost (vidno polje polarizacionog mikroskopa postaje zatamnjeno).

Postepenim snižavanjem temperature na  $75^{\circ}\text{C}$  vidno polje se ispunjava svetlećim kristalizacionim jezgrima koji lebde u izotropnoj fazi. Na nižoj temperaturi od  $40^{\circ}\text{C}$  polje se ispunjava zelenim mrljama i žutim linijama koje nastaju iz prvočasnih svetlećih jezgara. Na još nižoj temperaturi od  $35^{\circ}\text{C}$  javlja se tamna ljubičasta boja u prostoru između žutih svetlećih linija. Uzorak održava

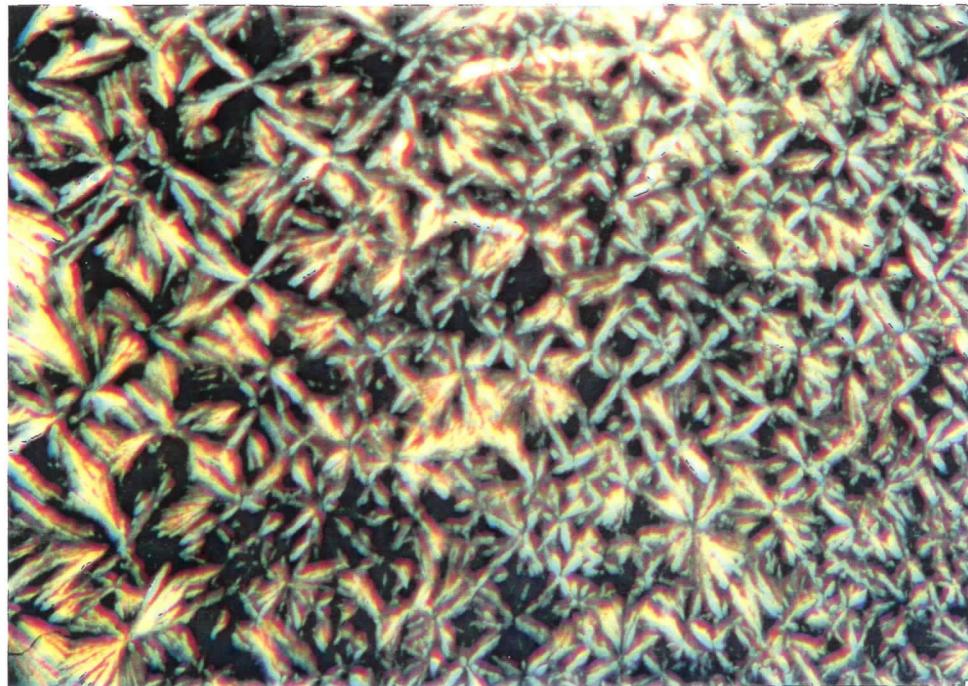
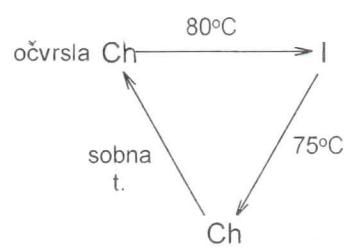
mezofazu nekoliko časova. Na sobnoj temperaturi potom prelazi u tzv. čvrstu holesteričku fazu.

Istim postupkom ispitivali smo i zračene uzorke i dobili sledeće rezultate:

a) neozračen:

- grejanje: čvrsti Ch (žuto-zelen zrnast)  $\xrightarrow{80^{\circ}\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{75^{\circ}\text{C}}$  kristalići u izotropnoj fazi  $\xrightarrow{40^{\circ}\text{C}}$  zelene mrlje i žute linije  $\xrightarrow{35^{\circ}\text{C}}$  ljubičasta boja  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja

Šema faznog prelaza:

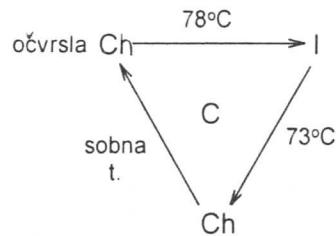


Sl. 2.1. Fotografija dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) na sobnoj temperaturi

b) ozračen na 30 minuta:

- grejanje: očvrsla Ch (žuto-zelen zrnast)  $\xrightarrow{78^\circ\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{73^\circ\text{C}}$  kristalići u izotropnoj fazi  $\xrightarrow{37^\circ\text{C}}$  zelene mrlje i žute linije  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  ljubičasta boja  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja

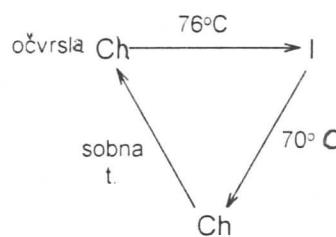
Šema faznog prelaza:



c) ozračen na 60 minuta:

- grejanje: čvrsti Ch (žuto-zeleno zrnast)  $\xrightarrow{76^\circ\text{C}}$  I  
I  $\xrightarrow{70^\circ\text{C}}$  kristalići u izotropnoj fazi  $\xrightarrow{33^\circ\text{C}}$  zelene mrlje i žute linije  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja
- ovde beležimo izostanak pojave ljubičaste boje

Šema faznog prelaza:



## 2.2. HOLESTERIL NONANOAT (70%), HOLESTERIL OLEIL-KARBONAT (10%) I HOLESTERIL KAPRONAT (20%)

Smeša formira monotropnu fazu. Na sobnoj temperaturi ( $24^\circ\text{C}$ ) ova smeša se nalazi u čvrstom holesteričkom stanju. To je sitna raznobojna lepezasta struktura (sl. 2.2.).

Zagrevanjem dolazi do topljenja i prelazi u izotropnu fazu na temperaturi  $74^\circ\text{C}$ .

Laganim hlađenjem na  $64^\circ\text{C}$  dolazi do prelaska u holesteričku mezofazu. Tada se javlja bela zrnasta struktura. Daljim snižavanjem temperature pojavljuju se sve dugine boje i to određenim redom na određenim temperaturama (sl. 2.3.-2.11.). Na temperaturi od  $54^\circ\text{C}$  se pojavljuje ljubičasta boja, na  $52^\circ\text{C}$  plava,  $51^\circ\text{C}$  plavo-zelena tirkizna, na  $50^\circ\text{C}$  zelena svetla, na  $49,8^\circ$  narandžasta, na  $48,7^\circ$  crvena koja na  $48,5^\circ$  prelazi u bordo-braon. Daljim hlađenjem u našem slučaju najmanjom mogućom brzinom  $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$  na temperaturi od  $45^\circ$  javlja se braon-

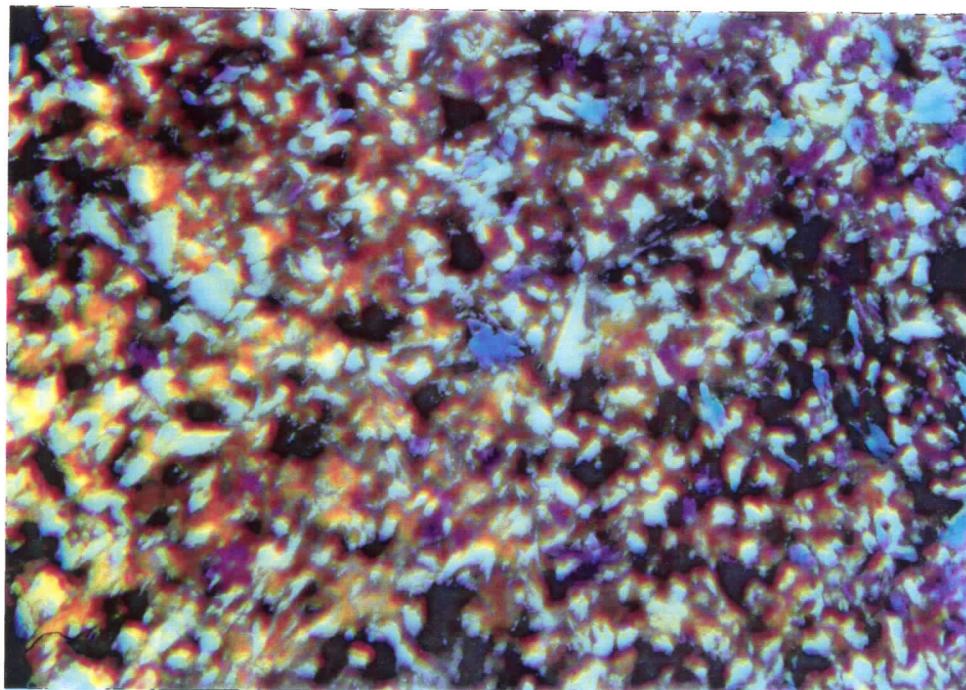
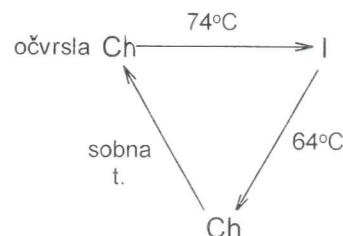
zelena boja, na  $44^{\circ}$  se javlja bela zrnasta struktura koja na  $42^{\circ}\text{C}$  prelazi u zlatno žutu, a na  $33^{\circ}\text{C}$  javlja se i narandžasta boja. Prelaskom na sobnu temperaturu javljaju se šarena zrna, struktura očvršnjava i prelazi u prvobitno stanje. Vreme relaksacije je veoma kratko, uzorak skoro trenutno kristališe.

Istim postupkom ispitivali smo i zračene uzorke i dobili sledeće rezultate:

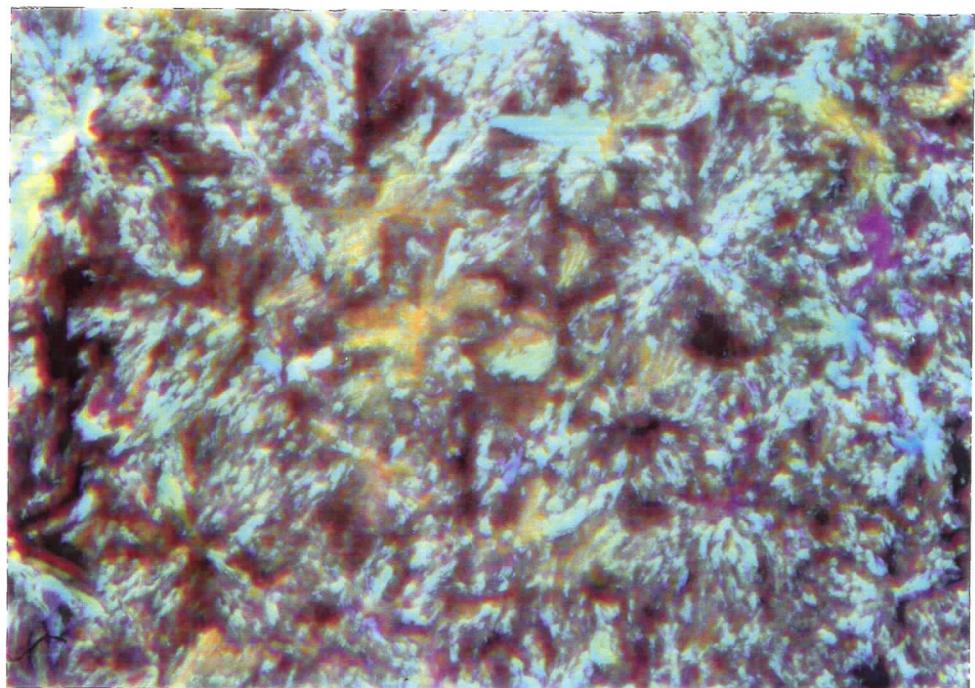
a) neozračen:

- grejanje: čvrsti Ch (sitna raznobojna lepezasta struktura)  $\xrightarrow{74^{\circ}\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{64^{\circ}\text{C}}$  bela zrnasta struktura  $\xrightarrow{54^{\circ}\text{C}}$  ljubičasta boja  
 $\xrightarrow{52^{\circ}\text{C}}$  plava boja  $\xrightarrow{51^{\circ}\text{C}}$  plavo-zelena boja  $\xrightarrow{50^{\circ}\text{C}}$   
 zelena boja  $\xrightarrow{49,8^{\circ}\text{C}}$  narandžasta boja  $\xrightarrow{48,7^{\circ}\text{C}}$  crvena  
 boja  $\xrightarrow{48,5^{\circ}\text{C}}$  braon boja  $\xrightarrow{45^{\circ}\text{C}}$  braon-zelena boja  
 $\xrightarrow{44^{\circ}\text{C}}$  bela zrnasta struktura  $\xrightarrow{42^{\circ}\text{C}}$  žuta boja zrnaca  
 $\xrightarrow{33^{\circ}\text{C}}$  narandžasta boja zrnaca  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje  
 pre grejanja

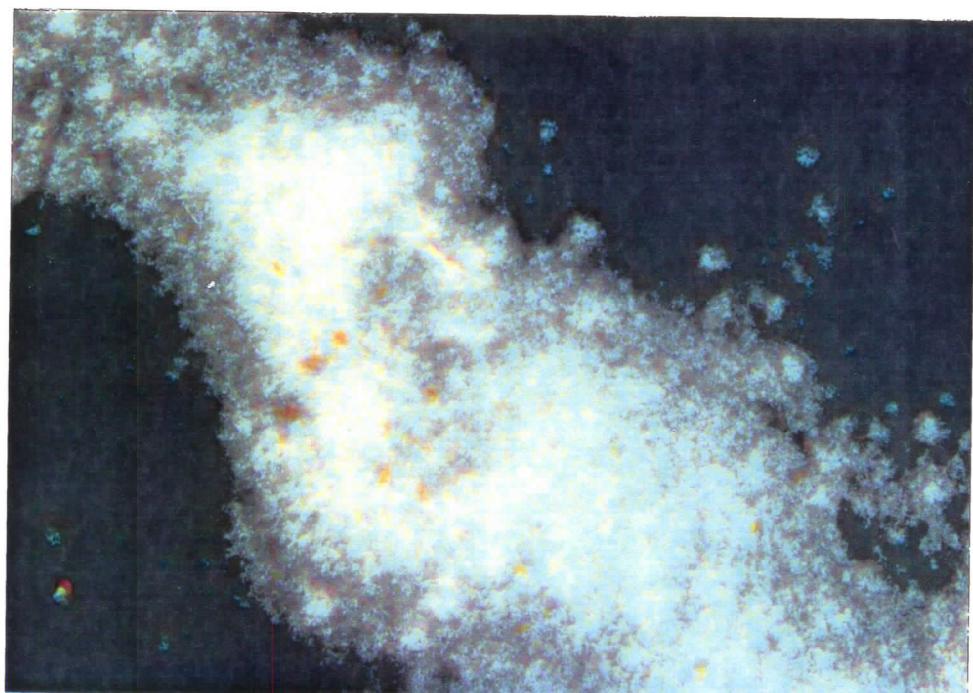
Šema faznog prelaza:



