

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Slavomír Pírk, CSc.

VÝZKUM A APLIKACE KAPALNÝCH KRYSTALŮ  
CHIRÁLNÍHO TYPU

Inaugurační přednáška ke jmenování profesorem v oboru aplikované fyziky



**Vysoké učení technické v Brně**  
BRNO 2000

ISBN 80-214-1635-1

© 2000 S. Pirkl

## Představení autora

Po absolvování Vysoké školy chemicko-technologické v Pardubicích v roce 1964 se autor věnoval výzkumu krystalizace v rámci řádné aspirantury na téže škole. Hodnost kandidáta věd získal v roce 1971 na VŠCHT v Praze obhájením disertační práce „Využití ultrazvuku při studiu krystalizace“. Ultrazvuk byl přitom používán jednak pro účely měřicí (rychlost a absorpce) jednak pro aktivní ovlivňování procesu. V následujících letech se autor zabýval jako odborný pracovník na VŠCHT v Pardubicích řešením výzkumných úkolů v oboru kapalných krystalů. Až do roku 1989 se podílel ev. byl odpovědným řešitelem dílčích úkolů SPTR, SPZV a řady hospodářských smluv s průmyslem, v rámci nichž byly aplikovány výsledky orientovaného základního výzkumu. Hlavní náplní jeho práce přitom byl výzkum optických a elektrooptických vlastností kapalných krystalů chirálního typu a jejich aplikace. Pedagogické činnosti se mohl věnovat pouze okrajově při vedení laboratoří a diplomových prací, event. příležitostnými přednáškami na téma kapalných krystalů. V roce 1990 autor absolvoval na VŠCHT v Pardubicích habilitační řízení s prací na téma „Aplikační aspekty kapalných krystalů chirálního typu“. V témž roce byl také převeden mezi pedagogické pracovníky jako docent a kromě vedení diplomových prací (celkem 7 konzultováno, 24 vedeno) zahájil přednášky v předmětech „Vybrané experimentální metody“ (fyzikální metody charakterizace kondenzované fáze) a „Teoretické základy výroby práškovitých materiálů“ (optické, elektrické a magnetické vlastnosti pevných látek). V roce 1994 přešel autor na katedru fyziky chemicko-technologické fakulty Univerzity Pardubice, kde přednáší a vede teoretická i laboratorní cvičení v předmětu Fyzika 1,2 a podílel se na vydání tří nových skript. Pro studenty specializací zavedl (s pomocí grantu FR VŠ) nový předmět „Moderní mikroskopické metody“. Byl spoluřešitelem grantu FR VŠ „Modernizace laboratoří pro výuku fyziky“. Na podporu své výzkumné činnosti v oboru kapalných krystalů získal jako spoluřešitel dva granty GA ČR a jako řešitel česko-francouzský grant BARRANDE.

Je autorem event. spoluautorem 23 vědeckých prací v mezinárodních časopisech, 35 prací v českých časopisech, 31 příspěvků na mezinárodních a 28 příspěvků na domácích konferencích, 10 výzkumných zpráv k řešení státních úkolů, 27 hospodářských smluv, 6 autorských osvědčení event. patentů, aj.

V letech 1983 až 1989 byl autor členem mezinárodního řídicího a organizačního výboru pro organizování konferencí o kapalných krystalech, v roce 1987 předsedal organizačnímu výboru v pořadí sedmé konference (7<sup>th</sup> LCCSC). Od roku 1990 každoročně absolvoval několikátýdenní až několikaměsíční pobyt na oddělení fyziky Ecole Normale Supérieure v Lyonu, kde se v týmu prof. Oswalda podílel na výzkumu chování kapalných krystalů v elektrickém poli a na výchově několika doktorandů. Tato spolupráce trvá dodnes. Od roku 1991 je členem International Liquid Crystal Society.

