

MIKROČRPALKE IZ TEKOČEKRISTALNIH ELASTOMEROV

NEJC JANŠA

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Obravnavamo mikročrpalke iz tekočerkristalnih elastomerov. Za njihovo boljše razumevanje si najprej ogledamo elastičnost elastomerov na modelu gibke verige. Nadaljujemo s tekočimi kristali in opisom njihove strukture. Kot zgled uporabe si ogledamo njihov odziv na zunanje električno polje. To nas pripelje do tekočerkristalnih elastomerov. Pogledamo si, kako so zgrajeni, in na podlagi računskega primera ter eksperimentalnih dejstev spoznamo, kako je z njihovim odzivom na zunanje dražljaje. Nazadnje se posvetimo še mikročrpalcam, si ogledamo, kako so pripravljene in kako je bila preverjena njihova struktura. Za konec diskutiramo še njihove različne možnosti uporabe.

LIQUID CRYSTAL ELASTOMER MICROPUMPS

In this paper liquid crystal elastomer micropumps are presented. For a better understanding we first study the elasticity of elastomers, starting from a simple flexible chain model. We continue by considering liquid crystals and review their structure and properties, including their response to external electric fields. Then, our focus is shifted to liquid crystal elastomers. We look at how they are constructed and learn about their reaction to external stimuli, both from a theoretical model and from experimental data. Last of all, we draw attention to the micropumps, look at how they are made and how their microscopic structure was verified. We also discuss their possible applications.

1. Uvod

Tekočerkristalni elastomeri so materiali z izrazito sklopitvijo med orientacijskim redom molekul in elastično deformacijo. Zaradi tega so občutljivi na zunanje dražljaje in uporabni v aktuaciji, torej kot deli sistema, ki omogočijo premikanje. Primeri uporabe so umetne mišice ali mikročrpalke.

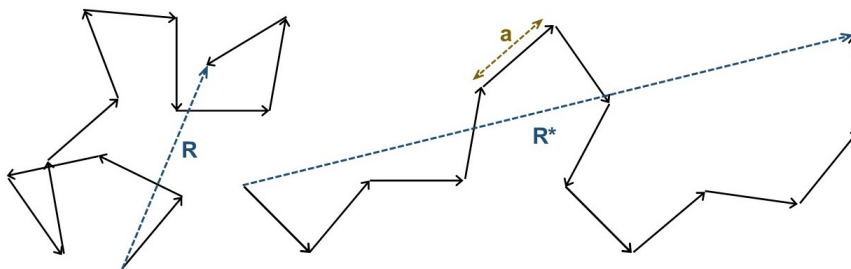
Tekoče kristale je odkril že kemik Friedrich Richard Reinitzer leta 1888. Pri holesteril benzoatu je opazil dve tališči, med katerima je bila prepoznana tekočerkristalna faza. V nadaljnjih letih je bilo odkritih vedno več takih materialov, tudi taki s tekočerkristalno fazo pri sobni temperaturi, ki so se hitro prijeli za uporabo v LCD prikazovalnikih. Leta 1991 je Pierre-Gilles de Gennes prejel Nobelovo nagrado v fiziki za delo na področju tekočih kristalov in polimerov. Z vgrajevanjem tekočih kristalov v polimerne verige so pričeli v sedemdesetih letih. Večji prelom pa je bil, ko je Heino Finkelmann leta 1991 uspešno sintetiziral monodomenske elastomerne vzorce.

2. Elastomeri

Elastomere v pogovornem jeziku poimenujemo kar gume, s katerimi se pogosto srečujemo v vsakdanjem življenju. Več o sami zgradbi nam pove ime elastomer, ki izvira iz besedne zveze elastični polimer. To nam da vedeti, da so v osnovi to polimeri, kar so dolge molekule, sestavljene iz ponavljajočih se gradnikov. Njihova največja posebnost, elastičnost, se odraža v nizkem Youngovem modulu ter visoki meji elastičnosti. To preprosto pomeni, da jih z lahkoto raztegujemo in da se bodo kljub temu povrnil v začetno obliko.

Elastičnost se da orisati z nekaj znanja termodinamike. Predstavljajmo si enostaven model verige z N členi dolžine a , kateri je vsak lahko poljubno orientiran (Slika 1). Z R označimo razdaljo med začetno in končno točko verige. Vidimo, da za daljši R^* ustreza manjše število možnih poti od začetka do konca, saj morajo členi v povprečju kazati v isto smer. To nas takoj napelje k entropiji verig

$$S = k_B \ln(\Delta\Gamma), \quad (1)$$



Slika 1. Idealna veriga kot preprost model elastomera. Vidimo konfiguraciji z različnimi dolžinami R in R^* . Velja $\Delta\Gamma(R) > \Delta\Gamma(R^*)$ in $F(R) < F(R^*)$.

