

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko
Oddelek za fiziko

TEKOČEKRISTALNI ELASTOMERI

seminar

Tadeja Polach

Mentor: dr. Primož Ziherl

Ljubljana, 22. 5. 2008

Kazalo

1	UVOD	2
2	TEKOČI KRISTALI	2
3	TEKOČEKRISTALNI POLIMERI	3
4	ELASTOMERI	5
5	TEKOČEKRISTALNI ELASTOMERI	7
6	ZAKLJUČEK	18
7	LITERATURA	19

1 UVOD

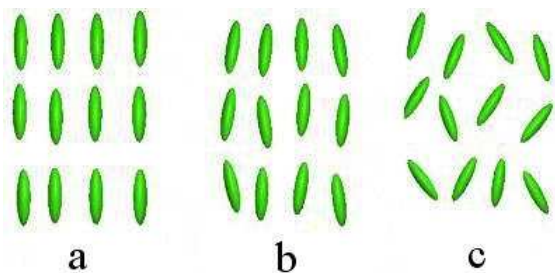
Tekočerkristalni elastomeri nastanejo, ko se medseboj povežejo verige tekočerkristalnih polimerov. Ustvari se elastomer z enako simetrijo kot jo imajo posamezne verige pri dani temperaturi- nematsko, smektično in kiralno nematsko. Snov zadrži tudi lastnosti elastomera. Tako najdemo v eni snovi

1. orientacijski red,
2. odzivno molekularno obliko in
3. topološko omejeno obliko.

To ustvari veliko novih fizikalnih lastnosti. Pri navadnih tekočih kristalih spremembe povprečne molekularne oblike, ki jih povzročijo spremembe v orientacijskem redu, ne spremenijo bistveno materiala. Posebne lastnosti tekočerkristalnih elastomerov izhajajo iz njihove zmožnosti, da lahko spremenijo molekularno obliko, medtem ko so v trdnem stanju. Njihove fizikalne lastnosti lahko spreminjamo s toplotnimi, svetlobnimi ali mehanskimi spremembami, zato so se izkazali uporabni kot mehanski prožilniki [1].

2 TEKOČI KRISTALI

Leta 1888 je avstrijski botanik Friedrich Reinitzer hotel ugotoviti formulo za molekularno maso holesterola. Opazil je, da ima snov holesteril benzoat dve tališči nad prvim tališčem pri temperaturi 145.5°C je snov postala tekoča in motna, nad drugim tališčem pa je motnost izginila. Vmesno fazo so kasneje poimenovali tekočerkristalna faza (slika 1) [2].

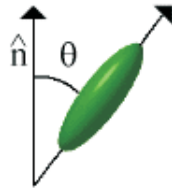


Slika 1: Trdna faza (a), tekočerkristalna faza (b), tekoča faza (c) [3].

Značilna lastnost tekočerkristalne faze je orientacijski red molekul, ki v povprečju kažejo v skupno smer — v smer direktorja \mathbf{n} . Stopnjo urejenosti snovi izrazimo s količino S :

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle, \quad (1)$$

kjer je θ povprečna vrednost kota med direktorjem in daljšo osjo molekule (slika 2) [2].



Slika 2: Naklon mezogena glede na direktor [3].

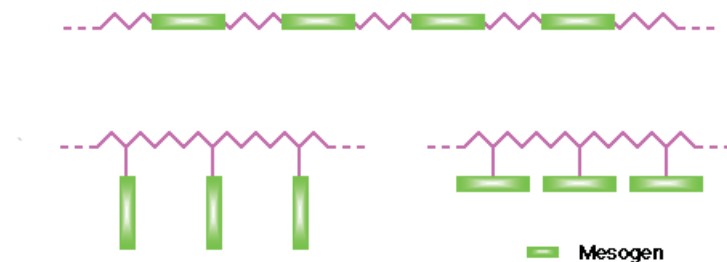
Različne razporeditve molekul ustvarjajo pozamezne mezofaze (slika 3):



Slika 3: Nematska faza (levo), smektična faza (sredina), kiralno nematska faza (desno) [4].

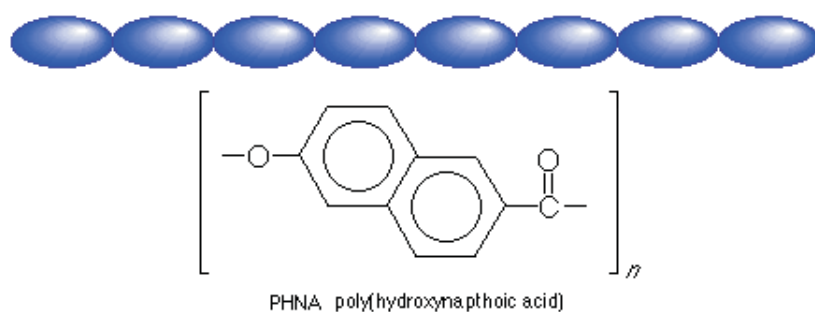
3 TEKOČEKRYSTALNI POLIMERI

Tekočerkristalni polimeri so snovi, ki združujejo lastnosti polimerovi in tekočih kristalov. To povzroči povezava mezogenov v verige. Lega mezogenov močno vpliva na vrsto tekočerkristalnega polimera. Mezogeni se lahko vežejo v glavno verigo (slika 4 zgoraj) ali pa se vežejo prečno kot stranske verige (slika 4 spodaj).



