

Uroš Tkalec ^{1,2,3*} in Tadej Emeršič ^{1*}

Strukturiranje toka anizotropne tekočine z lasersko pinceto

POVZETEK

V prispevku so predstavljene aktualne raziskave na področju mikrofluidike tekočih kristalov, ki se v zadnjem času povezujejo z optotermično manipulacijo. Tokovne režime nematskega tekočega kristala raziskujemo v kanalčkih s pravokotnim površinskim sidranjem in ugotovljamo (meta)stabilnost posameznih orientacijskih stanj v odvisnosti od hitrosti toka. Uporaba laserske pincete nam omogoča kontrolirano tvorjenje mikroskopskih domen s polarnim redom, ki jih lahko transportiramo in prilagajamo z reguliranjem pretoka. Dinamika fazne meje, ki jo določa topološka defektna zanka, je izjemno občutljiva na gradiente v molekularnem in hitrostnem polju in zato zanimiva za senzorske aplikacije.

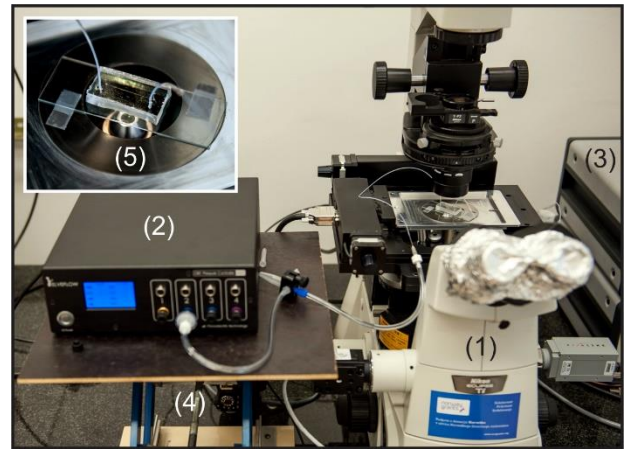
Ključne besede: mikrofluidika; tekoči kristali; laserska pinceta; topološki defekti

1. Uvod

Mikrofluidika kompleksnih tekočin je hitro razvijajoče se področje znanosti, ki obravnava dinamične pojave, fazne prehode, sortiranje in enkapsulacijo delcev na mikroskopskem nivoju ter uporabo teh pristopov v biomedicini, fiziki in znanosti o materialih [1,2]. Mlada veja mikrofluidike se ukvarja s tekočimi kristali – olju podobnimi anizotropnimi tekočinami, ki jih zaradi izjemnih optičnih lastnosti največkrat uporabljamo v LCD zaslonih in prikazovalnikih. Zadnja leta so nematski tekoči kristali – običajno jih tvorijo paličaste molekule, ki se zlahka uredijo vzdolž izbrane smeri, imenovane direktor – vzbudili pozornost tudi zaradi neobičajnih reoloških lastnosti [3]. Na mezoskali kažejo nematiki učinkovit elastičen odziv na deformacije direktorja, močna pa je tudi sklopitev z materialnim tokom, ki lahko vodi do kompleksnih prostorskih in dinamičnih vzorcev v direktorskem in hitrostnem polju. Raziskovalci so pokazali, da lahko s hitrim preklapljanjem direktorja v mikrofluidičnem kanalčku dosežemo hitrejšo modulacijo prepuščene svetlobe kot v tankih celicah z električnim poljem [4]. Ugotovili so tudi, da različne hitrosti toka nematika v takšnih kanalčkih vodijo do specifičnih orientacijskih stanj, ki lahko oblikujejo asimetrične tokovne profile [5]. Obenem se je izkazalo, da so hidrodinamične zastojne točke v stikih kanalčkov povezane z nastankom topoloških defektov, ki zaradi sprememb elastičnosti v svoji okolici še dodatno vplivajo na specifično obnašanje toka nematskih tekočin [6]. Vsa navedena odkritja na tem področju so nas zato spodbudila k nadaljnjemu raziskovanju

nematodinamike v mikrofluidičnem okolju in odkrivanju novih pojavov, ki jih v našem laboratoriju lahko proučujemo v kombinaciji z lasersko pinceto.