kjer je k_B Boltzmannova konstanta in $\Delta\Gamma$ velikost faznega prostora, ki je sorazmerna številu konfiguracij. To vstavimo v enačbo za prosto energijo F , kjer postavimo notranjo energijo na $U = 0$, saj imajo vse vezi v modelu gibke verige enako energijo:

$$F = U - TS = -TS = -k_B T \ln(\Delta\Gamma). \quad (2)$$

Iz termodinamike se spomnimo izraza za silo \mathcal{F} , ki je posledica raztegnjene verige:

$$\mathcal{F} = - \left(\frac{\partial F}{\partial R} \right)_T. \quad (3)$$

Obravnavan model verige je podoben naključnemu sprehodu. Iz centralnega limitnega izreka sledi, da je končna dolžina R Gaussovo porazdeljena. Od tod lahko do konstante natančno določimo velikost faznega prostora

$$\Delta\Gamma \propto p(R) \propto e^{-3R^2/2R_0^2}, \quad (4)$$

kjer je R_0 varianca porazdelitve, ki jo dobimo kot

$$R_0^2 = a^2 N. \quad (5)$$

Ko (4) vstavimo v enačbi (2) in (3) dobimo končni rezultat za silo

$$\mathcal{F}(R) = -k_B T \frac{3R}{R_0^2}. \quad (6)$$

Elastomer seveda ni sestavljen iz ene same verige, temveč je teh mnogo, med sabo pa so povezane s prečnimi vezmi (Slika 2). Če povprečno število verig na enoto volumna označimo z n_S , lahko definiramo značilni prožnosti modul

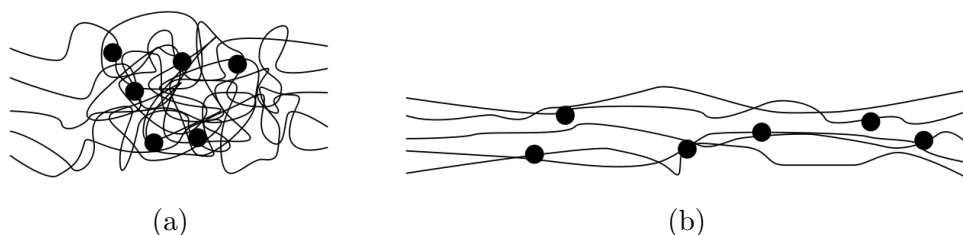
$$\mu = n_S k_B T. \quad (7)$$

Značilne vrednosti pri sobni temperaturi so $\mu \sim 10^4 - 10^6$ Pa. To je precej malo v primerjavi s trdninami, ki imajo $\mu \sim 10^{11}$ Pa, zato elastomere uvrščamo med mehke snovi.

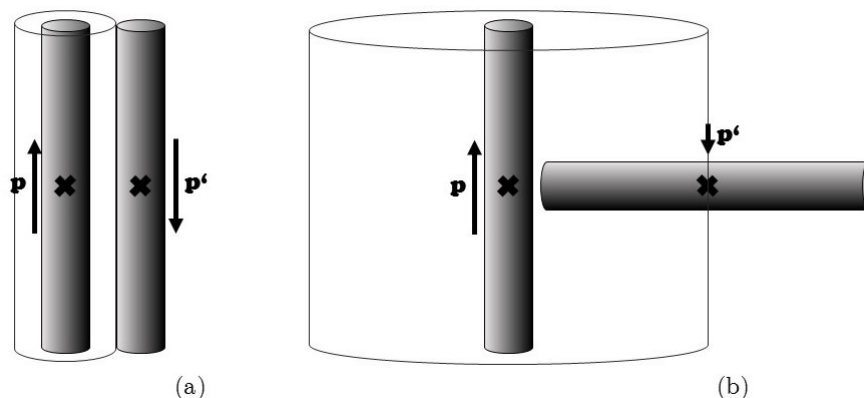
3. Tekoči kristali

Tekoči kristali so snovi, ki med prehodom iz trdnega stanja v izotropno tekočino nastopijo v tekočekristalni fazi. Ta kaže mešane lastnosti obeh, in sicer tvori kapljice ter teče kot tekočina, ima pa delno urejeno strukturo, kot je značilno za kristale.

Da lahko pride do tekočekristalne faze, potrebujemo gradnike anizotropnih oblik. Najbolj splošne so podolgovate paličaste molekule in ploščate molekule v obliki diskov. Taki gradniki na mikroskopski ravni težijo k vzporednemu urejanju. Izkaže se, da molekule lažje zapolnijo prostor ena ob drugi,



Slika 2. Model elastomera s prečnimi vezmi (črne pike). Če na (a) delujemo s silo, se deformira v (b) [1].



Slika 3. Ureditve dveh paličastih molekul; (a) vzoredno in (b) prečno. Vidimo, da je izključitveni volumen za vzoredne molekule manjši, inducirani dipoli p in p' pa so največji [2].

če so poravnane, za kar so odgovorne odbojne sterične sile. Pomembno vlogo imajo tudi Van der Waalove sile, saj se vzdolž daljše osi dipol lažje inducira (Slika 3).