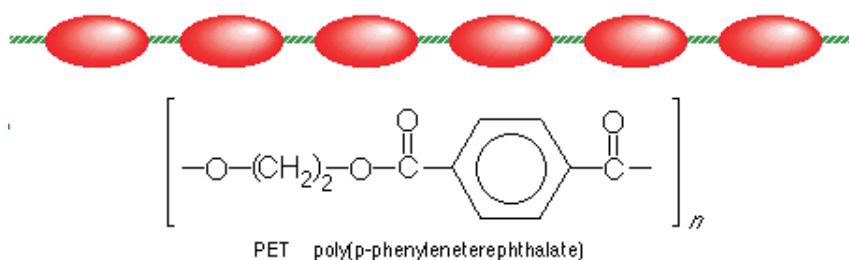
Slika 4: Mezogeni na polimerni verigi - vezani v glavno verigo (zgoraj), vezani na stransko verigo (spodaj) [3]

Togi mezogeni, vključeni v osnovno polimerno verigo, se lahko orientirajo podobno kot navadni tekoči kristali in tako se obdržijo tudi njihove lastnosti. Polimerne verige so lahko sestavljene ali iz samih aromatskih obročev — togih delov (slika 5) ali pa so togi deli v glavni verigi med seboj sklopljeni z gibljivimi vezmi.



Slika 5: Polimerna veriga iz aromatskih obročev [3]

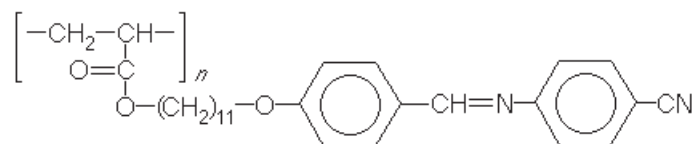
Na sliki 6 je ta vez metilen. Gibljive vezi med mezogeni omogočajo lažjo razporeditev polimerov v tekočokristalne faze [3].



Slika 6: Gibljiva polimerna veriga [3].

Polimeri z mezogeni, vezanimi v glavni verigi, imajo pogosto tekočokristalno območje nad temperaturo, pri kateri se polimeri že razkrojijo. Temperaturno

območje tekočokristalnih lastnosti je veliko širše, če so mezogeni vezani prečno kot stranske verige na glavni verigi. Pri tovrstnih polimerih je zelo pomembna tudi oblika glavne verige. Polimeri s togimi glavnimi verigami imajo visoke temperature steklastega prehoda in tako je težko opazovati tekočokristalne lastnosti snovi. Temperatura steklastega prehoda je tem nižja, čim bolj gibljiva je glavna veriga [3]. Nad temperaturo steklastega prehoda so polimeri viskozne tekočine, pod njo pa so trdni, vendar v tistem temperaturnem območju nimajo nobenega dolgosežnega molekulskega reda [5]. Mezogen je sestavljen iz dveh ali več aromatskih obročev in povezan na glavno verigo z metilensko vezjo (slika 7) Temperatura steklastega prehoda je v večini primerov odvisna od dolžine vezi t.j. od števila metilenskih grup. Snovi s kratkimi vezmi tvorijo nematske faze, tiste z daljšimi vezmi pa smektične [3].

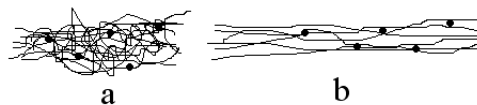


Slika 7: Gibljiva metilenska vez med togimi aromatskima obročema [3].

Trdna in stabilna struktura tekočokristalnih polimerov omogoča izdelavo industrijskih materialov, ki so zelo stabilni v skrajnih razmerah. Primer je kevlar, iz katerega izdelujejo neprebojne jopiče, nomex, ki je negorljiv, najlon, ki prenese velike obremenitve [6], gore-tex, ki je vodoodporen [7]...

4 ELASTOMERI

Elastomeri so amorfni polimeri, ki se lahko raztezajo in nato sprostijo v začetno obliko nad temperaturo steklastega prehoda, pod njo pa so trdni. Polimerne verige so med seboj povezane s kovalentnimi mostovi. V nenapetem stanju so verige naključno zvite (slika 8a) in se zravnavajo, ko elastomer raztegnemo (slika 8b).



Slika 8: Elastomerne verige nenapete (a), napete (b), Črne pike ponazarjajo kovalentne mostove

To povzroči manj naključno razporeditev verig in s tem manjšo entropijo snovi. Zaradi zmanjšanja entropije pa nastopi sila, ki vrne predmet v začetno obliko. Mehanizem elastičnosti elastomerov je odvisen samo od velikosti sile, ki se je pojavi zaradi spremembe entropije. To pokaže enostaven izračun.

Zunanja sila \mathcal{F} opravi delo, ko raztegne elastomer za dolžino dl pri konstantni temperaturi T :

$$dW = \mathcal{F}dl. \quad (2)$$

V prvi zakon termodinamike $dU = dW + TdS$ vstavimo izraz (2) in ga odvajamo po dolžini l pri konstantni temperaturi T :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_T = \mathcal{F} + T \left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_T \quad (3)$$

Iz diferenciala proste energije $F = U - TS$:

$$dF = dU - SdT - TdS = \mathcal{F}dl - SdT, \quad (4)$$

sledi

$$\mathcal{F} = \left(\frac{\partial F}{\partial l}\right)_T \quad \text{in} \quad S = - \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_l \quad (5)$$

ter

$$\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_T = - \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial T}\right)_l, \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_T = \mathcal{F} - T \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial T}\right)_l. \quad (7)$$