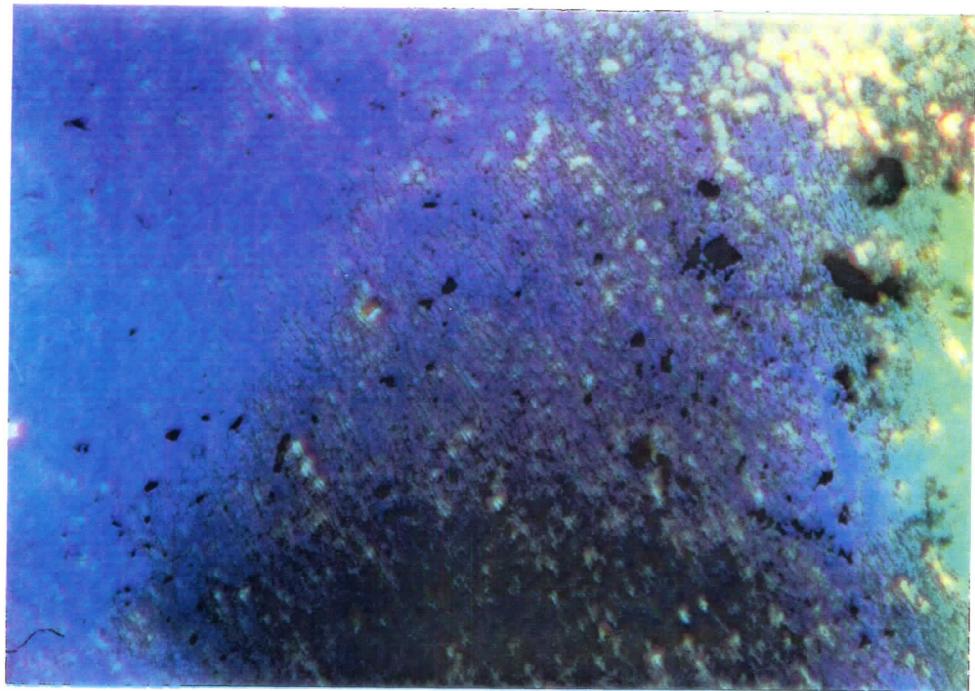
Sl. 2.2. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) na sobnoj temperaturi



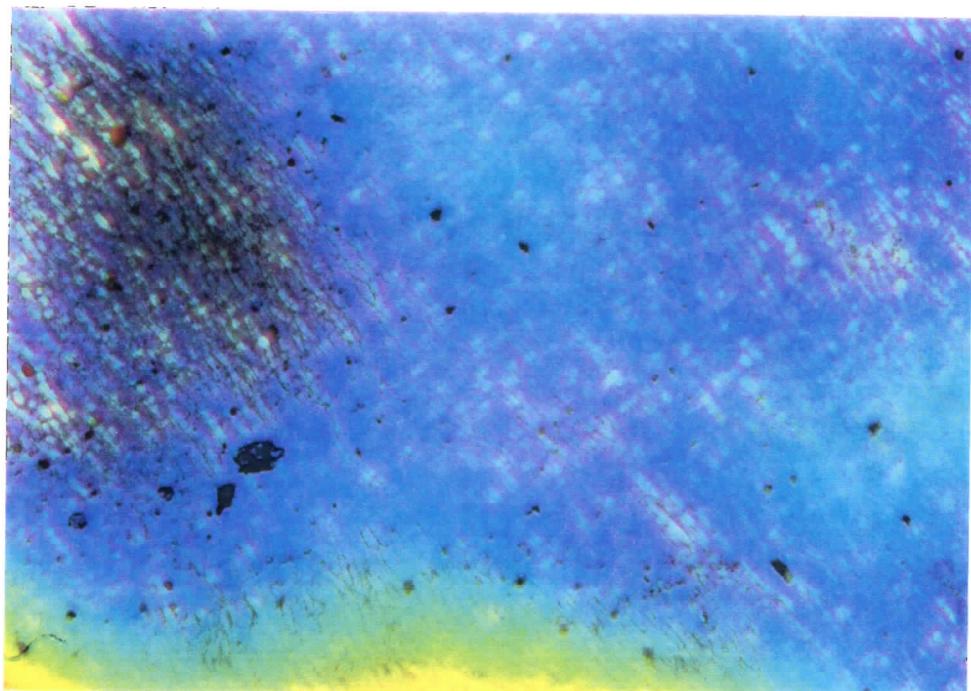
Sl. 2.3. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) pri topljenju



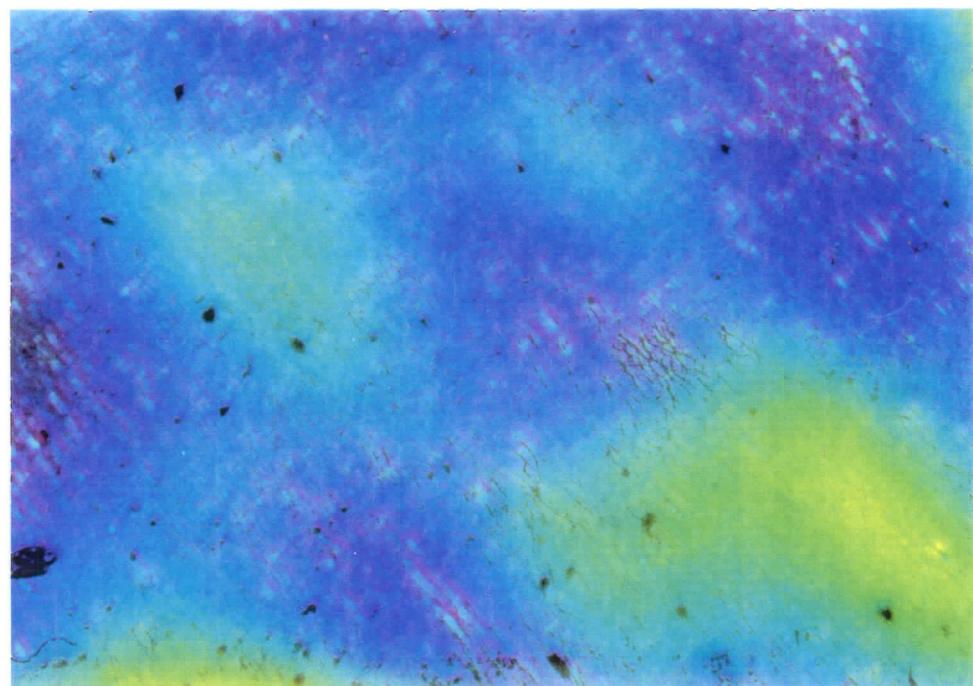
Sl. 2.4. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od 64 °C



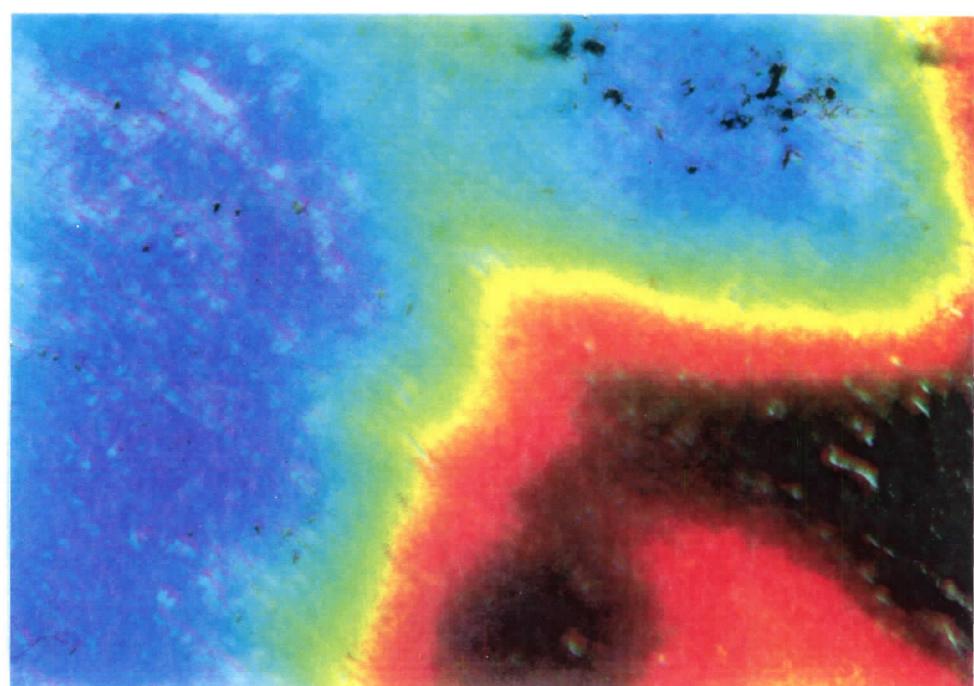
Sl. 2.5. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od 52 °C



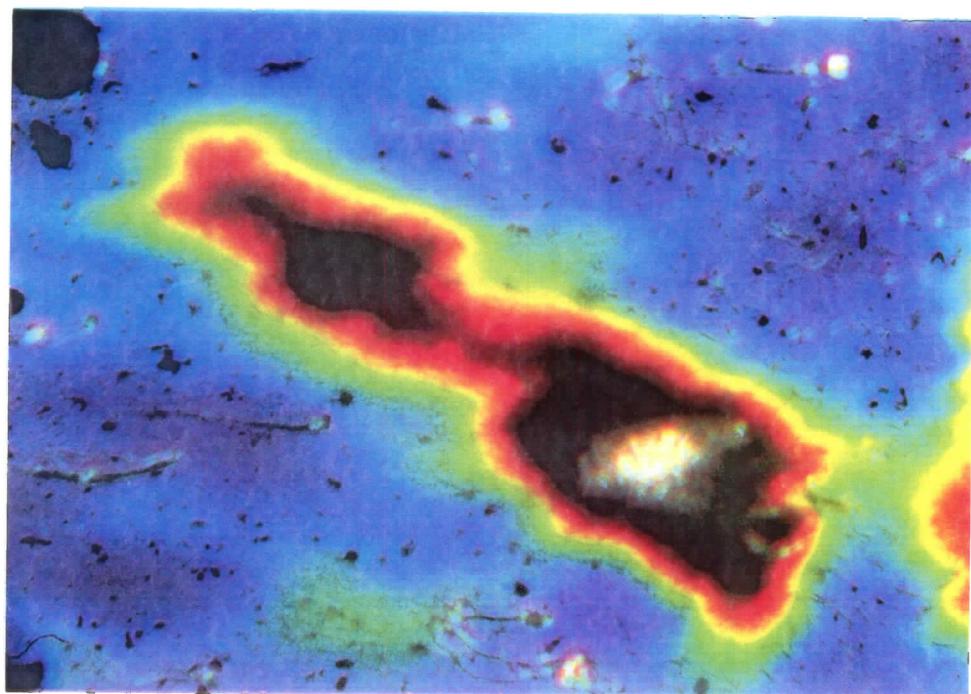
Sl. 2.6. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od 51,5 °C



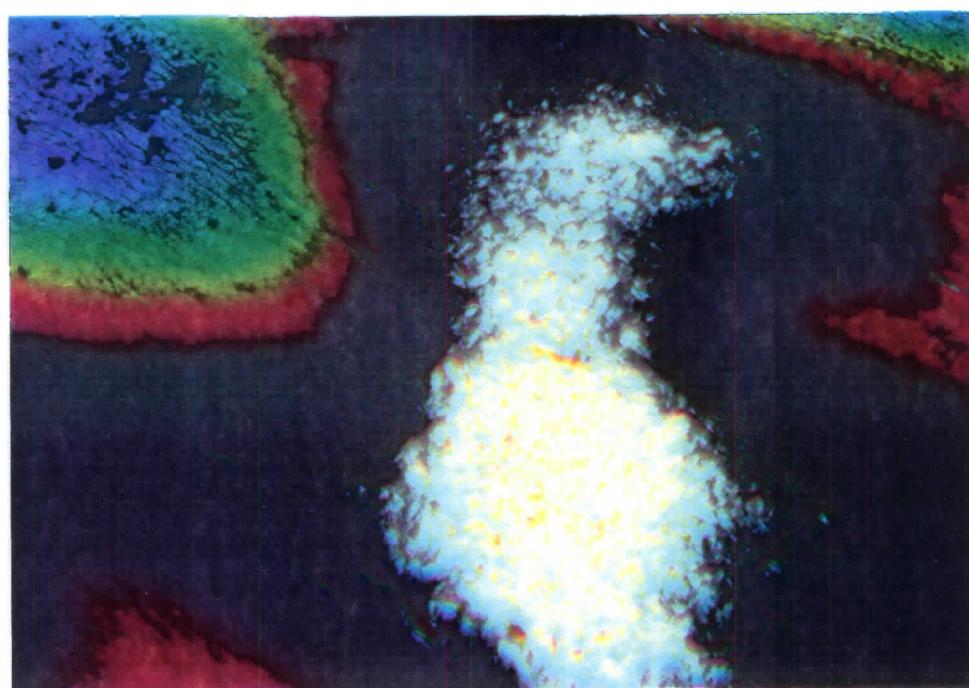
Sl. 2.7. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od 50,5 °C



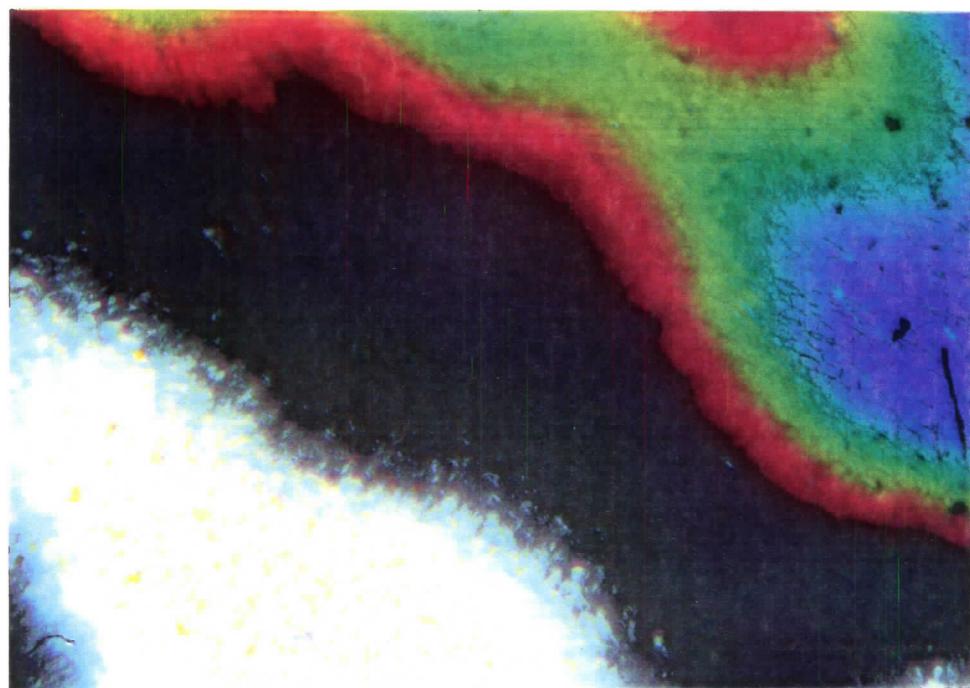
Sl. 2.8. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od 48,5 °C