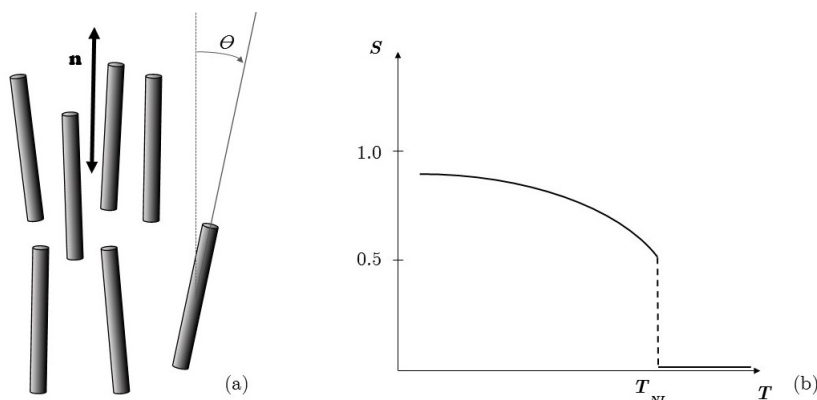
Iz mikroskopske urejenosti sledi tudi makroskopska anizotropija. Opišemo jo lahko z vektorjem povprečne usmerjenosti molekul \mathbf{n} , ki ga imenujemo direktor. Vektor je enotski in ne razlikuje med pozitivno in negativno smerjo. Tudi če molekule naprimer nosijo električni dipol vzdolž svoje dolge osi, jih je v povprečju polovica obrnjena v eno smer, polovica pa v drugo, vzorec kot celota pa ni polaren. Za podrobnejši opis urejenosti vpeljemo še stopnjo orientacijskega reda

$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = \left\langle \frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right\rangle. \quad (8)$$

Izračunamo ga kot povprečje drugega Legendrovega polinoma z argumentom $\cos \theta$, kjer θ označuje kot med osmi posameznih palic in direktorjem (Slika 4(a)), povprečje pa teče po molekulah. Razlog za izbiro 2. Legendrovega polinoma je prav ta, da ne razlikuje med smerema \mathbf{n} in $-\mathbf{n}$, ter je hkrati bolj enostaven od ostalih sodih Legendrovih polinomov. Če bi imeli opravka s polarnimi molekulami, bi lahko izbrali kar prvi polinom, $\cos \theta$, kar storimo na primer pri obravnavi feromagnetov.

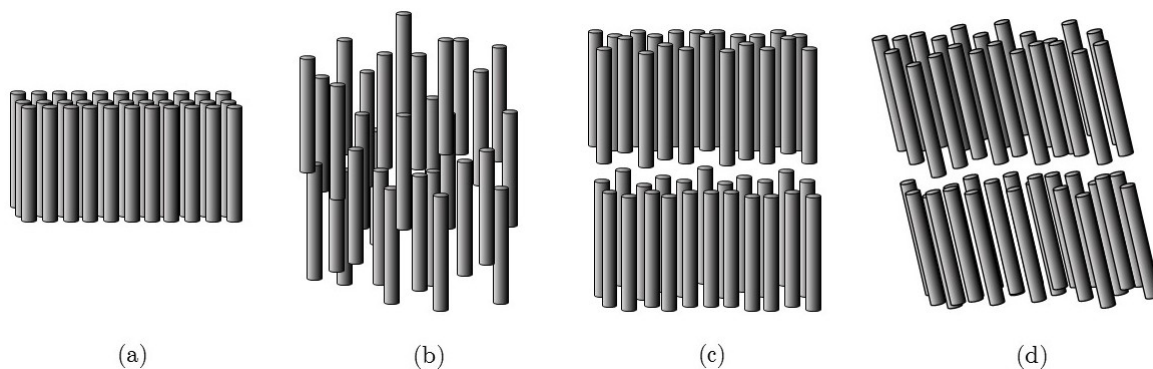
Značilne vrednosti S za nematski tekoči kristal so nekje 0.3 in 0.9. izkaže se, da je S funkcija temperature in sicer se manjša z večanjem T . Na Sliki 4(b) vidimo primer poteka te odvisnosti. Skok na grafu odgovarja faznemu prehodu, ki je nezvezen. Vrednost T_{NI} je snovna lastnost in se lahko precej razlikuje od materiala do materiala. Naprimer za podolgovato molekulo 5CB je temperatura prehoda med nematsko in izotropno fazo T_{NI} enaka 35°C .

Oglejmo si podrobneje najbolj značilne tekočokristalne faze. Za nematsko fazo je značilno, da so težišča molekul neurejena, hkrati pa imajo molekule veliko orientacijsko urejenost vzdolž direktorja.



Slika 4. (a) Ilustracija direktorja \mathbf{n} in kota θ [2]. (b) Stopnja orientacijskega reda v odvisnosti od temperature [3].

V smektični fazi se poleg orientacijske uredenosti pojavi še translacijska. Molekule se uredijo v plasti, ki lahko tečejo ena ob drugi. Te faze delimo še naprej. Pri smektični fazi A in B je direktor pravokoten na ravnino plasti, za fazo C pa je nagnjen glede na pravokotnico. V izotropni fazi se izgubi vsa uredenost. Molekule so orientirane v naključnih smereh. Primeri različnih faz so prikazani na Sliki 5.



Slika 5. Primeri uredenosti gradnikov za kristal (a), nematsko fazo tekočega kristala (b), smektični A (c) in C (d) fazi [4].