Meritve so pokazale, da sila, ki je potrebna, da zadržimo elastomer pri stalni napetosti, sorazmerna z absolutno temperaturo.

$$\mathcal{F} = \alpha T \quad (8)$$

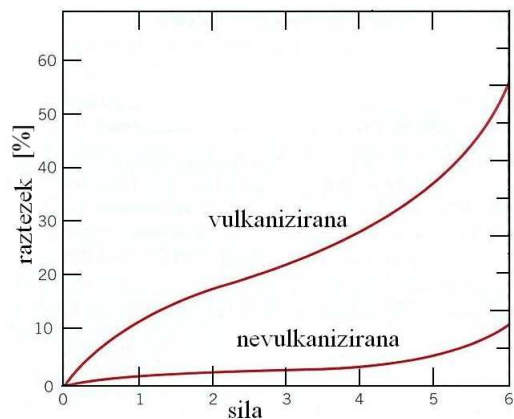
Izraz (8) vstavimo v izraz (7)

$$\left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_T = \mathcal{F} - T \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial T}\right)_l = \mathcal{F} - \alpha T = 0. \quad (9)$$

Notranja energija je pri konstantni temperaturi neodvisna od dolžine elastomera [8].

Kovalentni mostovi preprečijo gibanje verig ene mimo druge, ko je snov raztegnjena in tako zvišajo mejno napetost, pri kateri nastopi plastična deformacija. Ob ohlajanju postanejo elastomeri steklasti in delno kristalizirajo, vendar samo za nekaj odstotkov, saj je neurejenost verig ena njihovih ključnih značilnosti. Pri ohlaiditvah pod temperaturo steklastega prehoda pa postanejo drobljivi. Ob segrevanju se ne morejo utekočiniti zaradi povezav med verigami. V industriji izkoriščajo velike razteznosti elastomerov in jih tudi ojačajo z vulkanizacijo (slika 9). Vulkanizacija je ojačanje elastičnih lastnosti elastomerov v širokem temperaturnem območju z ustvarjanjem mrežnih povezav

med verigami. Te se lahko tvorijo s perokosidi, ioniziranim sevanjem, najbolj običajno pa z žveplom ali žvepljenimi spojinami [9].



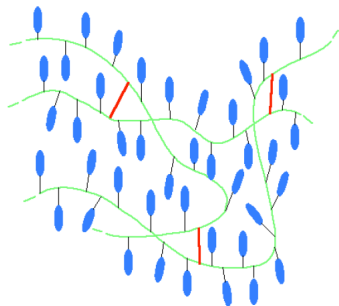
Slika 9: Primerjava med elastičnostjo vulkanizirane in nevulkanizirane gume [9]

5 TEKOČEKRISTALNI ELASTOMERI

V naslednjih odstavkih bomo opisali nekaj značilnih fizikalnih lastnosti za posameznih vrst tekočerkristalnih elastomerov.

NEMATSKI ELASTOMERI

Nematski elastomeri so elastične snovi z makroskopskimi lastnostimi nematskih tekočih kristalov (slika 10). So amorfne trdne snovi. Zanimiva značilnost nematskih elastomerov je, da mikroskopske spremembe lahko povzročijo makroskopske, kar je ravno obratno od tistega, kar je velja za običajne elastomere [1]. V naslednjih odstavkih so naštetih trije pojavi, ki nastanejo zaradi povezav med nematsko orientacijo in elastičnostjo.



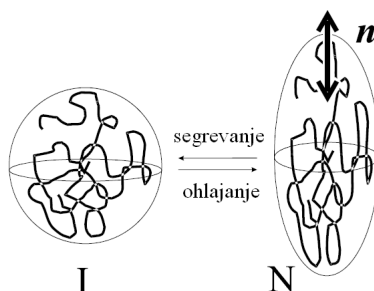
Slika 10: Nematski elastomer — mezogeni na osnovni verigi so vsi orientirani v eno smer, rdeče črte so kovalentne povezave med verigami [10].

TOPLOTNO-MEHANSKI POJAV

Ureditev tekočih kristalov na molekularnem ravni v enodomenskem nematskem elastomeru ustvari anizotropno obliko makroskopskega vzorca — snov se enoosno raztegne tudi do 400% (slika 11) [1]. Anizotropija je prisotna, dokler mezogeni tvorijo nematsko fazo, ki izgine pri temperaturi T_{ni} , $T_{ni} \approx 79^\circ\text{C}$ pri azobenzenu, kjer je fazni prehod iz nematske in izotropno fazo. Razmerje med dolžino polimera v izotropni fazi L_0 in v nematski fazi L označuje $\lambda = L/L_0$. Temperaturna odvisnost $\lambda(T)$ je prikazana na sliki 12 levo in jo opisuje zveza

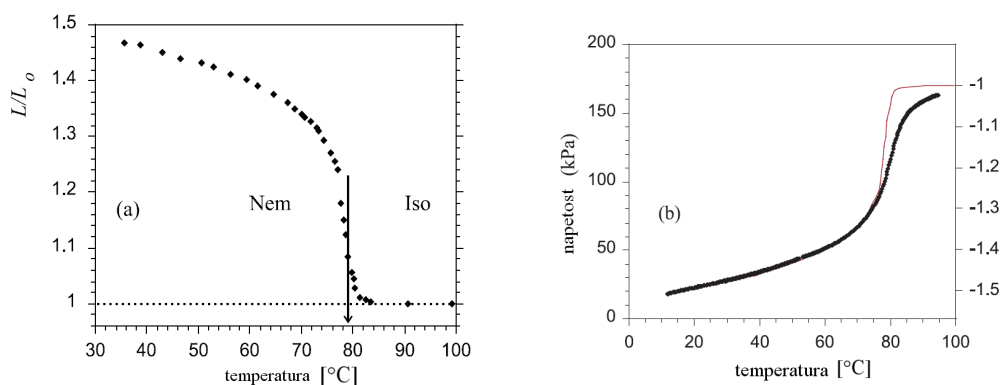
$$\lambda = 1 + \alpha [1 - T/T_{ni}]^\xi, \quad (10)$$

kjer sta α in ξ snovni konstanti. Kritični eksponent ξ je za večino nematskih elastomerov med 0.1 in 0.4 [12].