Již více než sto let se setkáváme s paradoxním názvem kapalných krystalů, který označuje látku spojující v sobě udivujícím způsobem makroskopické chování kapalin a pravidelného uspořádání krystalů. Jejich historie sice začíná v Praze rokem 1888, bohužel se jednalo jen velmi krátkou několikaletou epizodu, která pro další rozvoj tohoto oboru v českých zemích nic neznamenala. Ostatně i ve světě byly kapalných krystalů dlouhá desetiletí pokládány za pouhou kuriozitu hodnou pouze akademického zájmu. Teprve v šedesátých letech minulého století se objevily první možnosti jejich praktického využití a od té doby má základní i aplikovaný výzkum kapalných krystalů trvale rostoucí tendenci.

Současné rozsáhlé praktické využití kapalných krystalů je založeno především na skutečnosti, že mezimolekulární vazebné síly v nich jsou podstatně slabší než v krystalech pravých. Jejich strukturu ev. texturu, a tím i jejich optické vlastnosti, lze tedy snadno ovlivňovat různými vnějšími vlivy, jako je např. teplota, tlak, elektrické a magnetické pole, aj.

První návrhy na praktické využití kapalných krystalů se týkaly teplotního mapování a detekce organických par a podstatnou roli přitom sehrály zářivé a proměnlivé barvy tzv. cholesterických resp. chirálních nematických kapalných krystalů se šroubovitou strukturou. Jejich schopnost měnit výrazně barvu v závislosti na teplotě našla rozsáhlé uplatnění zvláště v lékařství ale i v řadě technických oborů, např. v tepelné nedestruktivní defektoskopii, a to v podobě vratných a nevratných barevných teplotních indikátorů s vysokou teplotní a geometrickou rozlišovací schopností.

Éra praktického využívání kapalných krystalů v elektrooptice začíná počátkem sedmdesátých let, kdy byly objeveny první vhodné kapalných krystalů schopné existence při pokojové teplotě. Brzy na to pak byly zavedeny do výroby první displeje na bázi strukturně nejjednoduššího typu kapalných krystalů, tzv. nematických. V krátké době však i v této oblasti začaly nabývat stále větší důležitost šroubovitě struktury, které přinesly významné zlepšení parametrů elektrooptických prvků, jako je např. zvýšení kontrastu, lepší multiplexní ovládání, bistabilní chování, urychlení elektrooptických jevů, barevnost aj. V současné době jsou chirální kapalných krystalů dominantní jak ve výrobě tak i ve výzkumu. Zvláštní pozornost je věnována chirálním smektickým kapalným krystalům typu C s feroelektrickými vlastnostmi, které otevírají cestu k realizaci nové generace bistabilních zobrazovačů s vysokou hustotou informací.

Já pokládám za šťastnou shodu okolností, že jsem se mohl zapojit do výzkumu kapalných krystalů již koncem šedesátých let. Zpočátku jsem se zabýval výzkumem klasických cholesterických kapalných krystalů na bázi esterů cholesterolu, který se podařilo orientovat tak, že jeho výsledky našly významné praktické uplatnění. Tím se podařilo zachytit nástup cholesterických teplotních indikátorů v lékařství a Československo patřilo k prvním zemím, kde

byla ve spolupráci s Radiologickou klinikou v Hradci Králové a Lachemou Brno zavedena termografie kapalnými krystaly do rutinní praxe. Podařilo se toho dosáhnout díky komplexnímu řešení celé problematiky, tj. nejen vyvinutím originálního složení indikátorů, ale i všech pomocných prostředků k efektivnímu provádění termografie.

Vyvinuté teplotní indikátory se dobře uplatnily i v technické praxi, např. při mapování mikrovlnných polí, i při nedestruktivní defektoskopii, např. polovodičových součástek nebo kompozitních konstrukčních materiálů.

Možnosti praktického využití cholesterických kapalných krystalů s teplotně nezávislým zbarvením (vhodné např. pro piezoindikátory, optické filtry, dichroická zrcadla, nevratné teplotní indikátory aj.) vedly také k výzkumu směsí pravo- a levotočivých esterů cholesterolu. Ten vyústil v nalezení postupu formulování složení vícesložkových monochromních směsí s prakticky teplotně nezávislým selektivním rozptylem světla požadované vlnové délky. V návaznosti na to pak byl patentován nový způsob impulsní tepelné nedestruktivní lokalizace vad. Tato metoda využívá nevratné cholesterické teplotní indikátory, které se nevratně odbarvují po překročení jejich kritické teploty o méně než 0,1 °C, a umožňují velmi přesně zachytit i přechodné teplotní anomálie odhalující výskyt defektu.