Ena izmed posledic ureditve v tekočih kristalih je ta, da imajo vzdolž ene smeri lahko drugačne lastnosti kakor vzdolž ostalih dveh. Primer za to je dvolomnost, kjer pride do tega, da svetloba z različno polarizacijo potuje skozi snov z različno hitrostjo.

Mogoče najpomembnejša lastnost tekočih kristalov je ta, da na njihovo uredenost, in s tem tudi prehode med fazami, lahko vplivamo z različnimi zunanji dražljaji. Najbolj pogosti so spremembe temperature (Slika 4(b)), vklop oziroma izklop električnega ali magnetnega polja ter (ultravijolična) svetloba.

Za primer pogledimo še, kaj se zgodi s tekočerkristalno molekulo v električnem polju \mathbf{E} . Zaradi anizotropije se vrednost dielektričnosti ε razlikuje v smeri vzporedno in pravokotno na \mathbf{n} . Sledi, da tudi gostota proste energije dobi člen, ki je odvisen od zunanjega polja \mathbf{E} [5]

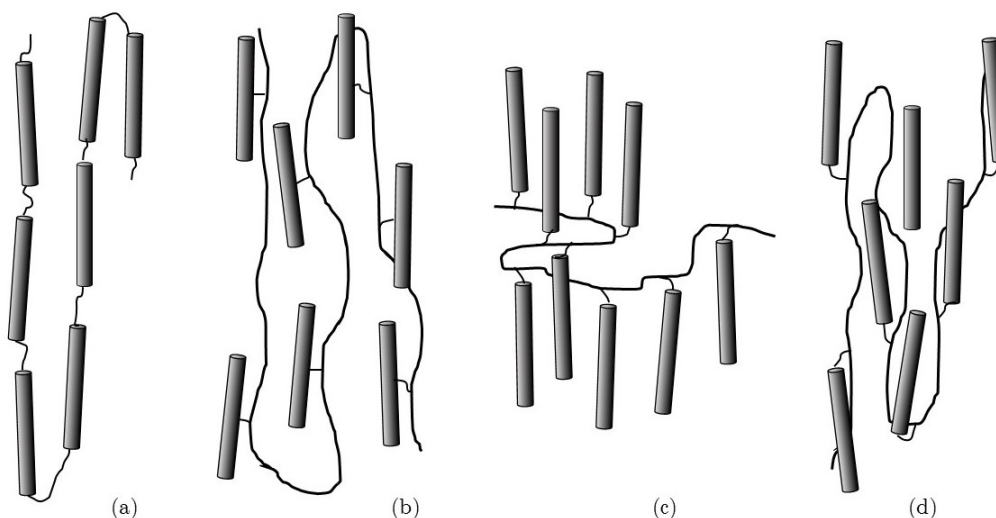
$$f_e = -\frac{1}{2}\varepsilon_0\Delta\varepsilon(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})^2, \quad (9)$$

kjer je $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$, ε_0 pa dielektrična konstanta. Ker sistem teži k minimizaciji proste energije, se \mathbf{n} uredi vzporedno s poljem, če je $\Delta\varepsilon > 0$.

4. Tekočekristalni elastomeri

To, kar tekočekristalne elastomere naredi posebno zanimive, je možnost sklopitve med orientacijo gradnikov, kar je lastnost tekočih kristalov, ter makroskopsko deformacijo, ki jo dovoljujejo elastomeri.

Tekoče kristalne molekule lahko v elastomer vgradimo na dva načina. Prva možnost je, da so vezane v glavni verigi, torej postanejo kar gradniki elastomerne verige. Druga možnost je, da so vezane v stranske verige, torej samo pripete na ogrodje elastomera. Tu je možnih več različic pripenjanja, razlikujejo se po tem, kako so molekule orientirane glede na glavno verigo. Tako dobljene materiale ločimo na tiste s pozitivno (Slika 6(a,b,d)) in na tiste z negativno (6(c)) sklopitvijo orientacije in deformacije. Pri prvih se ob delovanju s silo tekočekristalne molekule uredijo vzdolž polimerne verige, pri drugih pa pravokotno.



Slika 6. Tekoči kristalni gradniki na glavni verigi (a) in gradniki vezani v stransko verigo na različne načine: stransko pripeti (b) ter pripeti na koncu (c), kjer je v (d) uporabljena toga in ukrivljena vez [2].

Zaradi izrazito podolgovatih tekočokristalnih gradnikov se tudi v polimerni verigi pojavi anizotropija vzdolž \mathbf{n} . Problema ne moremo več opisati z enostavnim modelom gibke verige. Če upoštevamo, da polimer v resnici ni popolnoma gibek, namesto dolžine koraka a vpeljemo efektivno dolžino koraka l . To je karakteristična dolžina, po preteku katere se smer polimerne verige znatno spremeni. Zaradi anizotropije je l odvisen od smeri in moramo v resnici pisati tenzor s komponentami l_{ij} . Porazdelitev vektorja \mathbf{R} , ki sega od začetka do konca verige, je še vedno Gaussova, ni pa več izotropna.