Slika 11: Ob segrevanju se elastomer razširi, ker se mezogeni orientirajo v smer direktorja \mathbf{n} [1]

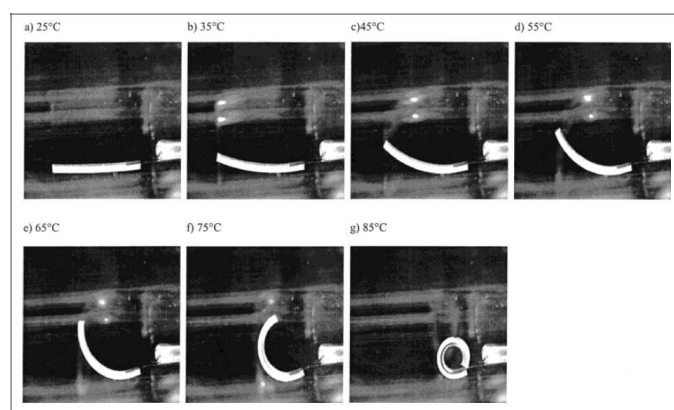
Če nematski elastomer togo vpneto, ob spremembah temperature ne spreminja oblike, ampak deluje s silo na stene, med katere je vpet. Potem pri nizkih temperaturah opazimo, da snov deluje na stene s silo, ki je sorazmerna notranjim napetostim v snovi, ki se prosto razteguje. V bližini faznega prehoda to sorazmerje izgine, ker izginja tudi nematska ureditev, ki prispeva, k sili, ki deluje na stene. Levi graf na sliki 12 opisuje relativni raztezek nematskega elastomera ob segrevanju. V nematski fazi se raztegne v tisto smer, kamor kaže direktor nematske orientacije, pri temperaturi prehoda v izotropno fazo, ki je označeno s puščico, pa se zelo hitro skrči. Desni graf na sliki 12 opisuje silo, s katero deluje vpet nematski elastomer na stene, tanjša črta opisuje negativno vrednost iz grafa na levi. Primerjava teh dveh črt pokaže, da velja sorazmerje pri nizkih temperaturah, ki izgine blizu faznega prehoda [7,8].



Slika 12: Levi graf opisuje relativni raztezek nematskega elastomera ob segrevanju. V nematski fazi se raztegne v tisto smer, kamor kaže direktor nematske orientacije, pri temperaturi prehoda v izotropno fazo, ki je označeno s puščico, pa se zelo hitro skrči. Desni graf opisuje silo, s katero deluje vpet nematski elastomer na stene, tanjša črta opisuje negativno vrednost iz grafa na levi. Primerjava teh dveh črt pokaže, da velja sorazmerje pri nizkih temperaturah, ki izgine blizu faznega prehoda [11].

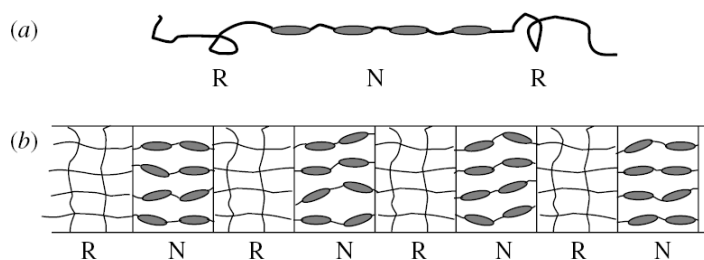
Ta toplotnomehanski pojav, ko v bližini faznega prehoda tekočerkristalna snov izgubi anizotropijo in se skrči, se je izkazal kot praktično uporaben na več področjih.

Kompozit nematskega elastomera in navadnega izotropnega elastomera, ki je na nematskega nanešen kot prevleka, se toplotnih spremembah ukrivlja podobno kot bimetalni trak (slika 13) [13]. S segrevanjem se nematski elastomer približuje izotropni fazi, tekočerkristalna urejenost začne izginjati in se vzorec začne krčiti.



Slika 13: Kompozit nematskega elastomera in navadnega izotropnega elastomera se ob segrevanju ukrivlja [13].

Hitre spremembe v velikosti pri faznem prehodu iz nematske v izotropno fazo in dejstvo, da se ta prehod da vzbuditi na tudi z obsevanjem s svetlobo in z zunanjim električnim poljem, pomenita, da so nematski elastomeri primerni za izdelavo umetnih mišic. Izdelujejo jih iz tribločnega kopolimera RNR [14], ki je sestavljen iz nematskega elastomera v sredini (N) in dveh izotropnih elastomerov ob straneh (R) (slika 14). Tribločna struktura je pomembna, da se obdrži enodomenska nematska struktura, saj bi molekule ob krčenjih in širjenjih lahko zdrsele in se tako naključno orientirale po snovi.