Sl. 2.9. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$



Sl. 2.10. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od  $42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

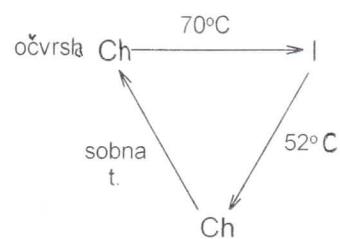


Sl. 2.11. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u holesteričkoj mezofazi, pri hlađenju na temperaturi od 42,5 °C

b) ozračen na 30 minuta:

- grejanje: čvrsti Ch (sitna raznobojna lepezasta struktura)  $\xrightarrow{70^\circ\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{52^\circ\text{C}}$  ljubičasta boja  $\xrightarrow{50,8^\circ\text{C}}$  plava boja  $\xrightarrow{49^\circ\text{C}}$  plavo-zelena boja  $\xrightarrow{48,1^\circ\text{C}}$  zelena boja  $\xrightarrow{47,8^\circ\text{C}}$  narandžasta boja  $\xrightarrow{46,9^\circ\text{C}}$  crvena boja  $\xrightarrow{46,5^\circ\text{C}}$  braon boja  $\xrightarrow{44^\circ\text{C}}$  braon-zelena boja  $\xrightarrow{42,5^\circ\text{C}}$  bela zrnasta struktura  $\xrightarrow{41,8^\circ\text{C}}$  žuta boja zrnasta  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja

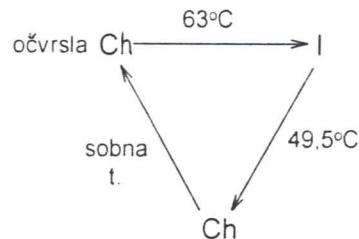
Šema faznog prelaza:



c) ozračen na 60 minuta:

- grejanje : čvrsti Ch (sitna raznobojna lepezasta struktura)  $\xrightarrow{63^{\circ}\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{49,5^{\circ}\text{C}}$  ljubičasta boja  $\xrightarrow{46,8^{\circ}\text{C}}$  plava boja  $\xrightarrow{46,3^{\circ}\text{C}}$  plavo-zelena boja  $\xrightarrow{45,9^{\circ}\text{C}}$  zelena boja  $\xrightarrow{44,6^{\circ}\text{C}}$  narandžasta boja  $\xrightarrow{43,9^{\circ}\text{C}}$  crvena boja  $\xrightarrow{43,6^{\circ}\text{C}}$  braon boja  $\xrightarrow{42,7^{\circ}\text{C}}$  braon-zelena boja  $\xrightarrow{40,5^{\circ}\text{C}}$  bela zrnasta struktura  $\xrightarrow{39,5^{\circ}\text{C}}$  žuta boja zrnaca  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja
- i ovde beležimo izostanak bele zrnaste strukture odmah po prelasku iz izotropne faze, kod zračenih uzoraka, i nestanak izrazito narandžaste boje zrnaca pri očvršćavanju

Šema faznog prelaza:



### 2.3. HOLESTERIL NONANOAT (70%), HOLESTERIL OLEIL-KARBONAT (10%) I HOLESTERIL FORMIJAT (20%)

Ispitivanjem je utvrđeno da ova smeša formira monotropnu holesteričku fazu. Na sobnoj temperaturi ( $24^{\circ}\text{C}$ ) ova smeša se nalazi u čvrstoj fazi. To je žuto-zelena lepezasta struktura (sl. 2.12.).

Zagrevanjem ova smeša prelazi u izotropnu fazu na temperaturi od  $68^{\circ}\text{C}$ . Nakon hlađenja, zaključujemo da je i ova smeša monotropna.

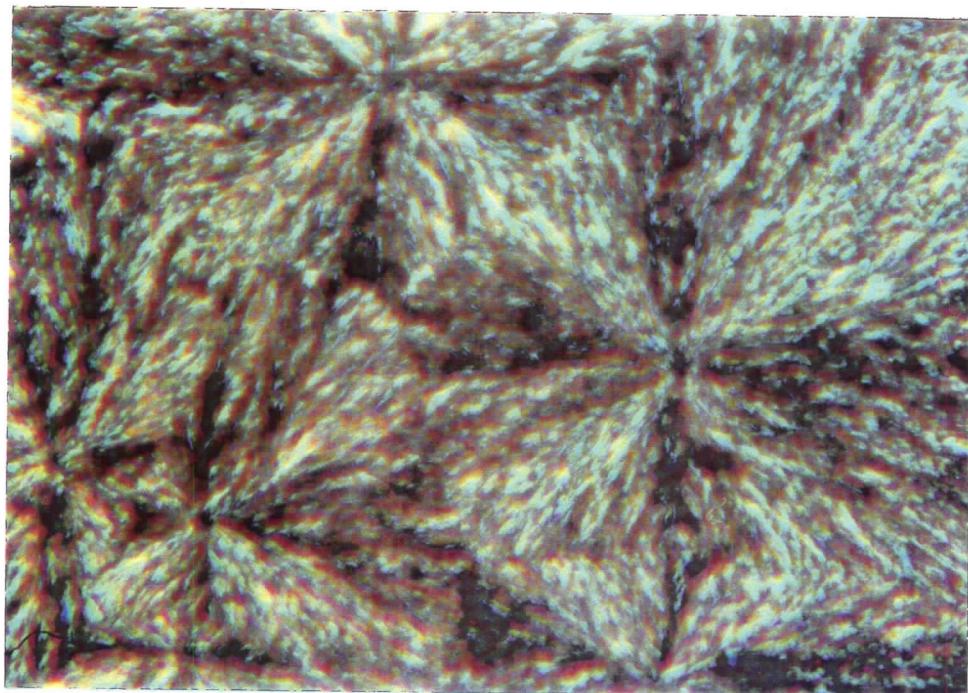
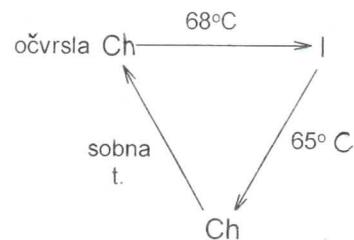
Hlađenjem na temperaturi  $65^{\circ}\text{C}$  smeša prelazi iz izotropne u holesteričku mezofazu. Na toj temperaturi pojavljuje se zelena boja, a na nešto nižoj temperaturi od  $58^{\circ}\text{C}$  sitna žuta zrnca. Na temperaturi od  $53^{\circ}\text{C}$  celo vidno polje je žuto zrnasto na zelenoj podlozi. Na temperaturi  $41^{\circ}\text{C}$  javlja se na nekim delovima ljubičasta boja. Na  $37^{\circ}\text{C}$  ona prelazi u ljubičasto-plavu boju, a na ostalim delovima ostaje žuto-zelena. Na sobnoj temperaturi nakon izvesnog vremena kristališe u prvobitno stanje.

Istim postupkom ispitivali smo i zračene uzorke i dobili sledeće rezultate:

a) neozračen:

- grejanje: čvrsti Ch (žuto-zelen lepezast)  $\xrightarrow{68^{\circ}\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{65^{\circ}\text{C}}$  zelene mrlje  $\xrightarrow{58^{\circ}\text{C}}$  žuta zrnca  $\xrightarrow{53^{\circ}\text{C}}$  sitno žuto zrnast na zelenoj podlozi  $\xrightarrow{41^{\circ}\text{C}}$  ljubičasta boja na zelenoj podlozi  $\xrightarrow{37^{\circ}\text{C}}$  ljubičasto-plava boja na žuto-zelenoj podlozi  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja

Šema faznog prelaza:

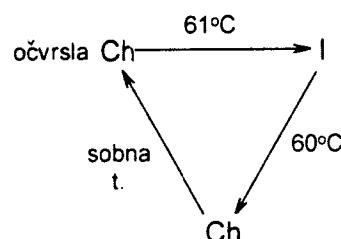


Sl. 2.12. Fotografija trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril formijata (20%) u holesteričkoj mezofazi, na sobnoj temperaturi

b) ozračen na 30 minuta:

- grejanje: čvrsti Ch (žuto-zelen lepezast)  $\xrightarrow{61^\circ\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{60^\circ\text{C}}$  zelene mrlje  $\xrightarrow{57^\circ\text{C}}$  žuta zrnca  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  ljubičasta boja  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja

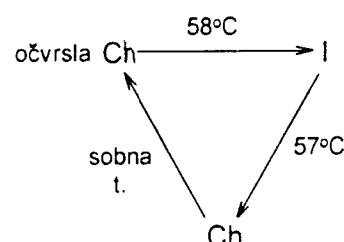
Šema faznog prelaza:



c) ozračen na 60 minuta:

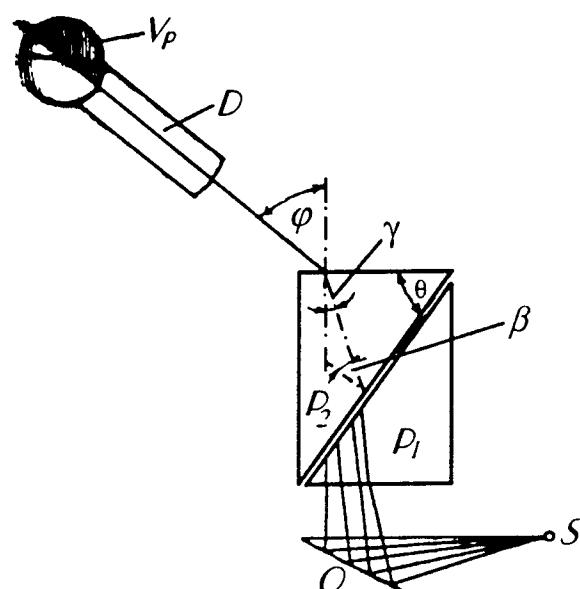
- grejanje: očvrsla Ch (žuto-zelen lepezast)  $\xrightarrow{58^\circ\text{C}}$  I
- hlađenje: I  $\xrightarrow{57^\circ\text{C}}$  zelene mrlje  $\xrightarrow{52^\circ\text{C}}$  žuta zrnca  $\xrightarrow{\text{sobna t.}}$  početno stanje pre grejanja
- i ovde s primećuje izostanak nekih etapa pri hlađenju kod ozračenih uzoraka

Šema faznog prelaza:



Kao posledica zračenja dolazi do temperaturnih pomeranja svih promena boja, tekstura i drugih zapaženih detalja, pa čak i nestajanja nekih koje bi se verovatno pojavile na temperaturama nižim od sobne, što nije bilo dostupno merenju.

### 3. MERENJE INDEKSA PRELAMANJA ABEOVIM REFRAKTOMETROM



*Sl. 3.1. Šematski prikaz refraktometra  
(O – ogledalo,  $P_1$  i  $P_2$  – prizme koje se pokreću, D – nepokretni durbin u čiji sistem su ugrađene Amičijeve (Amici) prizme,  $V_p$  – vidno polje, S – izvor)*

Određivanje indeksa prelamanja supstancije pomoću Abeovog (Abbe) refraktometra zasniva se na merenju graničnog ugla totalne refleksije [50]. Merno područje indeksa prelamanja je od 1.3 do 1.7, a temperature na kojima se oni mogu meriti su od sobne do  $70^{\circ}\text{C}$ .

Tečni kristali u mezofazi dvojno prelamaju svetlost, pa se meri indeks prelamanja redovnog i neredovnog zraka i računa srednja vrednost:

$$n = [n_r + n_n]/2$$

Optički sistem Abeovog refraktometra sastoji se iz ogledala O, prizmi  $P_1$  i  $P_2$  koji se kao celina pokreću, i nepokretnog durbina D, u čiji sistem su ugrađene Amičijeve prizme. Uloga ovih prizmi je da se pogodnim odabirom njihovog međusobnog položaja u sistem propušta samo svetlost određene talasne dužine. Mala količina uzorka stavlja se između prizmi. Svetlost se od izvora pomoću ogledala usmerava ka prizmi  $P_1$  čija je gornja površina brušena da predstavlja difuzni izvor svetlosti koja dospeva na graničnu površinu prizma-uzorak.

U vidnom polju durbina  $V_p$  uočava se granica između osvetljenog i neosvetljenog dela u zavisnosti da li zraci dolaze iznad ili ispod graničnog ugla totalne refleksije. Relativni indeks prelamanja uzorka iznosi:

$$n_{nv} = \frac{n_{pv}}{n_{pn}} = \sin \theta \left( n_{pv}^2 - \sin^2 \varphi \right)^{\frac{1}{2}} - \cos \theta \sin \varphi \quad (9)$$

$\theta$  – ugao prizme

$\varphi$  – mereni ugao

$n_{pv}$  – indeks prelamanja prizma-vazduh

Radi održavanja temperature ispitivane supstancije prizme su smeštene u omotač koji je termostatiran. Blok sa prizmama se pokreće sve do momenta dok se kritični zrak ne poklopi sa presekom končanica u durbinu D. Obrtanjem Amićijevih prizmi uklanja se sferna aberacija i indeks prelamanja se očitava na skali baždarenoj u saglasnosti sa gornjom relacijom.

Merenje indeksa prelamanja je urađena tako što su svi uzorci prvo prevedeni u izotropnu fazu, a zatim su ohlađeni i održani na temperaturi od 45°C, na kojoj su svi uzorci u mezofazi.