Koncem osmdesátých let byl výzkum klasických cholesterogenů na našem pracovišti ukončen a nahrazen výzkumem elektrooptických vlastností kapalných krystalů chirálního typu, zpočátku nematických posléze pak i smectických s feroelektrickými vlastnostmi. Výzkumem této problematiky se zabývám dodnes, hlavně díky otevřením se možnostem mezinárodní spolupráce v posledním desetiletí. Výzkum byl a je zaměřen na chování chirálních typů kapalných krystalů v elektrickém poli s cílem zvýšit kontrast a dynamické vlastnosti elektrooptických buněk a přispět k lepšímu pochopení elektrooptických jevů, které v nich nastávají. Na rozdíl od termochromních kapalných krystalů jsou pro elektrooptické aplikace nezbytné dielektricky anizotropní kapalně krystaly s nízkou viskozitou. Jejich molekuly musí být silně polarisovatelné ev. obsahovat funkční skupiny s permanentním dipólem.

Výsledky je možno shrnout následovně:

Při výzkumu chování chirálních nematických kapalných krystalů v elektrickém poli byly nejprve získány důležité poznatky o vlivu periodicity šroubovitě struktury mezofáze na dynamické vlastnosti elektrooptických buněk a poznatky významné pro realizaci elektrooptických buněk s dichroickými kapalnými krystaly, které jsou čitelné i v nepolarizovaném světle. Zvláštní pozornost byla přitom věnována chování kapalných krystalů s negativní anisotropií permitivity, které v kombinaci s pozitivně dichroickými barvivy dávají možnost realizace zobrazovačů s kladným kontrastem.

Výsledky byly aplikovány :

- 1) Při realizaci prvního československého funkčního vzorku displeje již v roce 1972.
- 2) Při inovaci výroby displejů s kapalnými krystaly v a.s. TESLA Vrchlabí (1982-89).

Jednalo se především o zlepšování voltkontrastních charakteristik a dynamických vlastností displejů tvistového typu a o inovaci výroby speciálních elektrooptických zobrazovačů typu guest-host, čitelných v nepolarizovaném světle. Přitom byla využívána speciální aparatura sestavená pro komplexní sledování vlastností elektrooptických buněk s kapalnými krystaly v teplotním rozsahu  $-30$  až  $+90$  °C.

- 3) Při vývoji velkoplošné elektrooptické uzávěrky ve spolupráci s MONOKRYSTALY

Turnov. V roce 1987 byla dosažena doba sepnutí ca 1 ms při teplotě  $-30$  °C a kontrastní poměr 1 : 500. Optická propustnost (limitovaná polarizátory) však nevyhovovala pro uvažované účely. Tyto výsledky však posléze našly civilní uplatnění (ad 4).

- 4) Při zavedení výroby svářečské kukly Arcus Opto s automaticky zatmívaným zorníkem podle čs. patentu jehož jsem spoluautorem v TESLA Vrchlabí a.s. (1989-1994).

Z dalších menších zajímavých aplikací poznatků orientovaného základního výzkumu kapalných krystalů lze jmenovat např. světelný modulátor pro blízkou IČ oblast a elektricky říditelný plošný teplotní indikátor s dvojfrekvenčním kapalným krystalem.

Po získání vhodných materiálů byl výzkum zaměřen i na chirální smektické kapalně krystaly typu C s feroelektrickými vlastnostmi, které by měly sehrát významnou roli při realizaci nové generace elektrooptických zobrazovačů. Zde se při výzkumu vlastností elektrooptických buněk s povrchově stabilizovaným feroelektrickým kapalným krystalem (tzv. SSFLC cells) podařilo stanovit podmínky přípravy bistabilních buněk s vysokým kontrastem a podat i teoretické vysvětlení bistability tzv. periodické textury III. Ve spolupráci s Fyzikálním ústavem AV ČR je tato problematika i nadále zkoumána v rámci grantových projektů GA ČR. Mimo jiné bylo prozkoumáno několik desítek nově syntetizovaných mezogenních sloučenin z nichž většina tvořila feroelektrickou mezofázi. Nejvyšší hodnoty spontánní polarizace dosahovaly hodnoty až  $300 \text{ nC/cm}^2$ . Nedořešený zatím bohužel zůstává úkol nalézt nové látky tvořící antiferoelektrickou mezofázi, která umožňuje realizovat elektrooptické buňky s tristabilním chováním. Výsledky přispěly i k potvrzení souvislostí mezi stavbou molekuly a mezogenními vlastnostmi.