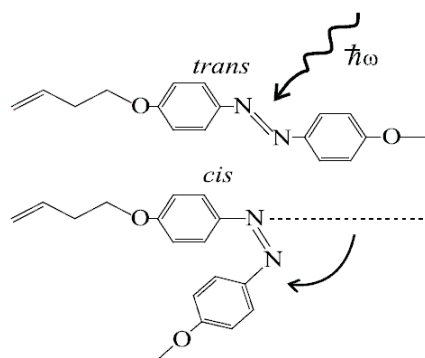


Slika 14: Polimerna umetna mišica (b) sestavljena s tribločnimi kopolimernimi verigami, ki jih sestavlja nematski elastomer (N) in izotropen elastomer (R) [14].

Poskusi z vzrocom velikosti $1,5 \times 3$ cm in debelino $50-100 \mu\text{m}$ so pokazali, da se umetna mišica skrči okoli $35-45\%$ v smeri direktorja in se je ustvari tlak 210 kPa [14].

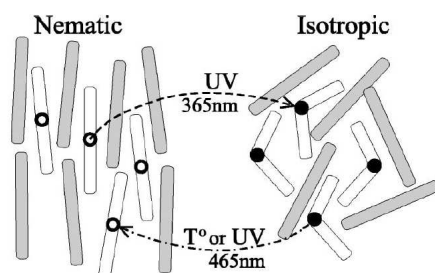
SVETLOBNO-MEHANSKI POJAV

Za nematske elastomere so značilni tudi izraziti svetlobno-mehanski pojavi, ki vplivajo na nematsko ureditev s spreminjanjem izomerije. Paličasti mezogeni se lahko ukrivijo, ko absorbirajo foton ustrezne valovne dolžine [12]. Fotoizomerizacija je proces, ko se po absorpciji svetlobe zamenjata *cis* in *trans* izomeriji (slika 15). Pri tekočih kristalih se najpogosteje spreminja orientacijo dvojne dušikove vezi.



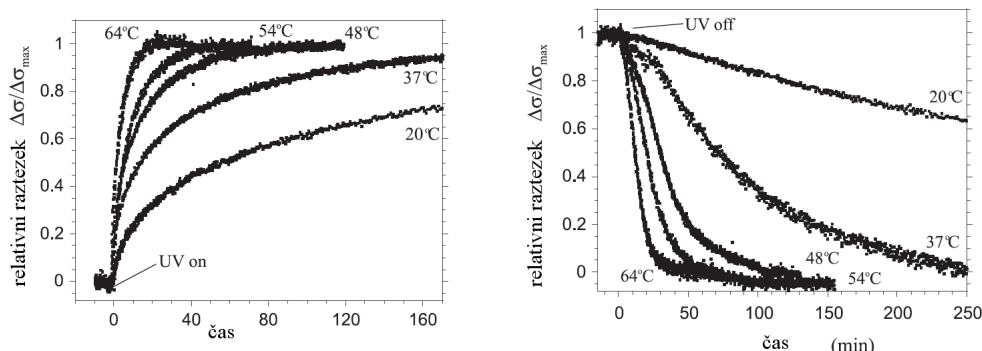
Slika 15: Prehod med *cis* in *trans* izomerijo na dvojni dušikovi vezi se zgodi pod vplivom svetlobe z določeno frekvenco [12].

Ko je dušikova vez v *trans* stanju, so mezogeni ravni. Sprememba izomerije v *cis* stanje zmanjša nematski red (slika 16) v snovi in zniža temperaturo faznega prehoda. Resonančna valovna dolžina za prehod *trans* → *cis* je 365 nm in za prehod *cis* → *trans* pri azobenzenu je 465 nm.



Slika 16: Fazni prehod iz nematske faze v izotropno po spremembah izomerije snovi nastopi pri nižji temperaturi zaradi večjega nereda v sistemu [12].

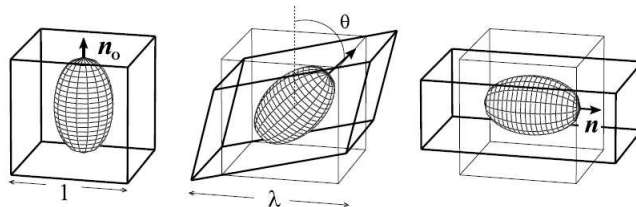
Amplituda odziva svetlobno vzbujene *trans* → *cis* izomerizacije je tem bolj strma, čim bližja je njegova temperatura temperaturi faznega prehoda T_{ni} (slika 17 levo). Pravtako je hitrejša relaksacija nazaj v *trans* stanja pri višjih temperaturah (slika 17 desno) [11].



Slika 17: Raztezanje nematskega elastomera ob osvetljevanju (levo), relaksacija po prenehanju osvetljevanja (desno). Pri raztezanju in relaksaciji je potrebno več deset minut, da snov doseže končno obliko [11].

MEHKA ELASTIČNOST

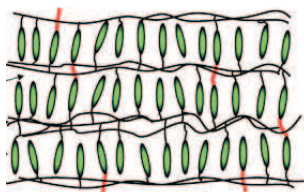
Rotacije nematskega direktorja povzročijo pojav, ki se imenuje mehka elastičnost. Tekočekristalni elastomeri so zelo gibljivi na molekularni ravni, zato se direktor lahko obrne že pri majhnih mehanskih napetostih. Rotaciji direktorja sledijo tudi verige. Vendar oblika porazdelitve verig in s tem entropija ostane nespremenjena. Prosta energija se ne poveča, kljub temu da je prišlo do netrivialne deformacije (slika 18)[1].