2. Opis problema



Slika 1: Raziskovalna oprema za proučevanje in strukturiranje hidrodinamičnih tokov nematskega tekočega kristala v mikrofluidičnem okolju. Pri delu uporabljamo: (1) polarizacijski optični mikroskop, (2) mikrokontroler tlaka za izjemno natančno regulacijo pretokov tekočin, (3) lasersko pinceto in (4) digitalni fotoaparata za zajemanje video posnetkov. Insert (5) prikazuje vzorčni kanalček s tekočim kristalom 5CB na mikroskopu.

Raziskave tekočih kristalov so močno povezane s študijami topoloških defektov, to je majhnih območij v molekularnem direktorskem polju, v katerih urejenost oziroma smer povprečne orientacije molekul ni dobro določena. Topološki defekti običajno nastanejo med faznim prehodom ali zaradi konfliktov v orientacijah molekul, ki jih vsiljujejo okoliške površine in geometrijsko kompleksnejše ograditve. Ker je obstoj defektov v tekočem, elastičnem mediju zaradi visokih energijskih zahtev običajno zelo kratek oziroma povezan s pripenjanjem na površine zaradi topoloških omejitev, predstavlja manipulacija

1 Inštitut za biofiziko, Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Vrazov trg 2, 1000 Ljubljana

2 Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Koroška cesta 160, 2000 Maribor

3 Odsek za fiziko trdne snovi, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana

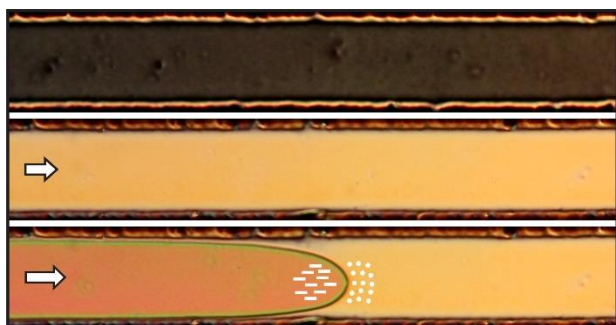
e-mail: uros.tkalec@mf.uni-lj.si

*Avtor za korespondenco; Tel.: +386-1-543-7612

defektnih zank na daljši časovni in večji prostorski skali precejšen izziv [7]. Ena izmed možnosti za doseg tega cilja je hkratna uporaba različnih zunanjih polj, ki po eni strani zagotovijo dovolj kontrolirano tvorbo defektov, njihovo dinamično manipulacijo v ograjenem območju in nadzorovan transport v mehansko in temperaturno stabiliziranem mediju. Takšne dolgožive defektne zanke bi lahko bile uporabne za enkapsulacijo molekul in nadzorovan potek kemijskih reakcij ali kot aktivni optični mikroelementi, ki se hitro odzivajo na spremembe fizikalnih parametrov v svoji okolici.

3. Eksperimentalni pristop

V laboratoriju smo strukturo prehoda v toku nematika ter tvorbo, dinamiko in manipulacijo defektnih zank z laserskim snopom proučevali v ravnih mikrofluidičnih kanalčkih s pravokotnim sidranjem molekul na površini (slika 1). Kanalčki so narejeni po postopkih mehke litografije, iz prozornega polimera PDMS in objektnega stekla s tanko prevodno plastjo [8]. Napolnjeni so z enokomponentnim nematskim tekočim kristalom 5CB, ki v mirovanju zaradi pravokotne orientacije molekul glede na stene in polarizator ne prepušča svetlobe (slika 2, zgoraj). Dinamiko toka v kanalčkih opazujemo s polarizacijskim optičnim mikroskopom in digitalnim fotoaparatom, sam pretok pa je natančno reguliran s piezoelektričnim mikrokontrolerjem tlaka (slika 1). Pri majhnih pretokih se direktorsko polje nematika le elastično upogne v smeri toka, kar optično zaznamo kot spreminjanje barv med prekrizanimi polarizatorjema (slika 2, sredina).