Od roku 1990 se věnuji ve spolupráci s oddělením fyziky na Ecole Normale Supérieure v Lyonu výzkumu chování cholesterických kapalných krystalů a jejich topologie v elektrickém poli za podmínek homeotropního kotvení na elektrodách. Problematika je často označována jako výzkum frustrovaných tenkých vrstev chirálních nematických kapalných krystalů. Přitom se

podařilo objevit 3 nové typy zárodečných útvarů cholesterické mezofáze (tzv. prstů - Cholesteric Fingers, CF), pohyb již známých typů prstů (tzv. crawling fingers CF-1) a dále pak objasnit podmínky vzniku a chování spirálovitě rostoucích prstů (tzv. spiraling fingers CF-3). Všechny čtyři typy (obr. 1) se podařilo pozorovat v monomerních kapalných krystalech vůbec poprvé při studiu chování cholesterické mezofáze během tzv. směrového tuhnutí (directional solidification). Při něm elektrooptická buňka prochází definovanou rychlostí skrze silný teplotní gradient a prsty vyrůstají z rozhraní mezi izotropní fází a cholesterickou mezofází. Topologické modely prstů v řezu kolmo k podélné ose, které byly získány numerickou simulací, jsou znázorněny na (obr. 2).

Typické uspořádání experimentu pro pozorování vlivu elektrického pole je následující (obr. 3). Kapalným krystal je umístěn mezi dvě skleněné desky s průhlednými ITO elektrodami (oddělenými stop-vrstvou zamezující difúzi iontů ze skla). Jeho klidové uspořádání určují speciální vrstvy na povrchu elektrod, které mají specifický orientující účinek na tyčinkovité molekuly kapalného krystalu. Rovnoměrná vzdálenost elektrod (několik  $\mu\text{m}$  až několik desítek  $\mu\text{m}$ ) je buď pevně vymezena distančními podložkami nebo je možno ji plynule měnit definovaným způsobem. Pro některé výzkumné účely se velmi dobře osvědčily i klínovité buňky. Pozorování při definované teplotě se provádí mikroskopem (zpravidla v polarizovaném světle) kolmo k rovině buňky. Souběžně je možno vyhodnocovat časový průběh intenzity procházejícího světla event. zaznamenávat probíhající děje přes CCD kameru videorekordérem a následně je vyhodnocovat počítačovým systémem. Právě to umožnilo prvně pozorovat a interpretovat řadu překvapujících dějů i v soustavách, které byly pokládány za již nezajímavé.

Typický vzhled prozatím nejlépe prozkoumaných prstů CF-1 a CF-2 mezi zkříženými polarizátory vidíme na obr. 4. Tmavé pole představuje nematickou mezofázi s molekulami orientovanými kolmo k elektrodám, ve směru optické osy. Uvnitř prstu se orientace molekul mění složitým způsobem, který byl schematicky ukázán v topologických modelech. K nejvýznamnějším výsledkům patří zjištění, že rovnováha mezi cholesterickou mezofází a izolovanými prsty má dynamický charakter, tj. že prsty se při kritickém napětí pohybují zachovávající svoji velikost. CF-1 se pohybují ve směru podélné osy, CF-2 kolmo k ní. Na rozdíl od CF-1 má CF-2 stejné konce obsahující bodový defekt v blízkosti elektrod.

Při mírně podkritickém napětí rostou CF-2 v podobě pravidelných jednoduchých či dvojitéch spirál Archimedova typu (obr. 5). Vnitřní konec volně rostoucí spirály opisuje kružnici, vnější konec logaritmickou spirálou (obr. 6). Rychlost obou konců je konstantní, rychlost prodlužování spirály se však s časem zvyšuje v důsledku driftu. Vše samozřejmě závisí

komplikovaným způsobem na intenzitě elektrického pole a na tom probíhá-li růst ve vodivostním nebo dielektrickém režimu.