Slika 18: Direktor n_0 , označen s puščico, v nematskem elastomeru (paralelepiped) se obrne za $\pi/2$ v lego n in verige (elipsoid) mu sledijo [1].

SMEKTIČNI ELASTOMERI

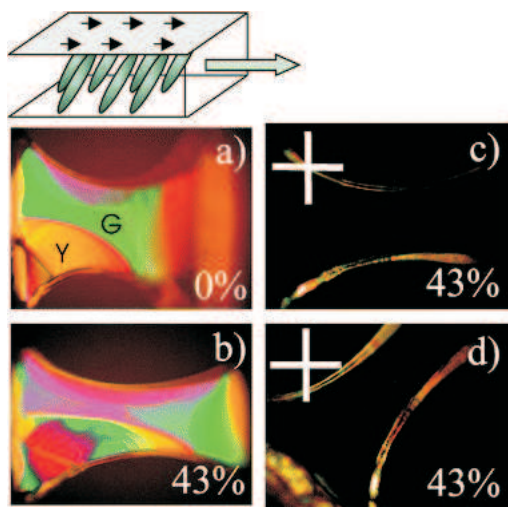
Vse smektične mezofaze tekočih kristalov (slika 19) najdemo tudi v obliki elastomerov. Plastovita struktura smektičnih tekočekristalnih polimerov vpliva na makroskopske lastnosti snovi.



Slika 19: Smektični elastomer — povezava plastovite strukture smektičnih tekočih kristalov v polimerne verige, ki so medseboj povezane s kovalentnimi mostovi, ki so na sliki označeni rdeče [15].

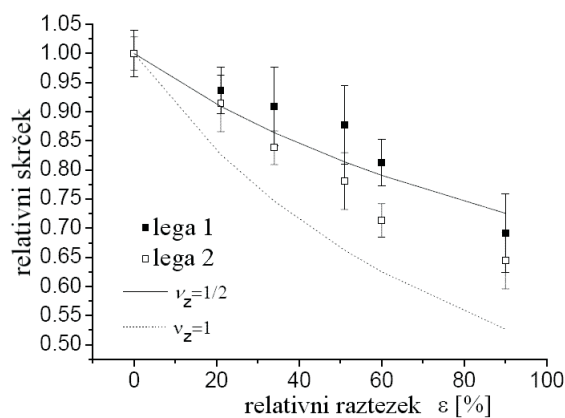
ELASTIČNE LASTNOSTI

V smektičnih A elastomerih odziv na zunanje sile ni izotropen kot pri navadnih elastomerih. Elastični modul v smeri normalno na smektične plasti je zelo majhen, zato so deformacije prisotne samo v dveh dimenzijah. Raztezanje v smeri vzporedno s smektičnimi plastmi se zato kompenzira samo s tanjšanjem smektičnih plasti (slika 20), kar potrди sprememba barve filma, ki se spremeni zaradi različnih odbojev na tanki plasti [15].



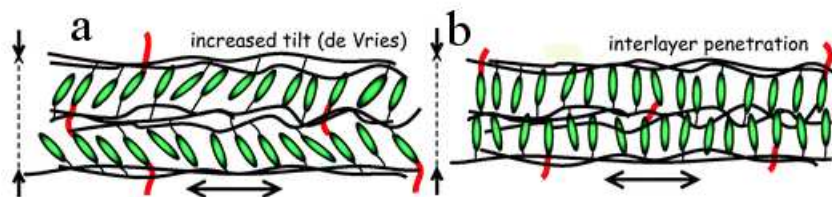
Slika 20: Smektični A elastomer — neraztegnjen (a), raztegnjen za 43%, kar pokaže tudi sprememba barve (b), raztegnjen smektični film med dvema prekržanimi polarizatorjema, ker skozi ne gre nič svetlobe, sklepamo da anizotropija v raztegnjenem stanju izgine (c in d) [15]

Izotropni elastomeri so nestisljivi, zato je njihovo Poissonovo število $\nu = 1/2$. Podobno velja za smektične elastomere, kar se vidi tudi grafa na sliki 21, ki primerja relativno tanjšanje filma v odvisnosti od raztezkov, izmerjenih na dveh delih filma, s teoretičnim rezultatom z idealno nestisljivo snovjo, ki ima Poissonovo število $\nu = 1/2$ [16].



Slika 21: Tanjšanje smektičnega filma v odvisnosti od raztezanja [16].

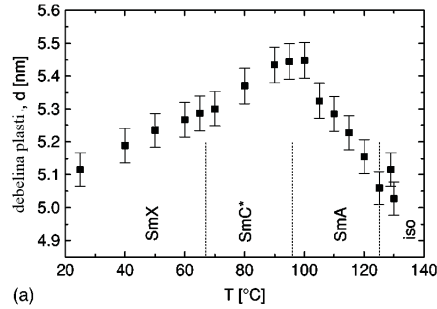
Lastnost je reverzibilna, zato je najverjetnejša razlaga, da se ob krčenju mezogeni naključno nagnejo (slika 22a) ter smektične plasti se medseboj prepletejo (slika 22b). Anizotropija v raztegnjenem stanju izgine, saj snov ni več dvolomna, kot pokaže pregled snovi med dvema prekržanima polarizatorjema (slika 20c, d).