Slika 2: Statika in dinamika tekočega kristala 5CB v mikrofluidičnem kanalčku, posneta med prekrizanimi polarizatorjema na optičnem mikroskopu. V stacionarnem stanju so molekule 5CB poravnane pravokotno na spodnjo in zgornjo površino kanalčka, zato skoraj ne prepuščajo svetlobe (zgoraj). V šibkem toku se direktorsko polje nagne v smeri toka, kar opazimo v spremembi interferenčnih barv (sredina). Pri močnejših pretokih pride do preklopa navpično urejenega stanja v s tokom poravnano (pobeglo) stanje nematika (spodaj), ki ga vedno spremlja nastanek defektne linije, ki ločuje obe orientacijski ureditvi.

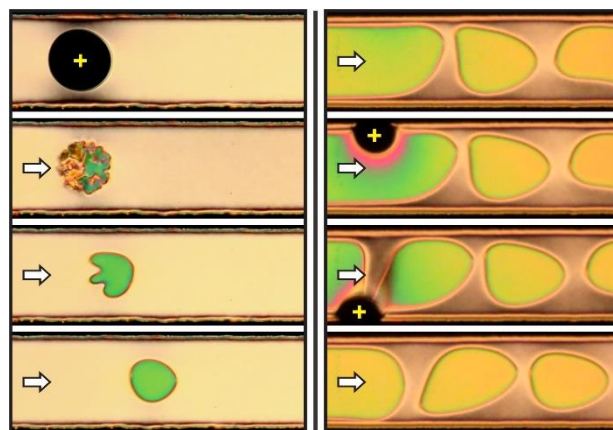
Večji gradienti hitrosti povzročajo hidrodinamski navor na nematsko ureditev, zato se pri močnih tokovih skozi kanalček direktor v glavnem poravnava v smeri toka (slika 2, spodaj). Tak nezvezni strukturni prehod spremlja nastanek defektne linije, ki razmeji območji z različnima orientacijama molekul. Eksperimentalni prikaz in teoretično razlago teh stanj smo že pred časom opisali v izvornem znanstvenem članku [5], tokrat pa se osredotočamo na lokalno vzbuditev takšnega »pobeglega« stanja z optično pinceto.

4. Rezultati

Za tvorbo defektov v toku tekočega kristala smo uporabljali lasersko pinceto, ki z močnim laserskim snopom (cca. 200 mW

na vzorcu) lokalno segreje nematik nad temperaturo prehoda v izotropno fazo. Pod polarizacijskim mikroskopom opazimo to »taljenje« v obliki črnega kroga, ki se po izklopu laserskega snopa hipoma preoblikuje v gručo defektov, le-ta pa zaradi toka v celoti ne izgine, temveč se pretvori v domeno z drugače poravnanim direktorskim poljem (slika 3, levo). Na ta način torej lokalno zmotimo homogeno poravnano tekoči nematik in mu vsilimo metastabilno stanje, ki se zaradi prisotnosti hidrodinamskega toka obdrži v obliki domene s polarnim redom, ki jo omejuje defektna zanka.

Govorimo o t.i. domeni s pobeglo strukturo znotraj pravokotno poravnane nematske ograditve, ki lahko obstane nad kritično vrednostjo hitrosti toka [8]. Stabilnost takih domen je pogojena tudi s kritičnim radijem, ki je odvisen od elastičnosti materiala, viskoznosti, hitrosti toka in linijske napetosti defektne zanke.