S tako obravnavo pridemo do formule za gostoto proste energije [2]

$$f = \frac{1}{2}\mu \operatorname{Tr}\left(\underline{l}_0 \cdot \underline{\lambda}^T \cdot \underline{l}^{-1} \cdot \underline{\lambda}\right). \quad (10)$$

Tu je \underline{l}_0 tenzor efektivnih dolžin korakov za vzorec v trenutku sinteze, \underline{l} tenzor efektivnih dolžin v trenutku opazovanja in μ enak kot v (7). $\underline{\lambda}$ je tenzor celotne deformacije, definiran kot

$$\mathbf{R}^* = \underline{\lambda} \mathbf{R}, \quad (11)$$

kjer je \mathbf{R} vektor pred in \mathbf{R}^* vektor po deformaciji (Slika 1).

Enačba (10) je dober zgled za sklopitev med orientacijo in deformacijo v tekoče-kristalnih elastomerih. Orientacija se skriva v \underline{l} , natančnejša povezava s stopnjo orientacijskega reda S pa je razvidna iz [2]

$$\frac{l_{\parallel}}{l_{\perp}} = \frac{1 + 2S}{1 - S}, \quad (12)$$

kjer sta izbrani vzporedna in pravokotna komponenta l glede na direktor \mathbf{n} .

Poglejmo si še, kaj se zgodi s kosom tekočerkristalnega elastomera, sintetiziranim v nematski fazi, ko povzročimo prehod v izotropno fazo. Izberimo si os z vzdolž \mathbf{n} . Z λ označimo deformacijo v smeri osi z . Vzamemo lahko, da deformacija ohranja prostornino, zato dobimo

$$\underline{\underline{\lambda}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} = \underline{\underline{\lambda}}^T. \quad (13)$$

Ker je vzorec nastal v nematski fazi, je \underline{l}_0 anizotropen ($l_{\parallel}^0 > l_{\perp}^0$)

$$\underline{l}_0 = \begin{pmatrix} l_{\perp}^0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{\perp}^0 & 0 \\ 0 & 0 & l_{\parallel}^0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Za \underline{l} v izotropni fazi velja

$$\underline{l} = a \underline{I}. \quad (15)$$

Tenzorje vnesemo v enačbo (10). Ko upoštevamo $\partial f / \partial \lambda = 0$, da bi našli ravnovesno stanje, sledi

$$\lambda = \left(\frac{l_{\perp}^0}{l_{\parallel}^0} \right)^{1/3} < 1, \quad (16)$$

kar ustreza enoosnemu skrčku v smeri \mathbf{n} in prečnemu raztežku.

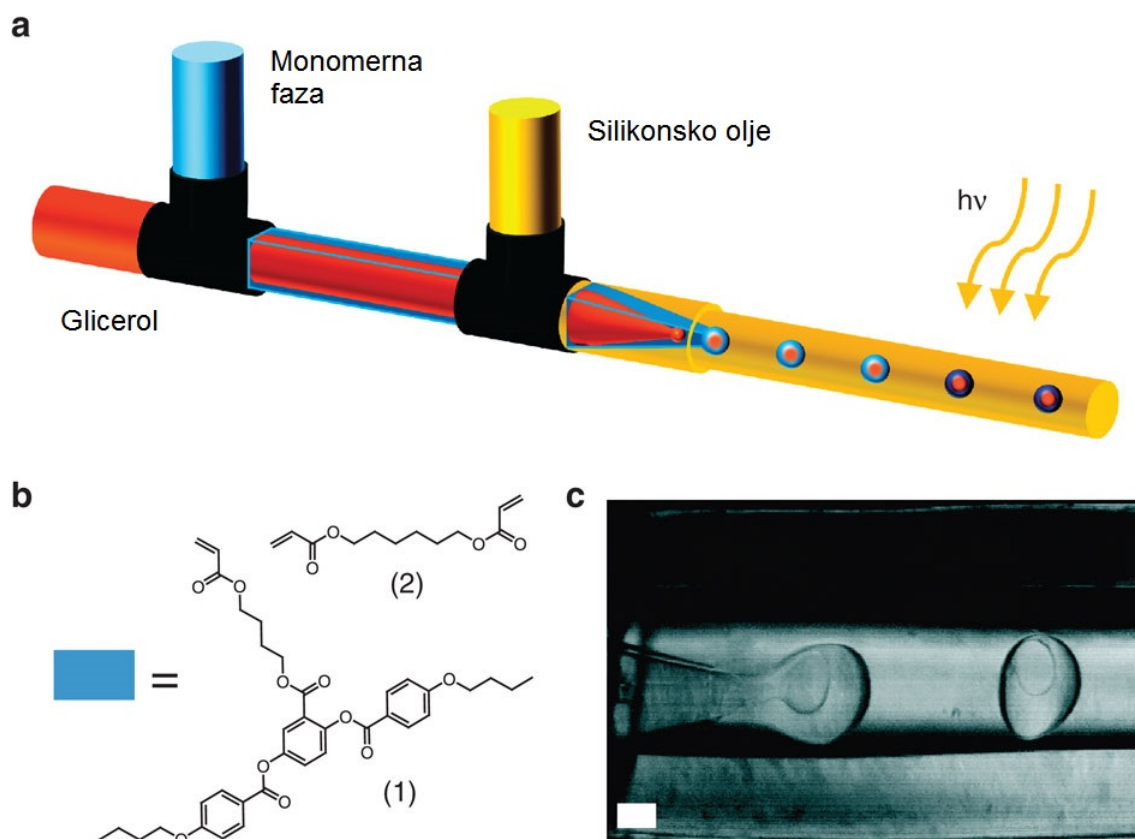
Uporabne lastnosti tekočerkristalnih elastomerov so bile potrjene tudi z mnogimi eksperimenti. S spremembo zunanjih pogojev so dosežene velike makroskopske deformacije in sicer spremembe relativne dolžine λ tudi do 400%, kar je primerljivo z naravnimi mišičnimi vlakni. Značilno je, da so spremembe deformacije drastične predvsem v okolici faznega prehoda, kjer je tudi sprememba S največja.