Experimentálně i teoreticky byly také stanoveny fázové diagramy (obr. 7), které vymezují v souřadnicích intenzita elektrického pole - frustrační poměr  $C = d/p$  existenční oblasti různých variant cholesterické mezofáze s negativní i pozitivní anizotropií permitivity (d-vzdálenost elektrod, p-stoupání šroubovitě struktury).

K analýze i odvození tohoto termodynamického fázového diagramu rozvíjení cholesterické mezofáze v elektrickém poli byla použita Frankova rovnice pro objemovou hustotu volné energie:

$$F = 1/2 [ K_{11}(\text{div } \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \cdot \text{rot } \mathbf{n} + q_0)^2 + K_{33}(\mathbf{n} \times \text{rot } \mathbf{n})^2 - \epsilon_0 \Delta \epsilon (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})^2 ]$$

S - deformace      T - deformace      B - deformace      vliv el. pole

kde znamená:

$K_{ii}$  - elastické konstanty pro rozšíření, twist a ohyb (splay, twist, bend)

$q_0 = 2\pi/p_0$  - vlnový vektor,  $p_0$  - klidové stoupání šroubovitě struktury (pitch)

$\Delta \epsilon$  - anizotropie permitivity

$\mathbf{E}$  - intenzita elektrického pole

$\mathbf{n}$  - jednotkový vektor, který popisuje směr přednostní orientace molekul

Složky direktoru pro jednotlivý prst jsou definovány rovnicemi:

$$n_x = \cos\beta \sin\gamma \sin\alpha \cos\gamma - \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma \cos\alpha + \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma$$

$$n_y = -\sin\beta \sin\gamma \sin\alpha \cos\gamma - \cos\alpha \cos\beta \sin\gamma \cos\alpha + \sin\alpha \cos\beta \cos\gamma$$

$$n_z = \sin\alpha \sin\gamma \cos\alpha + \cos\alpha \cos\gamma$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad \lambda - \text{šířka prstu}$$

kde úhly  $\alpha, \beta, \gamma$  odpovídají znázornění orientace direktoru pomocí tzv. jednotkové sféry  $S^2$  (viz obr. 8a). Toto zobrazení si pro lepší názornost můžeme demonstrovat pro případ planární textury TIC (obr. 8b), kde jsou složky direktoru translačně invariantní konfigurace v horizontální rovině definovány s pomocí jednotkové sféry  $S^2$  jako (pro  $\gamma = 0$ ):

$$n_x = \sin\alpha(Z)\sin\beta(Z) \quad \alpha - \text{úhel mezi } \mathbf{n} \text{ a } \mathbf{e}_z$$

$$n_y = \sin\alpha(Z)\cos\beta(Z) \quad \beta - \text{úhel mezi projekcí } \mathbf{n} \text{ v } (\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y) \text{ rovině a } \mathbf{e}_y$$

$$n_z = \cos\alpha(Z) \quad Z = \pi z/d$$

Při postupu od jedné podložky ke druhé ve směru osy z opisuje koncový bod direktoru na horní polosféře  $S^2$  smyčku ve směru šipky. Bod N představuje kolmou (homeotropní) orientaci molekul k podložce, maximální odklon nastává uprostřed buňky.

Kombinací uvedených rovnic a minimalizací průměrné volné energie pro různé rovnovážné stavy byly při zanedbání objemových nehomogenit el. pole, flexoelektricity a el. vodivosti odvozeny rovnice pro spinodální napětí  $V_0$ , Landauův trikritický bod, trojný bod a další parametry, a to v dobré shodě s experimentem (s výjimkou hodnot  $V_{00}$ , které podle teorie vycházejí podstatně nižší).