Slika 3: Tvorjenje nematskih domen s pobeglo strukturo v mikrokanalčku s stacionarnim pretokom in uporabo laserske pincete. Nematsko fazo lokalno segreje in hipoma ohladimo po izklopu laserskega snopa, kar povzroči kondenzacijo defektov in formiranje domene, ki potuje s tokom (levo). Večje območje pobegle strukture lahko elegantno »razrežemo« na manjše kose s prižganim laserjem, ki se nadzorovano premika prečno na smer toka (desno). S tako manipulacijo dosežemo nadzor nad obliko in velikostjo domen.

V mikrofluidičnem okolju lahko proste, plavajoče nematske domene nadzorovano krmilimo s prilagajanjem pretoka. V šibkem toku je njihov življenjski čas omejen na nekaj sekund, v moduliranem toku pa se lahko podaljšuje v nedogled, saj s tokom poravnano direktorsko polje sledi smeri in jakosti zunanjih sil, ki ga vzdržujejo v energijsko ugodnem stanju. Ugotovili smo, da lahko takšnim domenam spreminjamo velikost bodisi s prilagajanjem hitrosti toka bodisi z laserskim snopom, ki zlahka tali fazno mejo in na tak način segmentira veliko domeno v več manjših (slika 3, desno). Domene s pobeglo strukturo preživijo tudi hitre menjave smeri toka, saj se direktorsko polje obrača v ravnini kanalčka in pri tem generira dodatne točkovne defekte, povezane s solitoni, ki se hitro anihilirajo ob ograjajočih površinah [8].

5. Zaključek

V članku sva predstavila osnove strukturiranja neravnovesnih nematskih tekočin z mikrofluidičnimi tokovi in laserskimi pulzi. Prikazana metoda ponuja izjemne možnosti za natančno in kontrolirano oblikovanje mikroskopskih defektnih struktur v toku kompleksnih tekočin, saj je njihov odziv na

zunanje motnje sklopljen z viskoelastičnimi in reološkimi lastnostmi materialov. Rezultati eksperimentov, numeričnih simulacij in teoretičnega modela, predstavljeni v originalnem članku [8], odpirajo nove možnosti raziskav neravnovesne dinamike v aktivnih snoveh in bioloških sistemih z nematskim redom ter obenem omogočajo uporabo predlaganih konceptov za selektivno enkapsulacijo dispergiranih molekul v laminarnem tokovnem režimu.

Zahvala

Zahvaljujeva se kolegom in sodelavcem, ki so prispevali k nastajanju in objavi članka [8], ter Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), ki je v okviru programa P1-0055 in projekta L1-8135 finančno podprla najina prizadevanja in aktivnosti.

Literatura

[1] N.-T. Nguyen, S. T. Wereley, *Fundamentals and Applications of Microfluidics* (Artech House, Boston, 2002).

[2] E. K. Sackmann, A. L. Fulton, D. J. Beebe, *Nature* 507, 181 (2014).

[3] R. G. Larson, *The Structure and Rheology of Complex Fluids* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1999).

[4] J. G. Cuennet, A. E. Vasdekis, L. De Sio, D. Psaltis, *Nature Photon.* 5, 234 (2011).

[5] A. Sengupta, U. Tkalec, M. Ravnik, J. M. Yeomans, C. Bahr, S. Herminghaus, *Phys. Rev. Lett.* 110, 048303 (2013).

[6] L. Giomi, Ž. Kos, M. Ravnik, A. Sengupta, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, E5771 (2017).

[7] X. Wang, D. S. Miller, E. Bukusoglu, J. J. de Pablo, N. L. Abbott, *Nature Mater.* 15, 106 (2016).

[8] T. Emeršič, R. Zhang, Ž. Kos, S. Čopar, N. Osterman, J. J. de Pablo, U. Tkalec, *Sci. Adv.*, 5, eaav4283 (2019).