Zaradi svoje sposobnosti premikanja ob zunanjih dražljajih, lahko za tekoče-kristalne elastomere najdemo različne načine uporabe. Poleg uporabe v raznih senzorjih, bi lahko iz njih sestavili tudi bolj zapletene naprave. Za njih se posebej zanimajo na področju mikrofluidike, kjer se pojavlja potreba po mikroskopskih motorčkih, črpalkah in ventilih. Ti so potrebni v miniaturnih laboratorijih, bolje označenih z angleškim imenom "lab-on-a-chip".

5. Mikročrpalko

Mikročrpalko dobimo tako, da tekočerkristalni elastomer oblikujemo v obliki krogelne lupine. Ko to lupino prebodemo, lahko s pomočjo reverzibilne deformacije povzročamo izmenjavo tekočine iz njene sredice z okoliško. Deformacijski mehanizem je podoben tistemu, ki smo ga izračunali v prejšnjem poglavju (16). Za dražljaj uporabimo spremembo temperature. Za aplikacije bi bilo veliko zanimiveje, če bi kot dražljaj lahko služil vklop električnega polja, vendar se izkaže, da bi bila za to potrebna polja previsokih jakosti.

Poglejmo si najprej, kako sploh poteka izdelava mikročrpalk. Shema aparature je prikazana na Sliki 7. Sestavljena je iz okrogle notranje in kvadratne zunanje kapilare, ki sta obdani še z eno

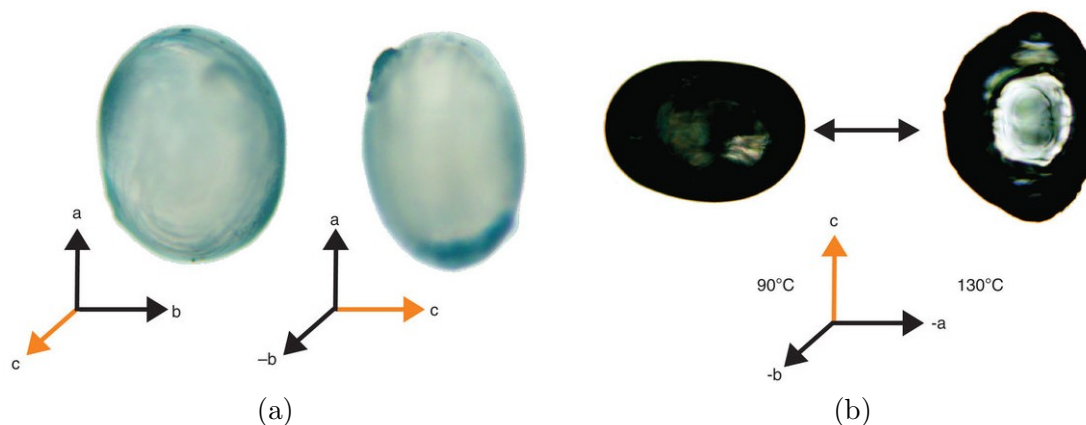


Slika 7. Priprava tekočerkristalno elastomernih lupin. Shema uporabljene aparature (a), molekularna struktura tekočerkristalnih monomerov (b) in posnetek tvorjenja kapljic (c). Uporabljeno z dovoljenjem Macmillan Publishers Ltd: Nature (2012) [6].