V případě dielektricky negativní mezofáze stojí za pozornost zvláště rovnice pro  $V_0$  :

$$V_0(C) = \left[ -\frac{K_{32}}{4A} + \frac{C^2}{A \cdot K_{32}} \right]^{1/2} \quad \text{kde} \quad A = \frac{\Delta\varepsilon}{4\pi^2 K_{22}} \quad K_{32} = \frac{K_{33}}{K_{22}}$$

Z ní vyplývá, že rovnost  $C_0 = K_{32}/2$  platí pro  $V_0 = 0$  (obr. 7). Poměr elastických konstant  $K_{32}$  tedy neurčuje kritický frustrační poměr  $d/p$ , při kterém dochází ke spontánnímu rozvinutí šroubovice (tj.  $C_c$  pro  $V_2 = 0$ ) jak se běžně uvádí v literatuře (což vzbuzovalo falešné naděje na realizaci elektrooptických buněk typu nematic-cholesteric s téměř dvojnásobným zkrutem, viz dále). Platnost této rovnice byla potvrzena i experimentálně.

Vhodnou minimalizací Frankovy volné energie lze dospět s použitím numerických metod i k výpočtu rovnovážné konfigurace jednotkových vektorů v různých typech prstů. Problém je přitom pro zjednodušení zkoumán pomocí pouze dvojrozměrné analýzy, obvykle v rovině kolmé k podélné ose prstu. I tak jsou numerické výpočty značně komplikované a vyžadují velmi výkonný počítač.

Přestože tento výzkum byl (vzhledem k diametrálně změněným podmínkám po roce 1990 a vzhledem k zaměření pracoviště v Lyonu) koncipován jako základní, jeho výsledky přispěly k objasnění mechanismu některých prakticky využívaných elektrooptických jevů, umožnily klasifikovat tyto jevy a vyvrátit některé dlouho přetrvávající nesprávné názory např. ohledně řádu fázových přechodů a kritické tloušťky spontánního rozvíjení frustrované cholesterické mezofáze.

Konkrétně lze uvést příklad elektrooptické buňky s elektrickým polem indukovaným přechodem nematická-cholesterická mezofáze, který nastává v elektrooptických buňkách v nichž jsou při nulovém napětí molekuly dielektricky negativní mezofáze orientovány v celém objemu kolmo k elektrodám. Při zvyšování napětí dojde po překročení určité hodnoty  $V_2$  k vychýlení molekul z rovnovážné polohy a uprostřed buňky se začne vytvářet šroubovitá struktura, která posléze zaujme prakticky celý prostor mezi elektrodami. Z původně opticky jednoosé opticky neaktivní buňky vznikne opticky aktivní buňka s osou kolmou k elektrodám. Pokud je kapalný krystal dichroický, umožňuje to realizaci displeje čitelného bez polarizátorů. V případě pozitivního dichroizmu lze realizovat i žádanější variantu displeje s kladným kontrastem (tmavé znaky na světlém pozadí). Maximální optická propustnost odpovídá v tomto případě homeotropně orientované nematické mezofázi, všechny ostatní textury při zvýšeném napětí mají optickou propustnost sniženu, některé z nich navíc světlo rozptylují (obr. 9). Optická propustnost je přitom tím nižší čím více je šroubovitá textura zakroucena tedy čím vyšší je poměr  $d/p$  v dané buňce, který ovšem nesmí být vyšší než určitá kritická hodnota,  $C_c \approx 1$ ).