Slika 22: Ob raztegovanju smektičnega filma v smeri vzporedno s smektičnimi plastmi se debelina filma stanjša. Deformacije so reverzibilne, zato sta tanjšanje najverjetneje povzročita naslednja dva mehanizma — povečanje naklona mezogenov (a), prehodi med smektičnimi plastmi — ob raztegovanju smektičnega filma (b) [15]

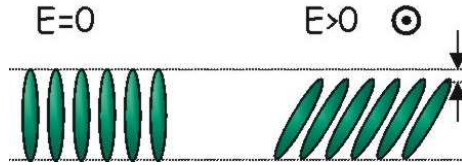
ELEKTROKLINIČNI POJAV

S segrevanjem smektičnega elastomera se v smektični C^* fazi debelina vzorca začne povečevati. To razloži dejstvo, da je naklon mezogenov odvisen od temperature, ki se manjša s približevanjem smektični A mezofazi, kjer so mezogeni razporejeni pravokotno glede na plast (slika 23) [17]. Zaradi ferroelektričnih lastnosti smektične C^* faze se lahko naklon mezogenov spreminja tudi z zunanjim električnim poljem (slika 24) in posredno debelina snovi.



Slika 23: Temperaturna odvisnost debeline smektičnega elastomernega filma, ob prehodu iz SmC* v SmA fazo se debelina poveča, ker se mezogeni razporedijo pravokotno na plast [17].

Elastični moduli smektičnih elastomerov so veliko manjši od keramičnih piezoelektrikov, kar bi se dalo ugodno izkoristiti, saj bi tako bile mehanske spremembe neprimerno večje. Meritve so pokazale, da se je pri 75 nm debelem vzorcu pod vplivom zunajega električnega polja 1.5 MV/m spremenila debelina vzorca za 3%, kar je veliko več, kot zmorejo aktualni piezoelektriki [19].



Slika 24: Elektroklinični pojav — pod vplivom zunanjega električnega polja se mezogeni nagnejo [18].

Snov je najbolj občutljiva za zunanje vplive pri temperaturi, ki je blizu prehoda iz smektične C* v smektično A fazo. Debelina smektične plasti d je odvisna od naklona direktorja glede na normalno plast. Nakloni so zelo majhni, zato si lahko pomagamo s približkom:

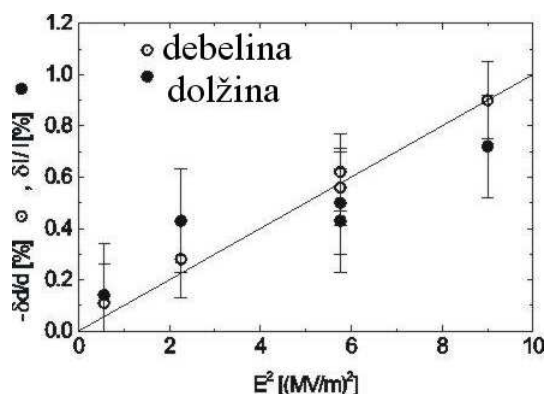
$$d(\theta) = d_0 \cos \theta \approx d_0 \left(1 - \frac{1}{2}\theta^2\right) \quad (11)$$

Elektrostrikcijo težko izmerimo, saj so vzorci zelo tanki, zato z Michelsonovim interferometrom merijo fazne zamike svetlobe, ki gre skozi vzorec. Sprememba naklona je linerno odvisna od spremembe jakosti zunanjega električnega polja,

$$\theta = \alpha E, \quad (12)$$

$$\frac{\delta d}{d} = \frac{1}{2}\theta^2 = \frac{\alpha}{2}E^2, \quad (13)$$

kar potrjuje tudi meritve (slika 25).



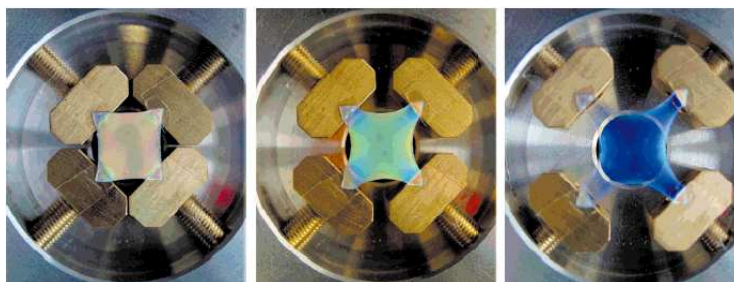
Slika 25: Relativna sprememba debeline in širine smektičnega elastomera je kvadratno odvisna od jakosti zunanega električnega polja, kar pokaže linearen odziv, če na absciso nanesemo kvadrat jakosti električnega polja [18].

KIRALNO NEMATSKI ELASTOMERI

Kiralno nematski elastomeri imajo zelo zanimive optične lastnosti. V kiralno nematskem tekočem kristalu dve značilni lastnosti: periodičnost vijačne strukture nematskih plasti, ki jo opišemo z naklonom p in dvolomnost Δn , ki sta hkrati značilni za to snov, onemogočata prehod krožno polarizirane svetlobe pri dani valovni dolžini [20].

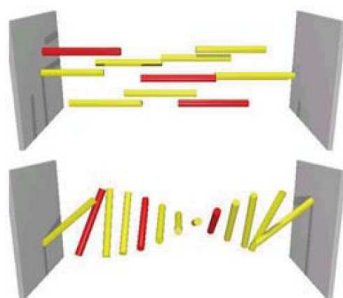
$$\lambda_{odboj} = p\Delta n \quad (14)$$

Selektivno odbojnost λ_{odboj} lahko nastavimo z mehanskimi deformacijami snovi. Ta lastnost je uporabna za izdelavo optičnih filtrov in ogledal. Mehanski raztegi pravkotno na smer vijačnice spremenijo valovno dolžino svetlobe, ki jo sistem odbije (slika 26).