Izračunate srednje vrednosti indeksa prelamanja:

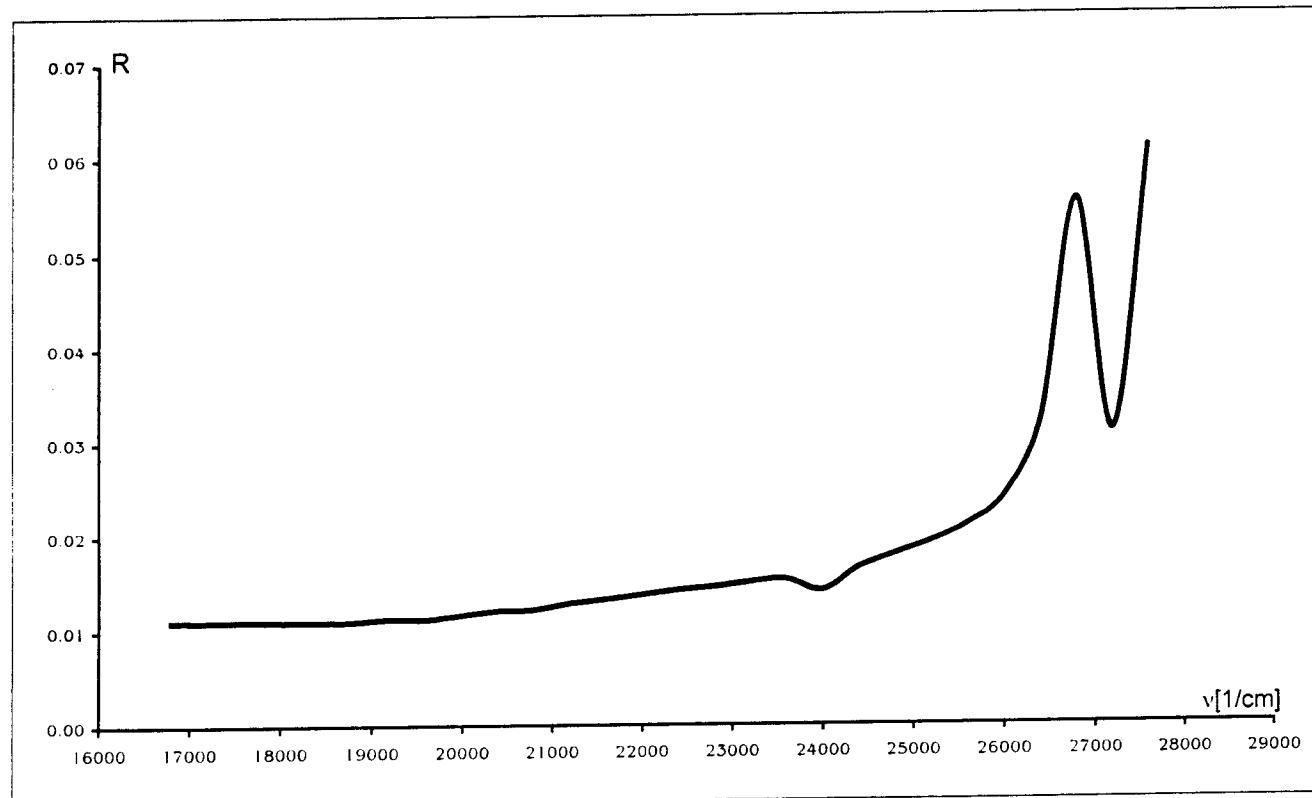
1. Holesteril oleil-karbonat (50%) + holesteril kapronat (50%)
  - a) neozračen:  
 $n=1.687$
  - b) ozračen na 30 minuta:  
 $n=1.683$
  - c) ozračen na 60 minuta:  
 $n=1.681$
  
2. Holesteril nonanoat (70%) + holesteril oleil-karbonat (10%) + holesteril kapronat (20%)
  - a) neozračen:  
 $n=1.689$
  - b) ozračen na 30 minuta:  
 $n=1.685$
  - c) ozračen na 60 minuta:  
 $n=1.684$
  
3. Holesteril nonanoat (70%) + holesteril oleil-karbonat (10%) + holesteril formijat (20%)
  - a) neozračen:  
 $n=1.691$
  - b) ozračen na 30 minuta:  
 $n=1.687$
  - c) ozračen na 60 minuta:  
 $n=1.685$

#### 4. REFLEKSIONI SPEKTRI

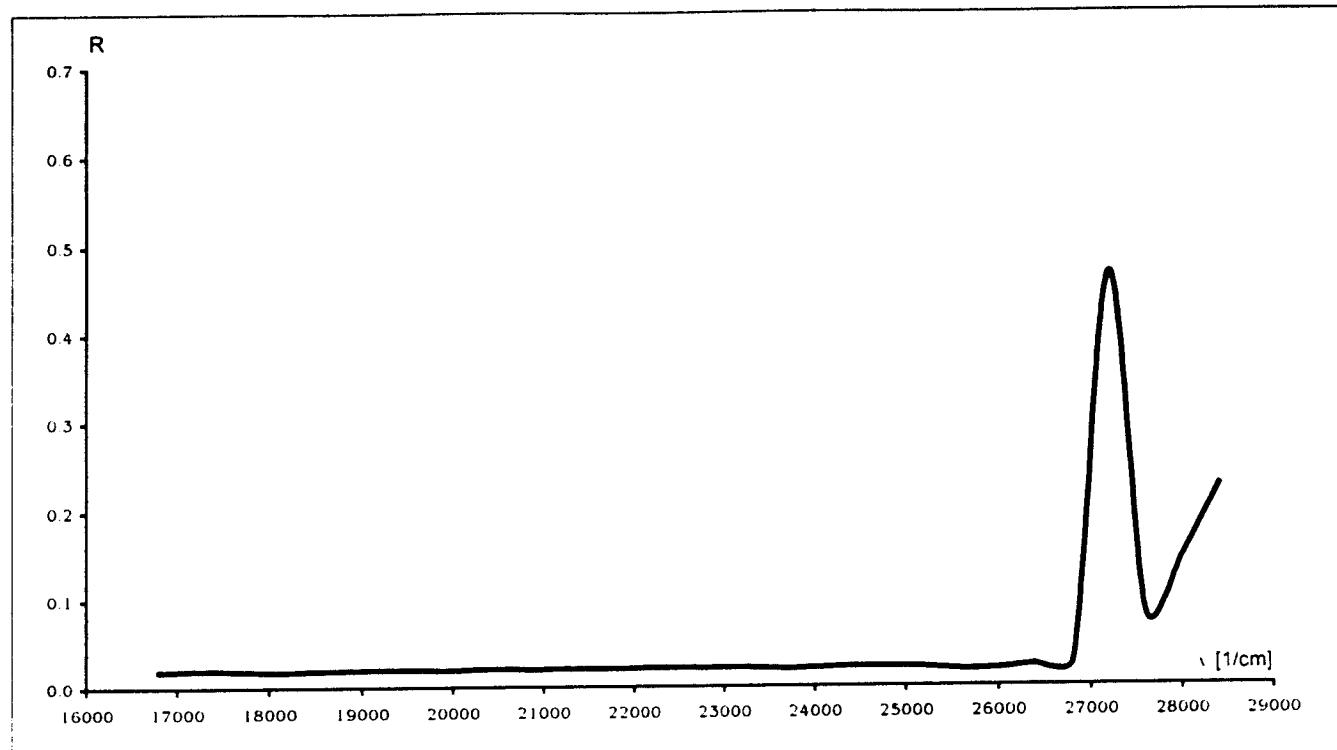
Metod refleksione spektroskopije koristi se za određivanje talasne dužine maksimuma reflektovanog zračenja na osnovu čega je moguće odrediti korak holesteričke zavojnice. Spektri su snimljeni za slučaj zračenih i nezračenih uzoraka u cilju provere uticaja jonizujućeg zračenja na korak holesteričke spirale.

Difuzni refleksioni spektri svih uzoraka snimljeni su pomoću monohromatora »Spiegelmonochromator SPM-2«, VEB (Carl Zeiss-Jena) sa kvarcnom optikom i refleksionom čelijom R-45/0, na sobnoj temperaturi, u intervalu  $16.8 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$  sa korakom od  $400 \text{ cm}^{-1}$ .

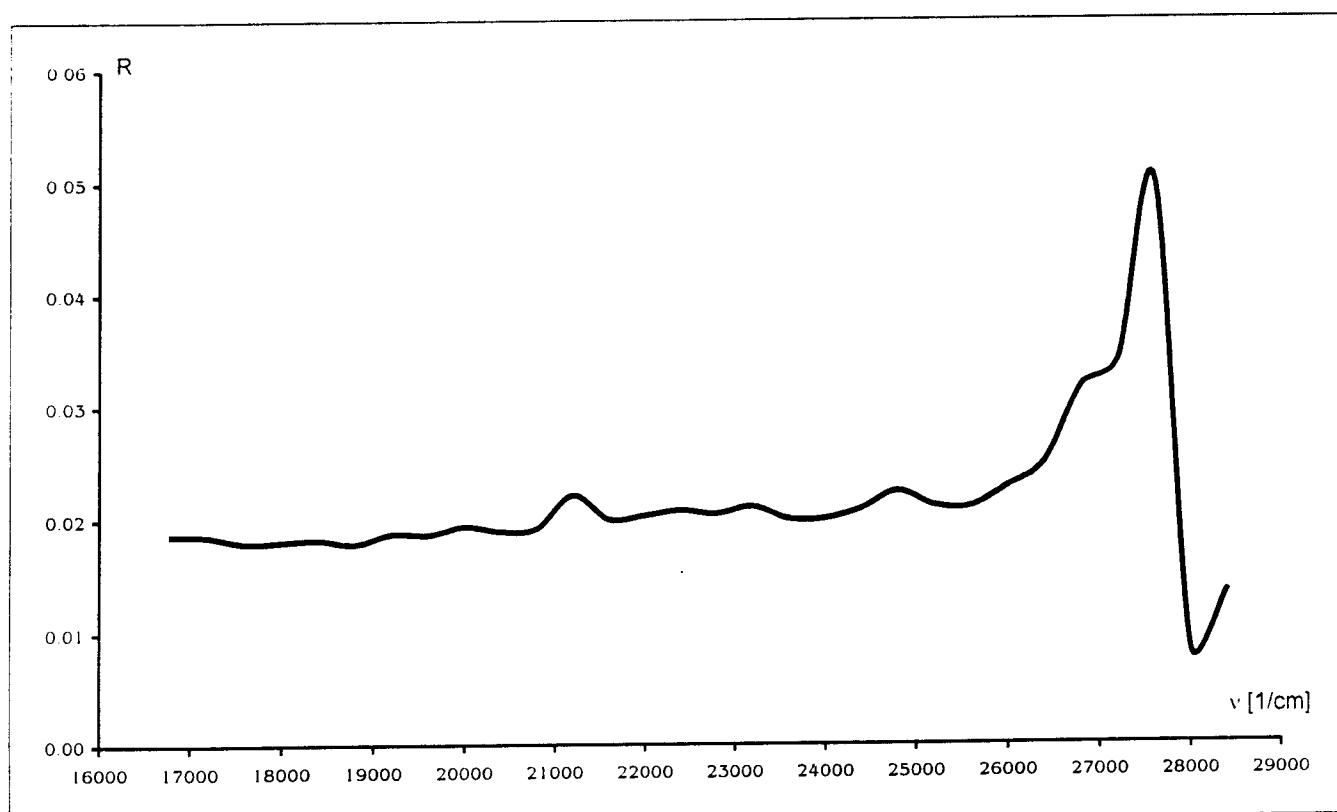
Kao belo telo korišćen je MgO. Kao izvor svetlosti u vidljivom delu spektra korišćena je sijalica sa volframovim vlaknom, a za spektre u UV oblasti živina lampa.



Sl. 4.1. Refleksioni spektar dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) u neozračenom stanju  
[ $\lambda_{max}=373,16 \text{ nm}$ ;  $n=1,687$ ;  $P=221,18 \text{ nm}$ ]



Sl. 4.2. Refleksioni spektar dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) ozračene 30 minuta  
 $[\lambda_{\max}=367,65 \text{ nm}; n=1,683; P=218,15 \text{ nm}]$

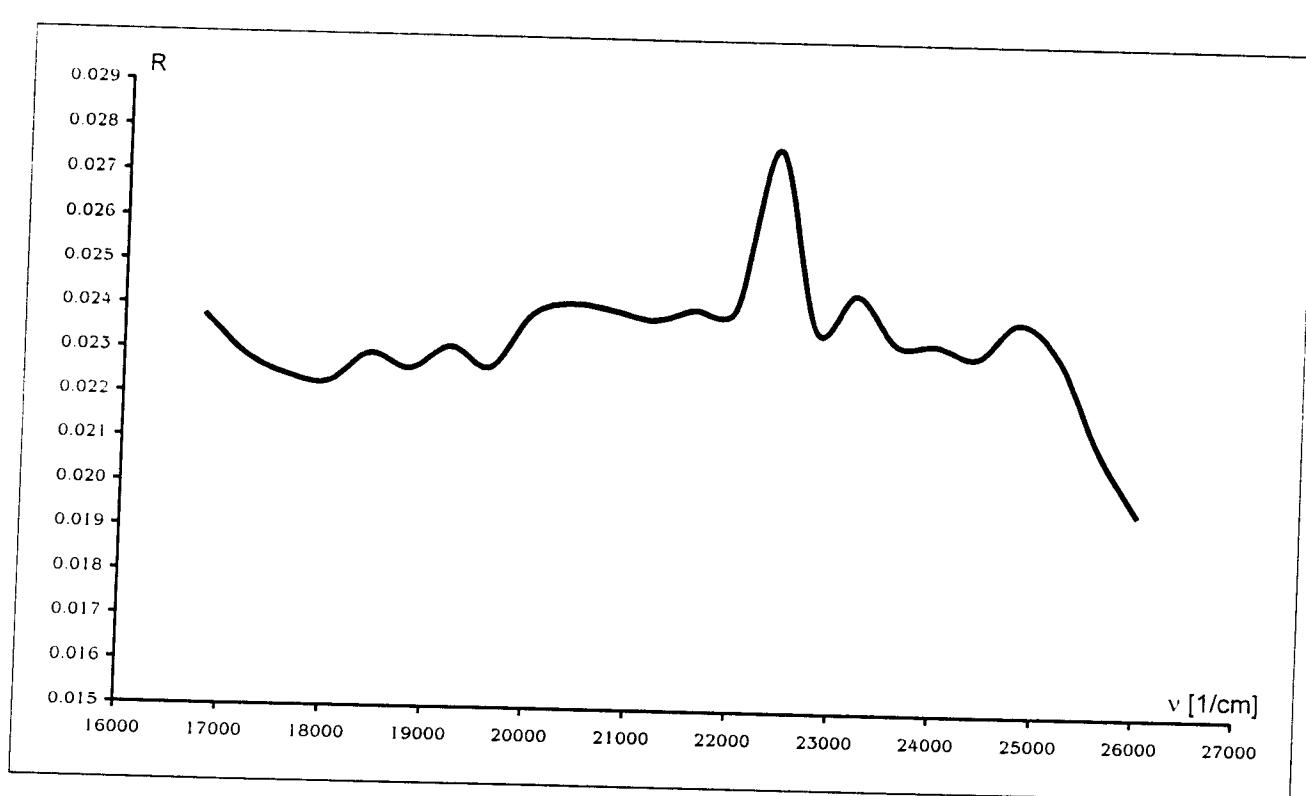


Sl. 4.3. Refleksioni spektar dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) ozračene 60 minuta  
 $[\lambda_{\max}=362,32 \text{ nm}; n=1,681; P=215,10]$