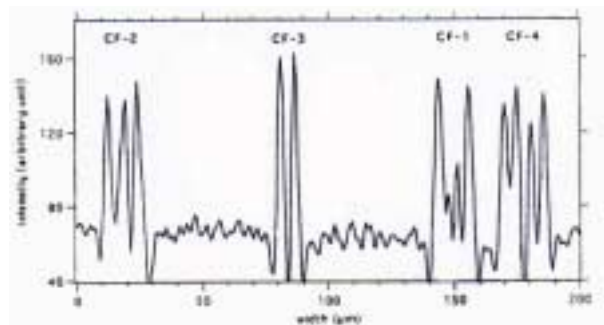
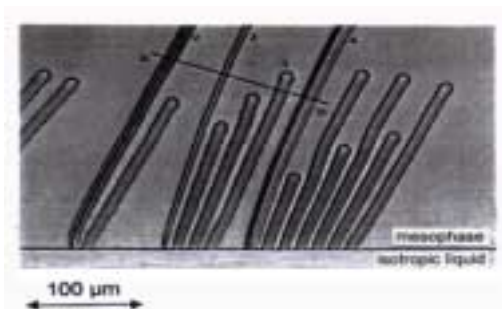
Z fázového diagramu ovšem vyplývá, že u buněk s příliš vysokým frustračním poměrem, které spadají do oblasti B, je nutno počítat při vypnutí s přechodným rozptylem [při režimu  $V(B) \leftrightarrow V(F)$ ] nebo s dlouhými dobami vypnutí [při režimu  $V(B) \leftrightarrow V(E)$ ]. Jako ideální se jeví přepínání mezi stavy  $V(A) \leftrightarrow V(F)$  v oblasti  $C < C_{tc}$ , které je rychlé a bez přechodného rozptylu. Spíše teoreticky je možno uvažovat o využití světlo rozptylujících stavů k realizaci displeje s třemi úrovněmi [bezbarvý stav  $V(B) \leftrightarrow$  barevný rozptylující stav  $V(E) \leftrightarrow$  barevný čirý stav  $V(F)$ ]. Všechny varianty přicházející v úvahu jsou shrnuty v tabulkách (tab. 1,2,3). Z experimentu přitom vyplývá, že k dosažení maximálního kontrastu je nutné používat cca dvoj až trojnásobek napětí  $V_{00}$ .

Teoretická analýza fázového diagramu umožnila také stanovit kriteria volby co nejhodnějšího kapalného krystalu podle elastických konstant tak, aby měl co nejvyšší hodnotu frustračního poměru odpovídajícího trikritickému bodu  $C_{tc}$ . Podle diagramu (obr. 10) je zřejmé, že takový kapalný krystal by měl mít nízkou hodnotu  $K_{32}$  a vysokou hodnotu  $K_{12}$ .

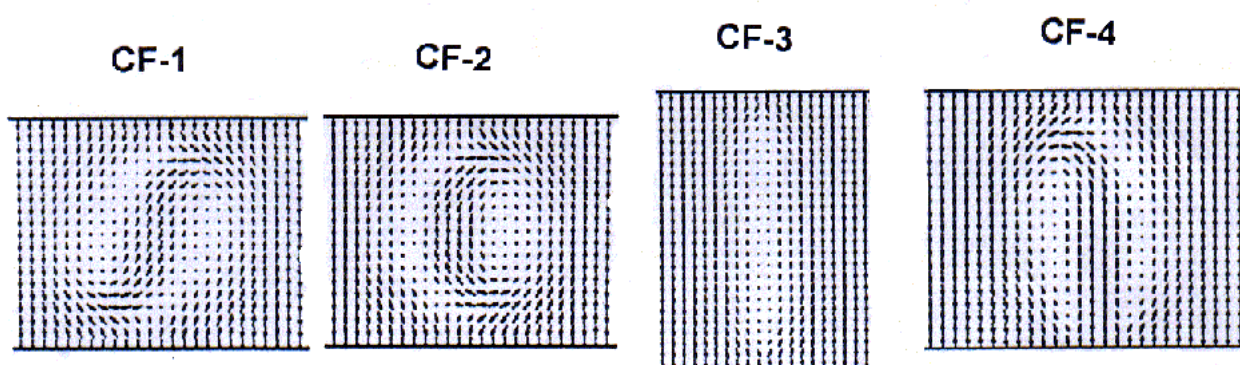
Výzkum chirálních kapalných krystalů je perspektivní i v budoucnosti, zvláště pak výzkum strukturně složitějších vrstevnatých kapalných krystalů. V případě chirální nematické mezofáze je zatím velmi málo známo o vlastnostech a podmínkách existence prstů CF-3 a CF-4. U prstů CF-1 a CF-2 nebyly zatím vysvětleny příčiny jejich pohybu na mikroskopické úrovni. Navržené modely neodpovídají současným poznatkům. Druhou oblast představuje problematika chirálních smectických kapalných krystalů s feroelektrickými vlastnostmi. Tento obor se nadále rychle rozvíjí což souvisí s již zmíněnou možností realizace nové generace displejů. Výzkum elektrooptických buněk typu SSFLC jakož i hledání nových látek s antiferoelektrickými vlastnostmi probíhá ve spolupráci s FzÚ AV ČR v rámci společného grantu GA ČR a počítá se s ním i do budoucna. Výzkum je zahrnut i do výzkumného záměru FCHT University Pardubice.