Slika 26: Odboji različnih valovnih dolžin svetlobe od kiralno nematskega elastomera, pri različnih napetostih. Mehanski raztegi pravkotno na smer vijačnice spremenijo valovno dolžino svetlobe, ki jo sistem odbije. [21]

Vnos barvil (dichroic dye) v kiralno nematske elastomere povzroči, da se spremeni naklon vijačnice in s tem valovna dolžina odbite svetlobe (slika 27), ko so izpostavljeni UV svetlobi ali zunanjemu električnemu polju. To lastnost so izkoristili pri izdelavi samo zameglitvenih vizorjev za pilote reaktivcev, danes pa so na voljo že v prostem trgu. Nekateri primeri so samozatemnitvena očala, feroelektrične zaslonke, okna z UV zaščito, oblačila, s tkanino, ki spremeni barvo ob spremembi osvetlitve (sliki 28, 29) [22].



Slika 27: Prepustno stanje (zgoraj), zatemnjeno stanje (spodaj), kiralno nematski elastomer je rumene barve, barvilo rdeče [23].



Slika 28: Samozatemnitvena očala [22]



Slika 29: Rob obleke iz tekočerkristalnega elastomera sprememni barvo iz svetle v temno ob spremembi osvetlitve [22].

6 ZAKLJUČEK

V tem seminarju smo opisali nekaj fizikalnih značilnosti tekočerkristalnih elastomerov. Obstaja jih še veliko več. Nekatere lastnosti se že na veliko izkoriščajo v industriji, nekatere pa je potrebno še natančneje raziskati. Največji potencial tekočerkristalnih elastomerov je v njihovi vlogi kot aktuator, saj se na mnogo različnih zunanjih vplivov odzovejo z mehanskimi spremembami. Centimetrski vzorci so požročili tlake reda sto kPa, kar pomeni velike sile. Vendar pa ti fazni prehodi potekajo večinoma pri temperaturah veliko nad sobno, stalno segrevanje pa zahteva veliko energije in lahko slabo vpliva na delovanje ostalih členov sistema. Ker kot aktuatorji tudi ne potrebujejo nobenih dodatnih napajanj, preizkušajo njihovo uspešnost delovanja v na mikrometrskem nivoju, posebno pri mikroelektronskih mehanskih sistemih (MEMS).

7 LITERATURA

- [1] M. Warner in E. M. Terentjev, *Liquid Crystal Elastomers* (Oxford University Press, Oxford, 2003).
- [2] Liquid Crystals
<http://nobelprize.org/educationalgames/physics/liquidcrystals/history/>, maj 2008
- [3] Liquid Crystals Virtual Textbook
<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/textbook.htm>, maj 2008
- [4] <http://www.ngdir.ir/SiteLinks/Kids/html/zaminshenasi-mafahimbolore-%20mayeefr.htm>, maj 2008
- [5] The Glass Transition in Polymers, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge
<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/glass-transition/index.php>, maj 2008
- [6] DuPont
<http://www2.dupont.com/DuPontHome/enUS/>, maj 2008
- [7] Gore-Tex
<http://www.gore-tex.co.uk>, maj 2008
- [8] D. Bower, *An Introduction To Polymer Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
- [9] W.D Callister, *Materials Science and Engineering, An Introduction* (John Wiley and Sons, New York, 1999).
- [10] Universal states in nematic elastomers
<http://www.samsi.info/200304/multi/efried.pdf>, maj 2008
- [11] J. Cviklinski, A. R. Tajbakhsh in E. M. Terentjev, *Eur. Phys. J. E* **9**, 427 (2002).
- [12] P. M. Hogan, A. R. Tajbakhsh in E. M. Terentjev, *Phys. Rev. E* **65**, 041720 (2002).
- [13] N. Assfalg, H. Finkelmann, *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe* **52**. Jahrgang, 679 (1999)
- [14] M. H. Li, P. Keller, *Phil. Trans. R. Soc. A* **364**, 2763 (2006).
- [15] R. Stannarius, V. Aksenov, J. Blaesig, A. Krost, M. Roessle in R. Zentel, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **8**, 2293 (2006).
- [16] V. Aksenov, J. Blaesig, M. Roessle, R. Stannarius, R. Zentel, *Strain Induced Compression of Smectic-A Layers in Free Standing Liquid Crystalline Elastomer Films*
<http://frsl06.physik.uni-freiburg.de/DFKKG/archive/2006/>, maj 2008
- [17] R. Stannarius, R. Koehler, U. Dietrich, M. Loesche, C. Tolksdorf in R. Zentel, *Phys. Rev. E* **65**, 041707 (2002).
- [18] Smectic Elastomers
<http://www.uni-magdeburg.de/anp/projects/elastomers/elastomers.html>, maj

2008

[19] R. Koehler, R. Stannarius, C. Tolksdorf, R. Zentel, *Appl. Phys. A* **80**, 381, (2005).

[20] P. Cicutta, A. R. Tajbakhsh in E. M. Terentjev, *Phys. Rev. E* **65**, 051704 (2002).

[21] The Finkelmann group, Albert-Ludwigs Universtaet Freiburg

<http://www.chemie.uni-freiburg.de/makro/finkelmann/forschung/thermotrope.htm>, maj 2008

[22] AlphaMicron

<http://www.alphamicron.com>, maj 2008

[23] ChemFiles

<http://www.sigmaaldrich.com/aldrich/bulletin/Chemfile58.pdf>, maj 2008