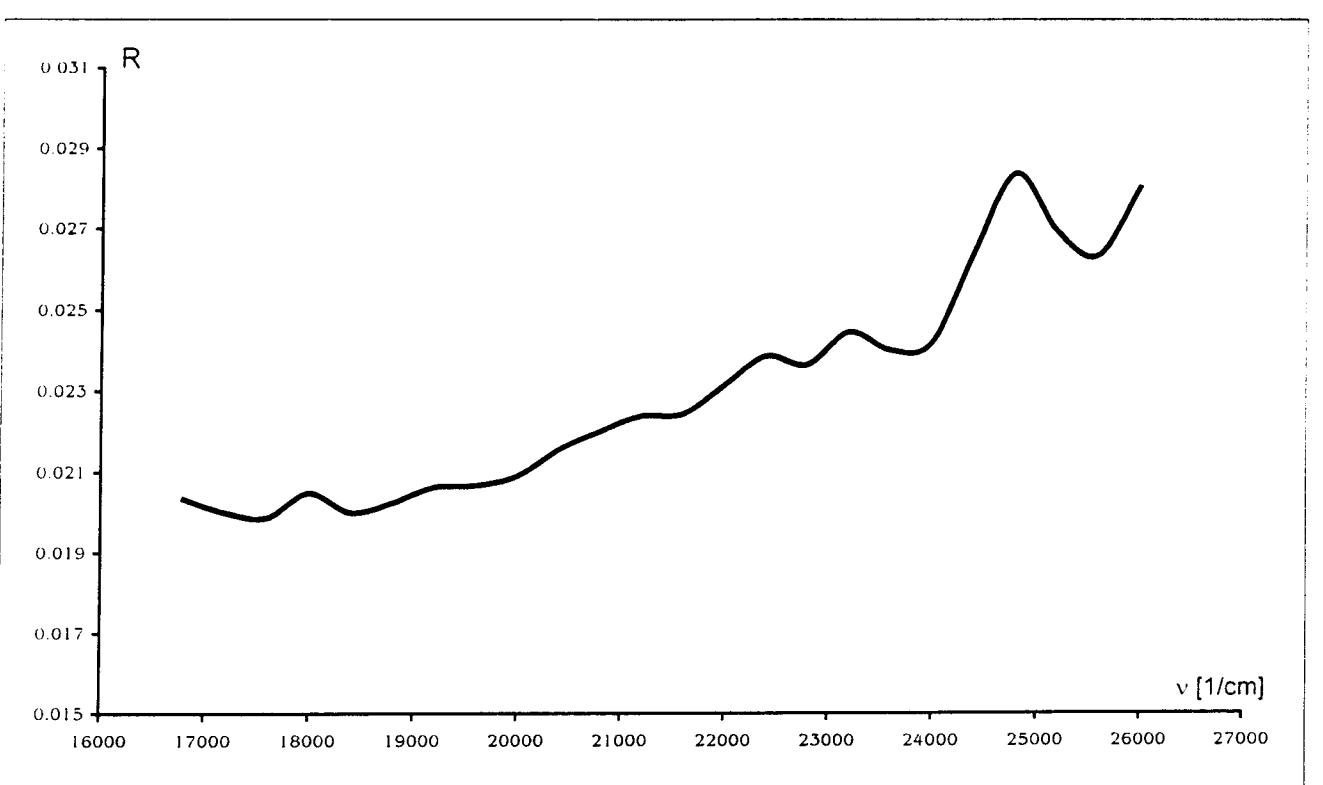
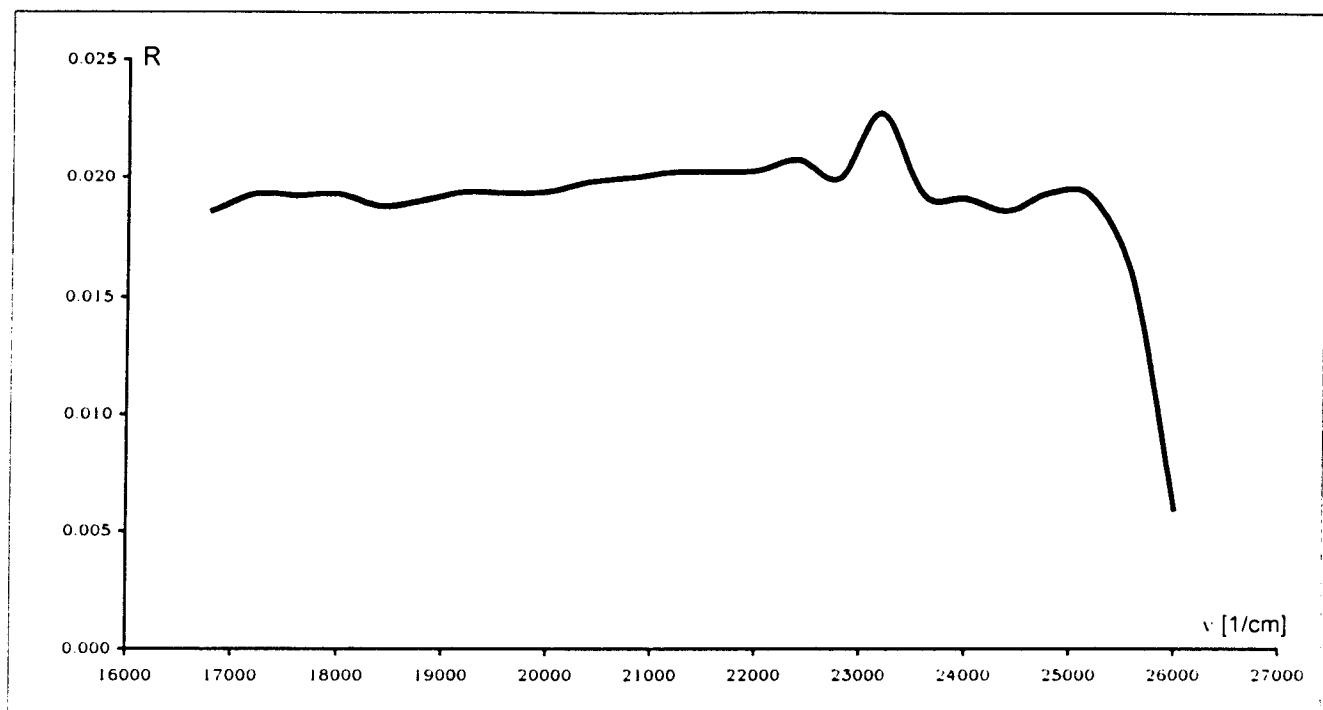


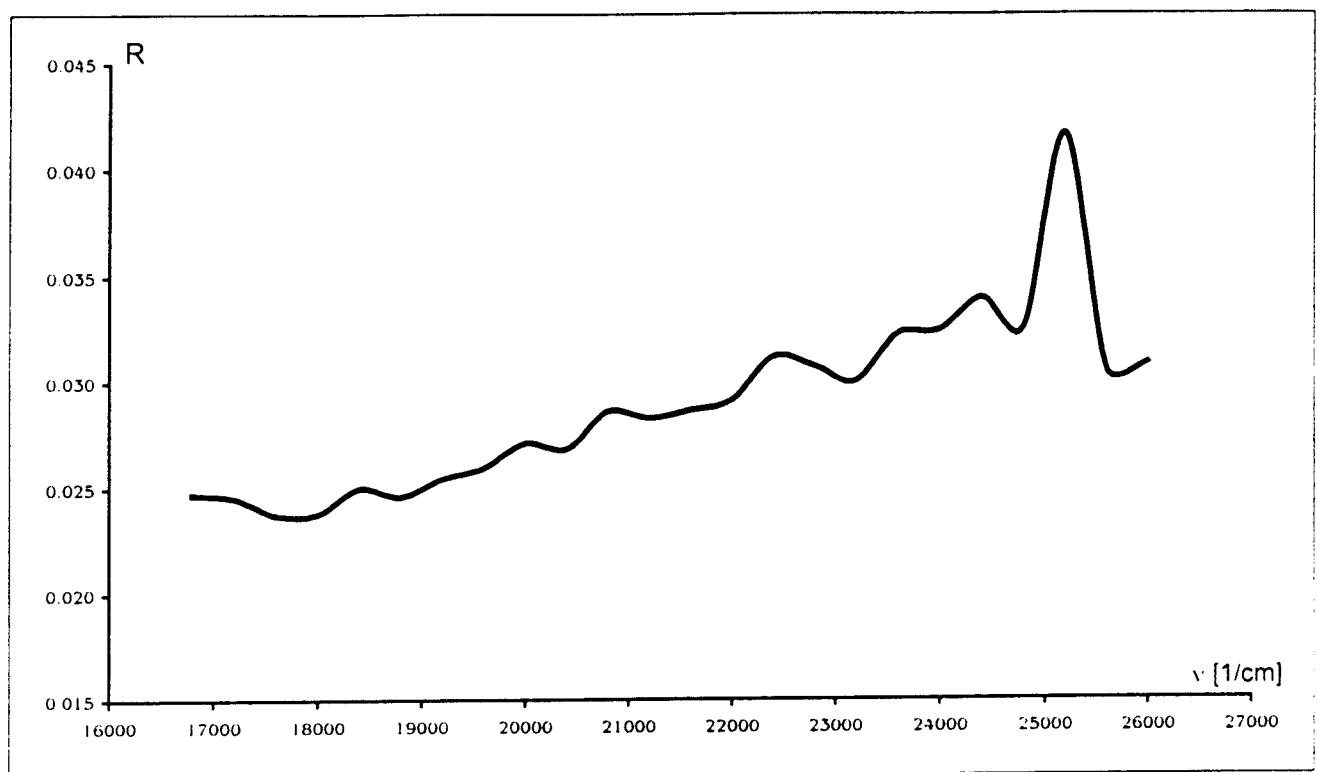
Sl. 4.4. Refleksioni spektar trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%),  
holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%)  
u neozračenom stanju

$[\lambda_{max}=471,70 \text{ nm}; n=1,689; P=279,28 \text{ nm}]$

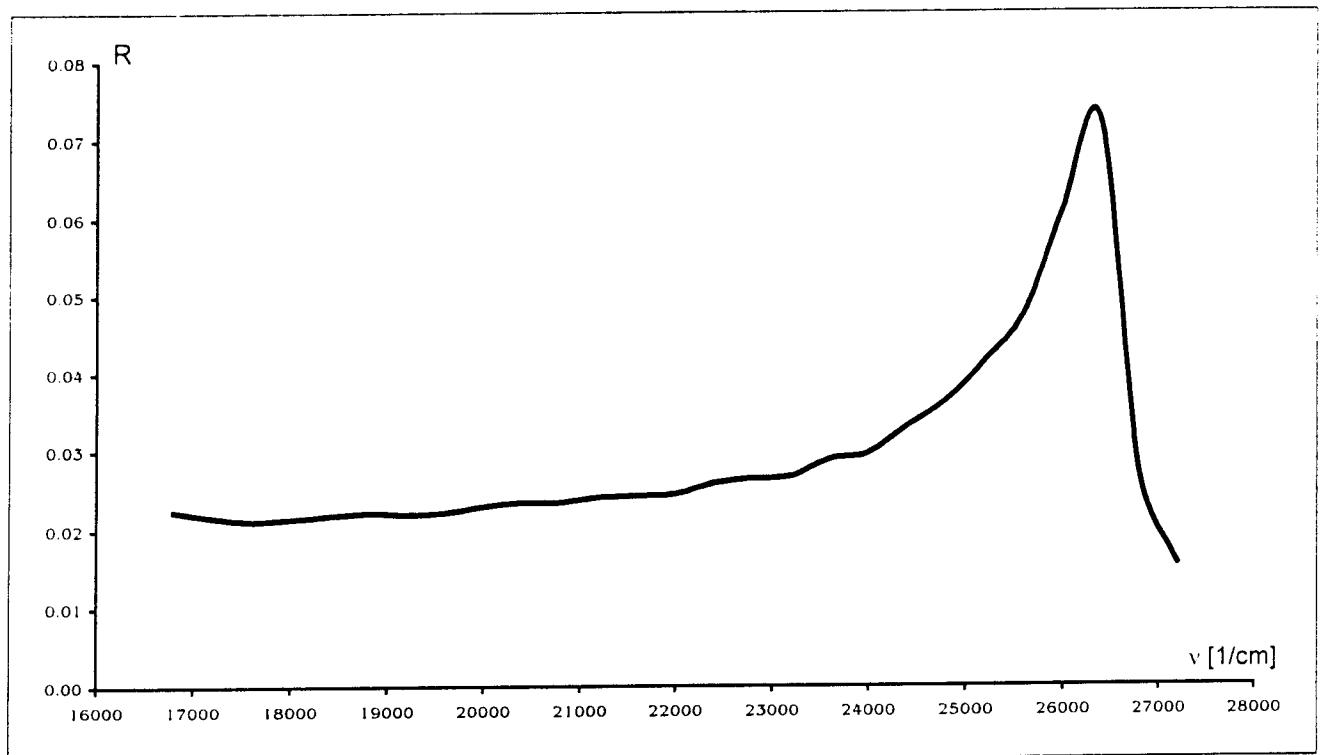


Sl. 4.5. Refleksioni spektar trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%),  
holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) zračene 30 minuta  
 $[\lambda_{max}=446,43 \text{ nm}; n=1,685; P=264,91 \text{ nm}]$





Sl. 4.8. Refleksioni spektar trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril formijata (20%) zračene 30 minuta  
 $[\lambda_{max}=396.81 \text{ nm}; n=1,687; P=235,21 \text{ nm}]$



Sl. 4.9. Refleksioni spektar trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril formijata (20%) zračene 60 minuta  
 $[\lambda_{max}=378,80 \text{ nm}; n=1,685; P=224,79 \text{ nm}]$

## 5. METODA DIFRAKCIJE X-ZRAKA

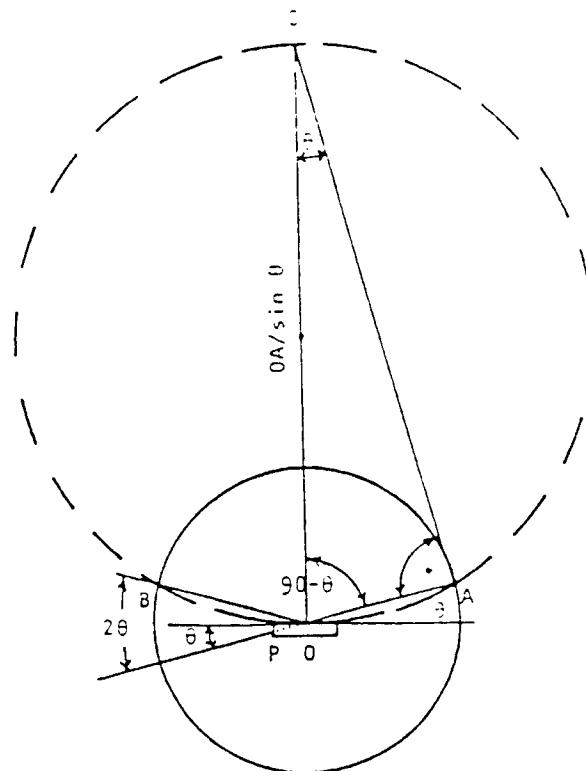
Metoda difracije x-zraka na kristalnom prahu neorijentisanih uzoraka koristi se za dobijanje informacija o strukturi ispitivanih smeša holesteričkih tečnih kristala. Na bazi uglovnih položaja difrakcionih maksimuma 20 dobijenih analizom difraktograma snimanih u oblasti  $2\theta=2^\circ-25^\circ$  moguće je odrediti molekulske parametre d i D ispitivanih uzoraka, kao i njihovu temperaturnu zavisnost.