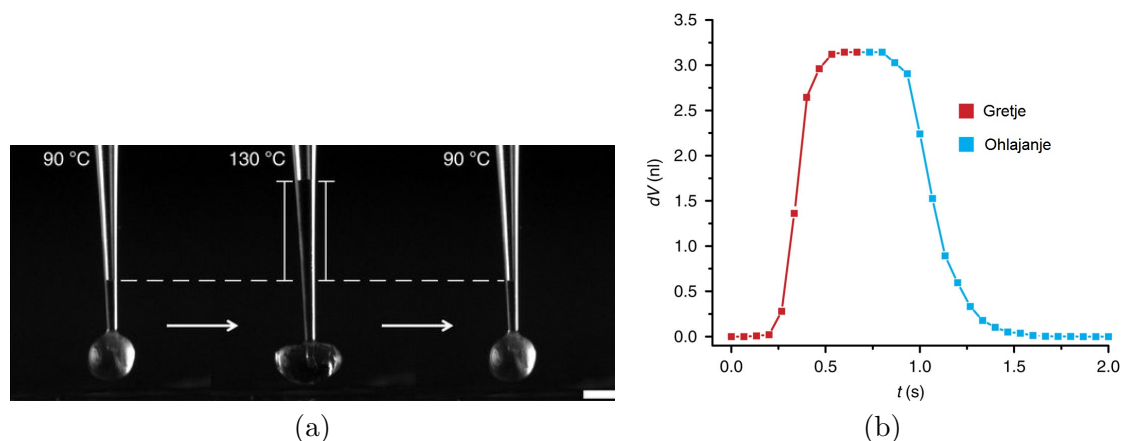
okroglo cevko. Na ta način so ločene tri plasti iz različnih snovi, ki so pripeljane v sistem. Po najbolj notranji plasti teče glicerol, ki na koncu notranje kapilare tvori kapljice. Tam ga obda tekočerkristalni monomer in skupaj na koncu druge kapilare spet kapljata v zunanjo plast iz silikonskega olja. Ker so snovi izbrane tako, da se med sabo ne mešajo, se zaradi površinskih napetosti oblikujejo v kroglice. Ko je to doseženo, na curek posvetimo z ultravijolično svetlobo, ki povzroči polimerizacijo tekočerkristalnih elastomerov. Tako smo jih oblikovali v željeno sferično obliko. Opisani postopek je dovolj hiter, da je uporaben tudi za množično proizvodnjo.

Dobljene mikročrpalke vidimo na Sliki 8. Pripisemo jim lahko različne osi, saj se izkaže, da niso popolnoma simetrične oblike. Vzdolž osi a merijo slabih $500 \mu\text{m}$. Tako, kot smo pričakovali, se ob spremembi temperature deformirajo. Izkaže se, da je fazni prehod za dobljene mikročrpalke blizu 130°C . Za nadaljnjo analizo je bilo potrebno črpalko prebosti s kapilaro, da je lahko prišlo do izmenjave tekočine. Po preluknjanju je nekaj glicerola ostalo izven kroglice, da je prišlo do izenačitve tlaka z zunanjim. V nadaljevanju poskusa je bila črpalka zopet segreta in ohlajena, kar je vidno na Sliki 9. Opazimo, da je sprememba reverzibilna, saj se nivo glicerola po enem ciklu vrne v začetno stanje. Iz višinske razlike stolpcev glicerola je bilo možno izračunati volumen izčrpane tekočine. Če odštejemo toplotno razpenjanje glicerola, je črpalka z lastno deformacijo iztisnila 50% svoje vsebine. Na grafu (b) vidimo še časovni odziv črpalke. Odzivni čas pri gretju s pištolo na vroči zrak je približno 0.1 s, ohlajanje pa traja približno 0.35 s.

Dobljene črpalke torej delujejo. Opažene lastnosti so povezane z direktorsko konfiguracijo v lupini. Teoretično lahko napovemo, da mora biti direktor usmerjen vzdolž osi a , česar pa ni mogoče zagotoviti na polih lupine. Tam mora priti do topoloških defektov, v katerih \mathbf{n} ni enolično določen.



Slika 8. Oblika izdelanih mikročrpalk (a) in deformacija ob spremembi temperature (b). Uporabljeno z dovoljenjem Macimillan Publishers Ltd: Nature (2012) [6].



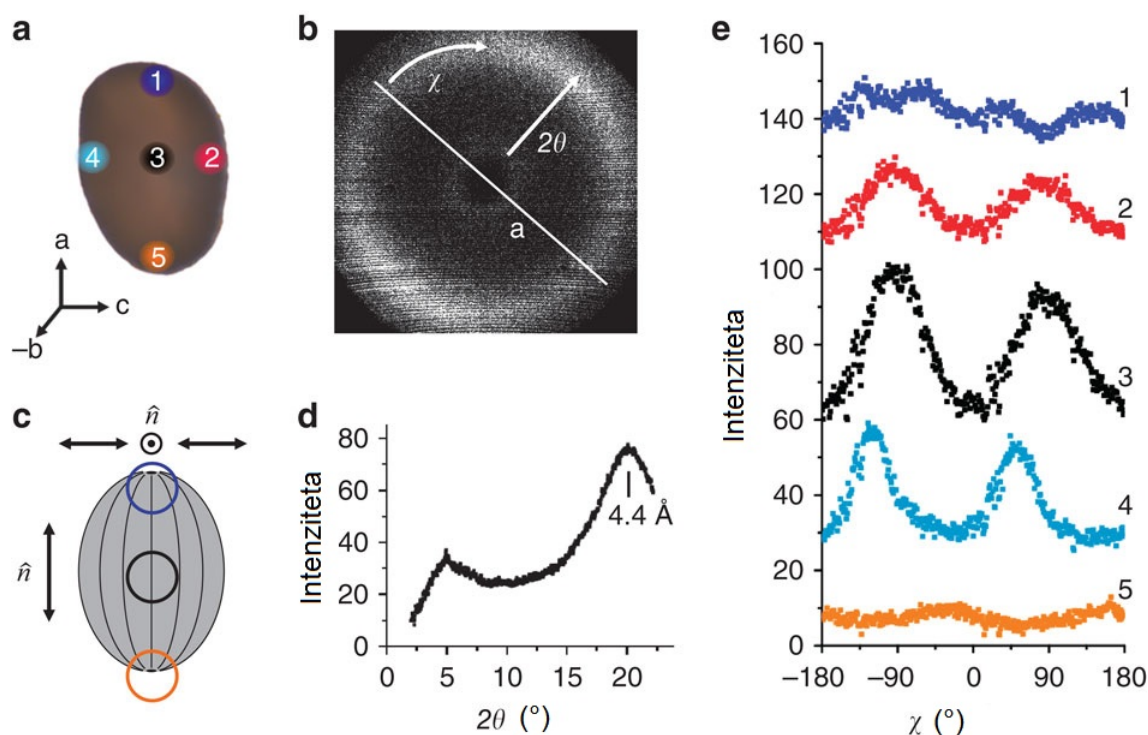
Slika 9. Posnetek deformacije črpalke ob gretju (a) in prostornina prečrpanega glicerola kot funkcija časa. Uporabljeno z dovoljenjem Macimillan Publishers Ltd: Nature (2012) [6].