Difraktogrami neorijentisanih uzoraka snimljeni su pomoću difraktometra PHILIPS PW 1373, na koji je montiran grejač uzorka.

Intenzitet difracije monohromatskog x-zraka meri se određivanjem broja difraktovanih kvanata x-zraka. Strujni impulsi su proporcionalni intenzitetu x-zraka.

Geometrija difraktometra je sledeća: divergentan snop karakterističnog zračenja generisanog pomoću rentgenske cevi prolazi kroz ulazni otvor i pada na uzorak. Difraktovani snop ulazi kroz otvor koji je postavljen ispred brojača, potom u brojač (proporcionalni ili Gajgerov (Geiger)) [8].

Najčešća postavka uredaja je takva da se detektorski krug skeniranja nalazi u vertikalnoj ravni.



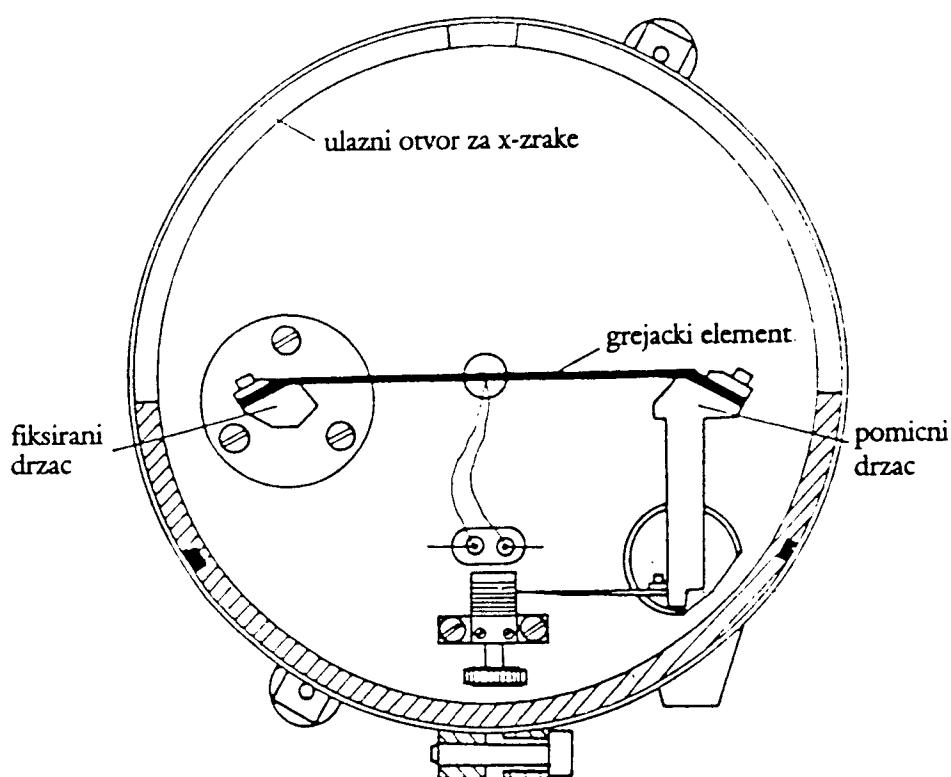
Sl. 5.1. Geometrija difraktometra

U tački A nalazi se linijski fokus rentgenske cevi, a normalno na ravan crteža kroz tačku O prolazi zajednička osa obrtanja uzorka i brojača.

Tako je rastojanje AO, odnosno OB poluprečnik detektorskog kruga skeniranja. Tačka O je centar ispitivanog uzorka.

S obzirom da se po Bragovoj teoriji difrakcija može tumačiti kao refleksija x-zraka sa određenih kristalnih ravni, da bi detektovali x-zrake reflektovane sa ravni u uglovnom položaju  $\theta$ , detektor mora biti u položaju  $2\theta$ . Zato je neophodno da se prilikom skeniranja obezbedi sinhronizacija pri kojoj obrtanje uzorka prati brojač koji se kreće dvostruko većom uglovnom brzinom.

Uobičajeno je da uzorak bude u praškastoј formi. Priprema se vrši tako što se napravi suspenzija ispitivanog materijala u »Zapon-laku« koji se razblažuje acetonom. Ovaj gotov uzorak se nanese u tankom sloju direktno na grejač u komori, tako da se centar uzorka poklapa sa osom obrtanja uzorka i brojača.



Sl. 5.2. Komora difraktometra

Element za grejanje, koji je istovremeno i nosač uzorka, je platinska traka dimenzije  $132 \times 9 \times 1$  mm, a u njenom centru se nalazi Pt-10%RhPt termopar dijametra 0,35 mm i dužine 90 mm.

Režim zagrevanja i stalnost dostignute temperature obezbeđujemo pomoću uređaja za kontrolu grejanja HTK firme »Anton PAAR« u temperaturnom intervalu od sobne do  $1600^{\circ}\text{C}$  sa tipičnom greškom od  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$  i maksimalnom  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$ .

Komora adaptera se permanentno hlađi vodom, što štiti uređaj od oštećenja i obezbeđuje programirano hlađenje uzorka.

Uslovi rada:

- vrsta x-zračenja : Cu Ka ( $\lambda=0.1542 \text{ nm}$ )
- vrsta filtra : nikal
- napon :  $V=30 \text{ kV}$
- jačina struje :  $I=30 \text{ mA}$
- početni ugao :  $2\theta=2^\circ$

U sledećim tabelama dati su podaci o uglovima, izračunata odgovarajuća međuravanska rastojanja i molekulski parametri tečnih kristala sa greškama na osnovu Bragove (Bragg) formule:

$$n\lambda = 2x \sin \theta$$

Izračunati su parametri tečnih kristala:

$x=d$  međuravansko rastojanje računato na bazi podataka uglovnih položaja difrakcionih maksimuma  $2\theta$  za male uglove (do  $5^\circ$ )

$x=D$  srednje lateralno rastojanje između paralelnih dugih osa molekula računato na bazi podataka  $2\theta$  za sredinu širokog difuznog pika u intervalu od  $14-20^\circ$

Greške merenja su računate kao:

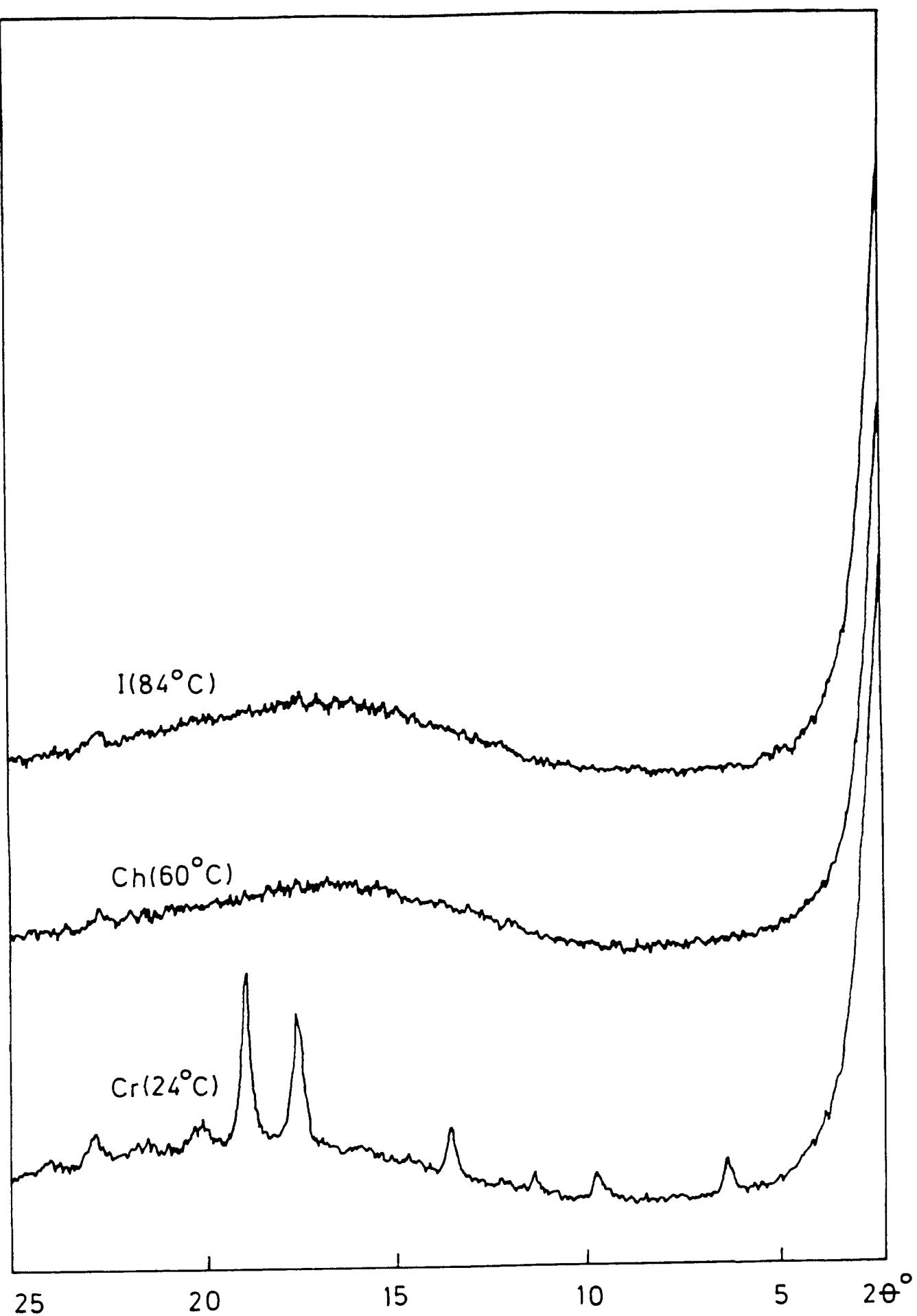
$$\Delta d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta} \cdot \Delta \theta \cdot \frac{\pi}{180^\circ}, \quad \Delta \theta = 5 \cdot 10^{-2} (\text{°})$$

FAZA	$t(\text{°C})$	$2\Theta(\text{°})$	$d(\text{\AA})$	$\delta_d(\text{\AA})$	$D(\text{\AA})$	$\delta_D(\text{\AA})$
I	84	16.8	-	-	5.271	0.003
Ch	60	3.7 17.0	23.85 -	0.06 -	5.209	0.003

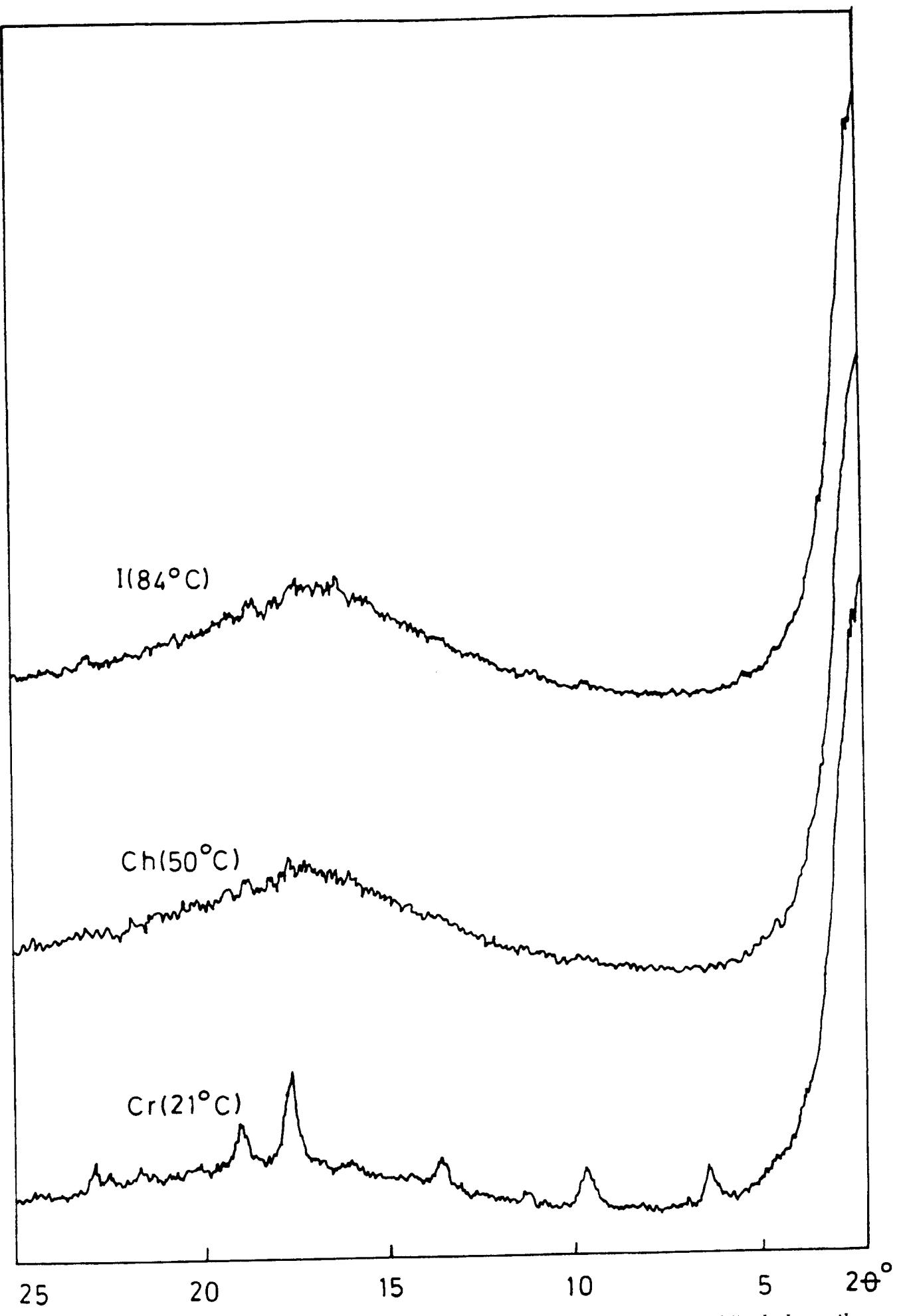
Tabela 1. Molekulski parametri dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) u neozračenom stanju