Pojav je analogen problemu česanja dlakave krogle iz topologije. Pričakovano ureditev direktorja je možno potrditi z eksperimentalno metodo WAXS - wide-angle X-ray scattering. Ta z opazovanjem sipanih rentgenskih žarkov omogoča določitev usmerjenosti direktorja na različnih mestih lupine. Rezultati meritev so prikazani na Sliki 10. Meritve se ujemajo s pričakovanji, saj kažejo na to, da je v ekvatorialni ravnini direktor res povsod usmerjen vzdolž osi *a*, blizu polov pa preide v prečno smer in se konča v točkastem topološkem defektu. Takšno strukturo imenujemo bipolarna.

Izdelane črpalke so poceni, lahke, fleksibilne in kemično odporne, zaradi česar imajo več potencialnih načinov uporabe. Če bi jih prelučnjali na obeh straneh in na izhode namestili nasprotno obrnjeni šobi, bi s tem omogočili v povprečju usmerjen tok. Tako bi dobili samostojno črpalke brez ventilov, ki bi jo lahko namestili v laboratorij na čipu.

Druga zanimiva ideja uporabe je lokalna dostava zdravil v telesu. Jedro črpalke lahko napolnimo z zdravilno učinkovino, nato pa črpalke s pomočjo ustreznih sredstev usmerimo v željeni del telesa. Tam jo segrejemo in tako se na pravilnem mestu izloči zdravilo.

Predstavljamo si lahko tudi uporabo v kemijskem ali biokemijskem reaktorju, kjer bi lahko poskrbeli, da se v pravi fazi reakcije samodejno izloči nov reaktant.



Slika 10. WAXS: (a) Izbrana mesta merjenja smeri direktorja. (b) Vzorec sipanja izmerjen v točki 3. (c) Shematski prikaz ureditve direktorja na površini lupine. (d) Sipalni profil, izmerjen v točki 3. (e) Azimutalna porazdelitev intenzitete v vseh točkah. Uporabljeno z dovoljenjem Macmillan Publishers Ltd: Nature (2012) [6].

6. Zaključek

Sedaj torej razumemo princip delovanja tekočerkristalnih elastomernih mikročrpalk ter vemo, kako jih je možno pripraviti. Možnosti uporabe se ne zaključijo pri obravnavanem primeru. Postopek priprave se da prilagoditi za izbiro drugih monomerov, kar lahko pripelje do raznolikih lastnosti črpalk. Poleg širitve razpona aktivacijskih temperatur je predvidena uporaba tudi drugih zunanjih dražljajev, kot sta električno in magnetno polje ter ultravijolična svetloba. To kaže na še obsežnejše možnosti uporabe, vendar so tu potrebne še nadaljnje raziskave.

Ko bo uresničena komercialna oblika tekočerkristalnih elastomernih črpalk, bodo te gotovo konkurenčne do sedaj razvitim mehničnim mikročrpalkam. Slabost le teh je, da večinoma vsebujejo gibljive dele ter potrebujejo elektroniko, kar zahteva natančno in drago izdelavo ter hkrati navzdol omejuje njihovo velikost.

LITERATURA

- [1] Wikipedia - *Elastomer*, [ogled 6.4.2014], dostopno na <http://en.wikipedia.org/wiki/Elastomer>.
- [2] M. Warner in E.M. Terentjev, *Liquid crystal elastomers*, Oxford University Press, New York, 2003.
- [3] *Introduction to Liquid Crystals*, [ogled 14.4.2014], dostopno na <http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/lc/intro.htm>.
- [4] *General Ontology, part XXIX*, [ogled 15.4.2014], dostopno na http://www.metafysica.nl/ontology/general_ontology_29m1.html.
- [5] *Liquid Crystals: a Simple View on a Complex Matter*, [ogled 6.4.2014], dostopno na <http://dept.kent.edu/spie/liquidcrystals/maintypes.html>.
- [6] Fleischmann E.-K. *et al.* One-piece micropumps from liquid crystalline core-shell particles. *Nat. Commun.* 3:1178 doi: 10.1038/ncomms2193 (2012).