FAZA	$t(\text{°C})$	$2\Theta(\text{°})$	$d(\text{\AA})$	$\delta_d(\text{\AA})$	$D(\text{\AA})$	$\delta_D(\text{\AA})$
I	84	16,9	-	-	5.240	0,003
Ch	50	17,2	-	-	5.149	0,003

Tabela 2. Molekulski parametri dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) zračene 60 minuta



Sl. 5.3. Difraktogram dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) u neozračenom stanju



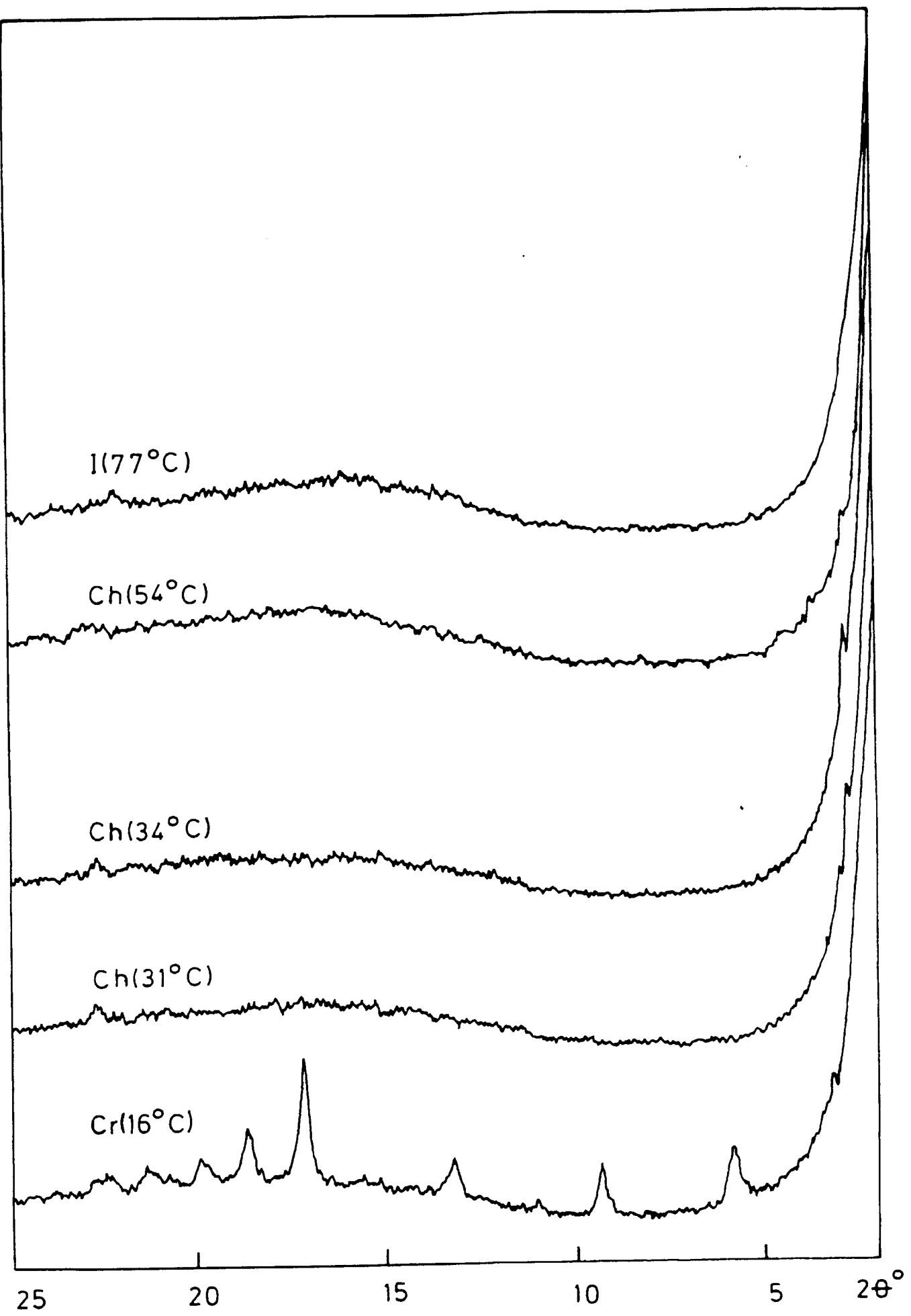
Sl. 5.4. Difraktogram dvokomponentne smeše holesteril oleil-karbonata (50%) i holesteril kapronata (50%) zračene 60 minuta

FAZA	t(°C)	2Θ(°)	d(Å)	δ <sub>d</sub> (Å)	D(Å)	δ <sub>D</sub> (Å)
I	77	16,2	-	-	5,464	0,003
Ch	54	2,7	32,68	0,09	-	-
		3,5	25,21	0,07	-	-
		17,0	-	-	5,209	0,003
Ch	34/35	2,85	30,96	0,11	-	-
		18,0	-	-	4,922	0,003
Ch	31/32	2,75	32,089	0,11	-	-
		17,5	-	-	5,062	0,003

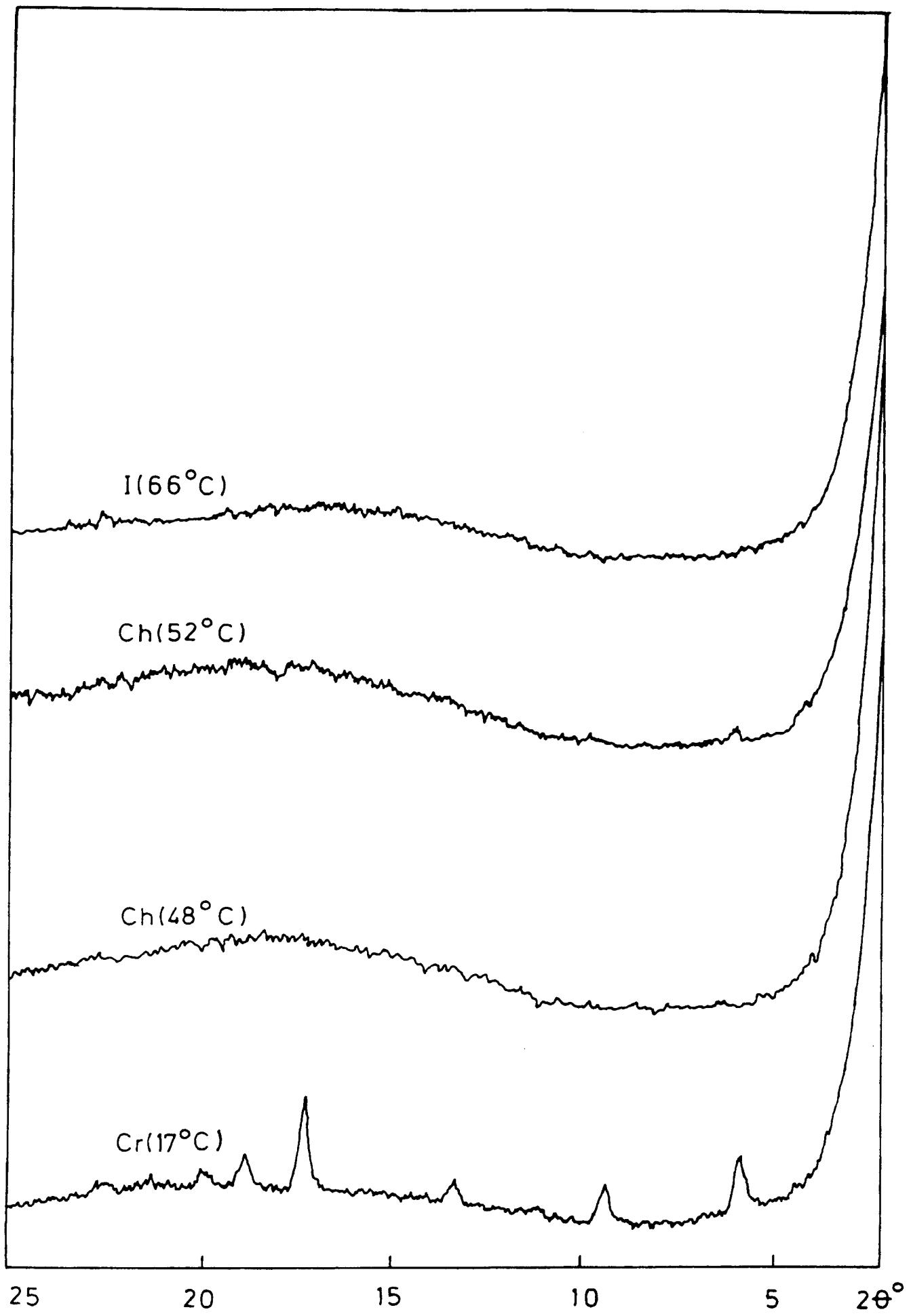
Tabela 3. Molekulski parametri trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u neozračenom stanju

FAZA	t(°C)	2Θ(°)	d(Å)	δ <sub>d</sub> (Å)	D(Å)	δ <sub>D</sub> (Å)
I	66	17,0	-	-	5,209	0,003
Ch	52	3,9	22,63	0,06	-	-
		18,0	-	-	4,922	0,003
Ch	48/49	3,8	23,22	0,06	-	-
		18,2	-	-	4,869	0,003

Tabela 4. Molekulski parametri trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) zračene 60 minuta



Sl. 5.5. Difraktogram trokomponentne smješi holesteril nonanoata (70%), holesteril oleilkarbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) u neozračenom stanju



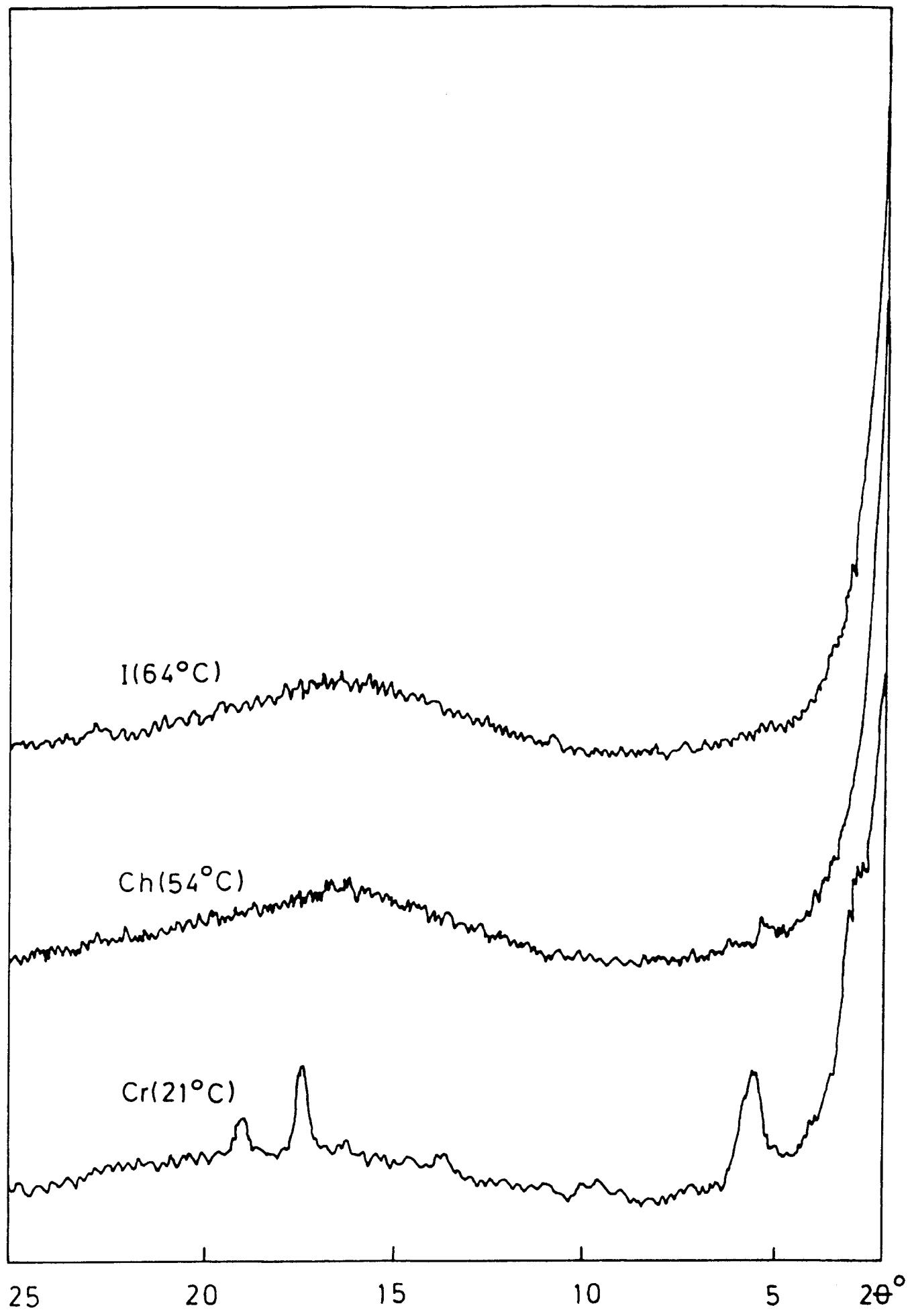
Sl. 5.6. Difraktogram trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleilkarbonata (10%) i holesteril kapronata (20%) zračene 60 minuta

FAZA	t(°C)	2Θ(°)	d(Å)	δ <sub>d</sub> (Å)	D(Å)	δ <sub>D</sub> (Å)
I	64	16,1	-	-	5.499	0,003
Ch	54	3,9 16,5	22,63 -	0,06 -	- 5.366	- 0,003

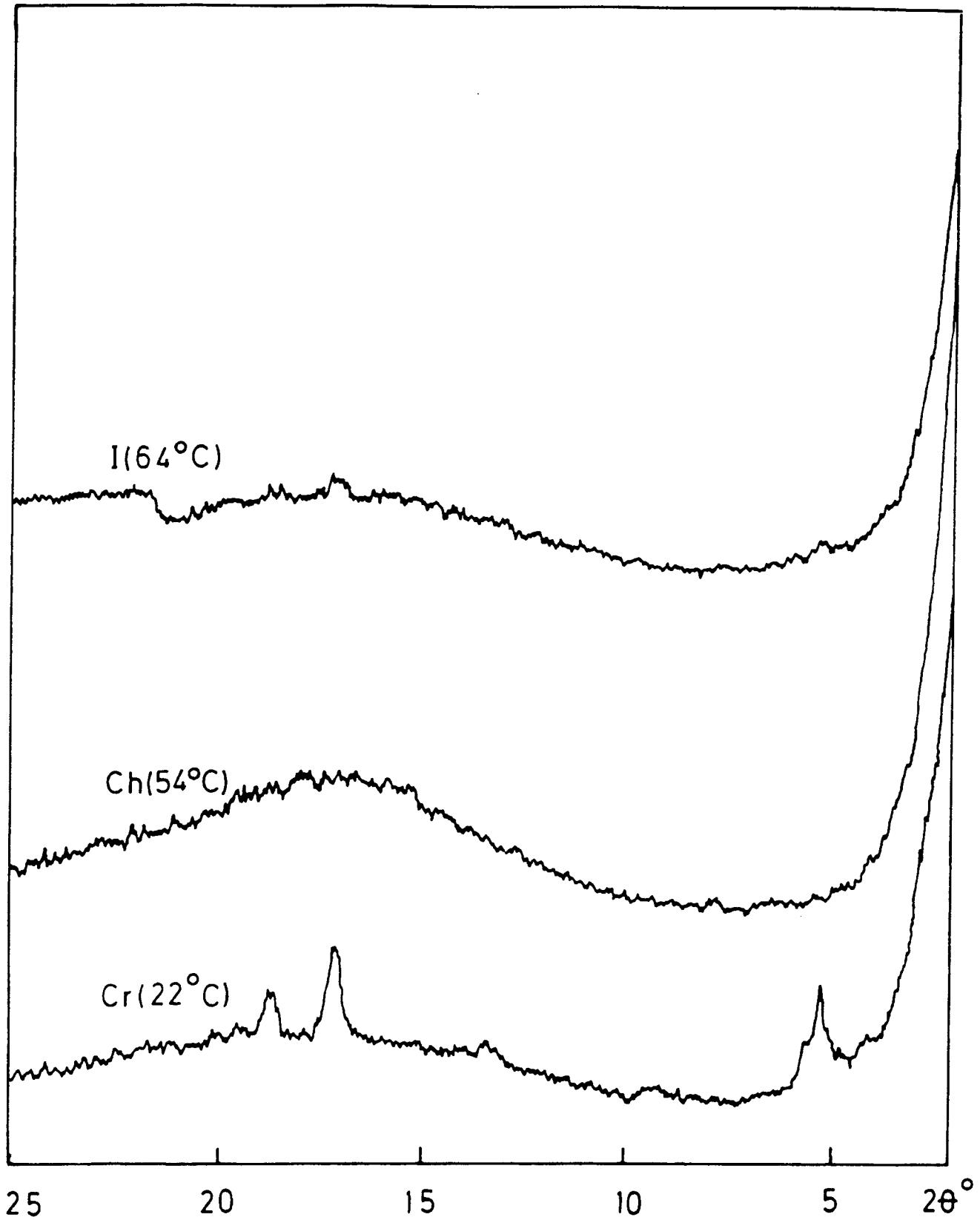
Tabela 5. Molekulski parametri trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesterol oleil-karbonata (10%) i holesteril formijata (20%) u neozračenom stanju

FAZA	t(°C)	2Θ(°)	d(Å)	δ <sub>d</sub> (Å)	D(Å)	δ <sub>D</sub> (Å)
I	64	17,2	-	-	5.149	0,003
Ch	54	4,05 17,5	21,79 -	0,05 -	- 5.062	- 0,003

Tabela 6. Molekulski parametri trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesterol oleil-karbonata (10%) i holesteril formijata (20%) zračene 60 minuta



Sl. 5.7. Difraktogram trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleil-karbonata (10%) i holesteril formijata (20%) u neozračenom stanju



Sl. 5.8. Difraktogram trokomponentne smeše holesteril nonanoata (70%), holesteril oleilkarbonata (10%) i holesteril formijata (20%) zračene 60 minuta

## 6. ZAKLJUČAK

Istraživanje fizičko-hemijskih osobina tečnih kristala je trenutno u samom vrhu interesovanja naučnika širom sveta. Ova problematika ima multidisciplinarni karakter, s obzirom da estri holesterola ulaze u sastav ćelija, tkiva i telesnih tečnosti organizama živih bića.

U ovom radu odredene su fizičke karakteristike smeša holesteričkih tečnih kristala u sledećim procentualnim odnosima:

- 1) holesteril oleil-karbonat (50%) + holesteril kapronat (50%).
- 2) holesteril nonanoat (70%) + holesteril oleil-karbonat (10%) + holesteril kapronat (20%).
- 3) holesteril nonanoat (70%) + holesteril oleil-karbonat (10%) + holesteril formijat (20%).

Metode koje smo koristili prilikom ispitivanja su:

- polarizaciona mikroskopija.
- difrakcija x-zraka.
- merenje indeksa prelamanja.
- refleksiona spektroskopija.

Osim neozračenih smeša ispitivane su i smeše izložene uticaju x-zračenja u vremenskom intervalu od 30 i 60 minuta. Apsorbovane doze zračenja za ova vremena su respektivno 1.25 Gy i 2.5 Gy. Ove doze zračenja nisu smrtonosne za organizme, ali izazivaju štetne biološke efekte, te se ovakve analize uticaja jonizujućeg zračenja na fazne prelaze holesterika mogu, osim na detekciju jonizujućeg zračenja, primeniti i na izučavanje efekata jonizujućeg zračenja na živim organizmima.

Utvrđeno je da, ako se uzorci smeša izlože dejstvu x-zračenja u periodu od 30 do 60 minuta dolazi do pomeranja temperatura obrazovanja odgovarajućih boja holesteričke mezofaze ka nižim temperaturama, što možemo koristiti pri detekciji apsorbovane doze ionizujućeg zračenja. Primenom metoda refleksione spektroskopije utvrđeno je da se maksimumi reflektovane svetlosti na sobnoj temperaturi pomeraju kod ozračenih uzoraka ka kraćim talasnim dužinama. Ovo ukazuje i na mogućnost korišćenja refleksione spektroskopije za detekciju apsorbovane doze ionizujućeg zračenja. Merenjem indeksa prelamanja na konstantnoj temperaturi zaključili smo da njegova vrednost opada kod ozračenih uzoraka. Na bazi podataka o vrednosti maksimalno reflektovane svetlosti i srednje vrednosti indeksa prelamanja izmerenih Abeovim refraktometrom, određena je vrednost koraka holesteričke spirale P. Utvrđeno je da korak holesteričke zavojnice P opada sa apsorbovanom dozom ionizovanog zračenja što je uslovilo pomeranje maksimuma reflektovane svetlosti ka kraćim talasnim dužinama.

Na osnovu podataka difrakcije x-zraka na kristalnom prahu neorjentisanih uzoraka zaključeno je da u slučaju neozračenih smeša sa porastom temperature dolazi do povećanja srednjeg lateralnog rastojanja D između paralelnih dugih osa molekula, a međuravansko rastojanje d se smanjuje sa

porastom temperature. Sve otkrivenе promene koje izaziva x-zračenje na holesteričkoj mezofazi ovih smeša su ireverzibilne.

Zaključili smo da se uzorci mogu koristiti kao ekološki indikatori apsorbovane doze ionizujućeg zračenja. Takođe, mogu se razjasniti neki procesi koji dovode do mutacije ćelija živih organizama pod uticajem primljene doze ionizujućeg zračenja, jer se ove promene dovode u vezu sa faznim prelazima u tečno-kristalnim supstituentima ćelije.

## 7. REFERENCE

- [1] F. Reinitzer / Monats 9 (1888), 421
- [2] O. Lehman / Ann Physik 27 (1908), 213
- [3] F. G. Frank / Disc. Faraday Soc. 25 (1958), 19
- [4] P. G. de Gennes / Solid State Comm. 6 (1968), 163
- [5] G. H. Heilmeier / Mol. Cryst. Liq. Cryst. 8 (1969), 293
- [6] D. Ž. Obadović, M. Stančić, T. T. Katona / Tečni kristali i primena, Novi Sad, 1999.
- [7] L. Bata / Folyadék kristályok, Müszaki Könyvkiadó, Budapest (1986)
- [8] T. Katona / Diplomski rad: Ispitivanje fizičkih osobina trokomponentnih smeša nekih holesteričkih tečnih kristala, 1990., 5,51
- [9] L. S. Orstein and W. Kast / Trans. Faraday Soc. 29 (1934) 931
- [10] G. Friedel / Annals. Phys. 18.273 (1922)
- [11] J. Friedel / Dislocation, Pergamon, Press, Oxford (1964)
- [12] D. Coates, G. W. Gray / Physic. Letters 45 A (1973), 115
- [13] G. Friedel, G. Grandjean / Bull. Soc. Franc. Mineralog, 33, 192, 409 (1910)
- [14] P.E. Cladis, S. Torza / J. Appl Physics, 46, 584 (1975)
- [15] D. Ž. Obadović, L. Bata, K. Fodor-Csorba, A. Vajda, Toth-Katona / Rev. of Res. . 26, 47 (1996)
- [16] S. Diele, P. Brandt, H. Sachmann / Mol. Cryst. Liquid Cryst. 17 (1972), 163
- [17] R. Taylor, J. L. Fergason, S. L. Arora / Physic. Rev. Letters 24, 359 (1970)
- [18] H. Arnold, D. Demus, H. Z. Sackmann / Physic. Chem. 222,15 (1963)
- [19] H. Arnold, H. Z. Sackmann / Electrochem. 63.1171 (1959)
- [20] D. Ž. Obadović, R. Marinković Nedučin, A. Vajda / Rev. of Res. 20/21, 91 (1990/91)
- [21] S. Diele, P. Brandt, H. Sackmann / Molec. Cristals Liqui Cristals 17, 163, (1972)
- [22] G. W. Gray, P. A. Winsor / Liq. Cryst. and Plast. Cryst. vol. 2, J. Wiley and Sons Limited (1974)
- [23] P. G. de Gennes / The Physics of Liquid Crystals, Clarendon Press, Oxford (1974)
- [24] A. de Vries, / Acta Cryst, 4, 219, (1951)
- [25] F. Grandjean / C. R. Hebd. Sean. Acad. Sci. 172, 71 (1921)
- [26] D. Coates, G. W Gray / Physic. Letters 45 A, 115 (1973)
- [27] А. И Дударчик, В. А. Семин, Б. И. Горбунов / Контрол полупроводниковых приборов житкими кристаллами, Наука и техника, Минск (1973)
- [28] M. Stančić, J. Petrović / EPDIC-6, Budapest, Hungary, P. 276 (1998)
- [29] J. H. Sanquist / Amer. Chem. Soc. 40, 556 (1916)
- [30] W. Gray, P. A. Winsor / Liquid Cristals & Plastic Crystals. Vol. 1,2, John Wiley and Sons Limited (1974)
- [31] A. D. Bangham / Progres in Biophysics, Vol. 18. (1968)
- [32] G.. T. Stewart / The role of liq. cryst. in Life Processes

- [33] Danielli, J. F. / Proc. 7th Symp. Colston Res. Soc., Univ. Bristol. 1 (1954)
- [34] Small, D. M., Bourges, M. and Dervichian, D. G. / Nature, Land., 211, 816 (1966)
- [35] Stewart, G. T. / J. Path. Bact. 81, 385 (1961)
- [36] Ambrose, E. J. , / Recent Progress in Surface Science Academis Press, N.Y. and Lond. (1964), 338-358
- [37] Lawrence, A. S. C. / Trans. Faraday Soc. 29, 1008
- [38] Liquid Crystals, Academic Press, London and New York. (1962)
- [39] M. Staničić / Magistarski rad, Novi Sad (1997) 7, 36
- [40] Dr. Milan Jovanović / Kako da se zaštитимо od radiaktivnog zračenja. Medicinska knjiga, Beograd-Zagreb, (1986)
- [41] Ljiljana Čonkić / Doktorska disertacija, Novi Sad (1992)
- [42] Dr Milan M. Jovanović / Nuklearna dejstva i čovek, Vojno-izdavački i novinski centar Beograd, (1986)
- [43] Carroll, P. / Chol. Liq. Cry. Their / Technology and Appl. Ovum Ltd. London (1973)
- [44] Klein, E. J. / Astronautics and Aeronautics July 1968, 70
- [45] Woodman See. W.E. / Materials Evaluation, October 1966, 564
- [46] Willey, D. G. and Martire, D. E. / Molec. Cryst. Liq. Cryst. 18, 55 (1972)
- [47] Fergason, I. L. . Goldberg, N. N. / British Patent, 1, 153, 959, (1969)
- [48] Mc Milan W. L. / Phys. Rev. A6, 936 (1972)
- [49] Davis G. J. , at. al. / Mol. Cryst. Liquid Cryst. 10, 1 (1970)
- [50] D. Petrović S. Lukić i S. Carić / Fiz. čvrst. stanja – eksperimentalne vežbe. Naučna knjiga. Beograd, (1990).

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- Redni broj: RBR
- Identifikacioni broj: IBR
- Tip dokumentacije: *Monografska dokumentacija*; TD
- Tip zapisa: *Tekstualni štampani materijal*; TZ
- Vrsta rada: *Diplomski rad*, VR
- Autor: *Mrazovac Sanja, br. dos. 530/95*; AU
- Mentor: *Dr Dušanka Ž. Obadović, red. prof. PMF Novi Sad*; MN
- Naslov rada: *Fizičke karakteristike smeša nekih holesteričkih tečnih kristala*
- Jezik publikacije: *Srpski (latinica)*; JP
- Jezik izvoda: *Srpski*; JI
- Zemlja publikovanja: *Jugoslavija*; ZP
- Uže geografsko područje: *Vojvodina*; UGV
- Godina: *2001*; GO
- Izdavač: *Autorski reprint*; IZ
- Mesto i adresa: *Prirodno-matematički fakultet,  
Trg Dositeja Obradovića 4., 21000 Novi Sad*; MA
- Fizički opis rada: *(12/75/50/6/26/15/0) ; FO*
- Naučna oblast: *Fizika*; NO
- Naučna disciplina: *Fizika čvrstog stanja*; ND
- Predmetna odrednica / ključne reči:
  - *holesterički tečni kristal*
  - *jonizujuće zračenje*
  - *refleksioni spektiri*
  - *molekulske parametri*

PO

- Čuva se: *Biblioteka Instituta za fiziku, PMF Novi sad*
- Izvod: *U radu je izvršeno ispitivanje optičkih i strukturnih svojstava holesteričkih tečno-kristalnih supstancija. Ispitivanja su vršena metodama polarizacione mikroskopije, merenjem indeksa prelamanja, snimanjem refleksionih spektara, i difrakcije x-zraka na kristalnom prahu neorjentisanih uzoraka. Utvrđeni su fazni dijagrami. Određeni su tečno-kristalni molekulski parametri: d – međuravansko rastojanje i D – srednje lateralno rastojanje između paralelnih dugih osa molekula.*

IZ

- Datum prihvatanja teme od strane Veća: *10.05.2001.* ; DP
- Datum odbrane:  ; DO
- Članovi komisije:

*Predsednik: Dr Dragoslav Petrović, redovni profesor PMF Novi Sad*

*Članovi: Dr Dušan Lazar, docent PMF Novi Sad*

*Dr Dušanka Ž. Obadović, redovni profesor PMF Novi Sad*

KO