## Seznam vybraných publikací

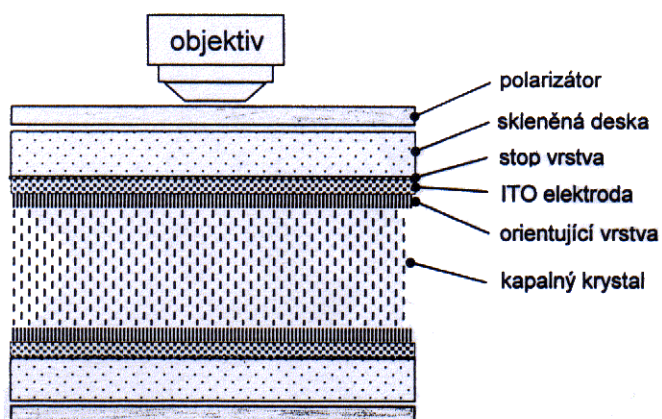
1. Pirkl S., Mýl J.: Optical and Rheological Properties of Binary Mixtures of Right-and Left-handed Cholesteric Liquid Crystals. *Advances in Liquid Crystal Research and Applications*. (Ed. Bata L.), Pergamon Press, Oxford 1980. s. 657.
2. Pirkl S., Tuček J.: Dynamic Properties of Electrooptic Cell with Twisted Nematic Liquid Crystal. *Sb. věd. prací VŠCHT Pardubice* 49, 289 (1986).
3. Pirkl S., Tuček J., Schiffmann V.: Ferroelectric Liquid Crystal Electrooptic Cell with High Contrast Bistability. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 192, 317 (1990).
4. Lejček L., Pirkl S.: Memory Effect in Thin Samples of Chiral Smectic C Liquid Crystals. *Liq. Cryst.* 8 (6) 871 (1990).
5. Ribiere P., Pirkl S., Oswald P.: Electric field induced phase transitions in frustrated cholesteric liquid crystals of negative dielectric anisotropy. *Phys. Rev. A* 44, 8198-8209 (1991).
6. Pirkl S., Tuček J.: Properties of electro-optic cells with chiral dichroic two-frequency liquid crystals and their use for thermal mapping. *Mol. Cryst. Liq. Cryst. A* 215, 323-330 (1992)
7. Pirkl S., Ribiere P., Oswald P.: Forming Process and Stability of Bubble Domains in Dielectrically Positive Cholesteric Liquid Crystals. *Liq. Cryst.* 13, 413 (1993)
8. Pirkl S., Tuček J., Ribiere P., Oswald P.: Performance of phase change dichroic liquid crystal displays. *Proc. Eurodisplay '93*, 297-300 (1993)
9. Pirkl S.: Electric-field-induced phase transitions in electro-optic cell with dielectrically negative chiral nematic liquid crystal. *Cryst. Res. Technol.* 28 (7), 1027-38 (1993)
10. Ribiere P., Oswald P., Pirkl S.: Crawling and spiraling of cholesteric fingers in electric field. *J. Phys. II (France)* 4, 127 (1994).
11. Pirkl S.: Phase diagram of two-frequency chiral nematic mixture in an electric field. *Liq. Cryst.* 16, 973 (1994).
13. Ribiere P., Pirkl S., Oswald P.: Optical properties of frustrated cholesteric liquid crystals. *Liq. Cryst.* 16, 203 (1994).
13. Pirkl S., Oswald P.: From bubble domains to spirals in cholesteric liquid crystals. *J. Phys. II (France)* 6, 355 (1996).
14. Baudry J., Pirkl S., Oswald P.: Topological properties of singular fingers in frustrated cholesteric liquid crystals. *Phys. Rev. E* 57, 3038 (1998).
15. Baudry J., Pirkl S., Oswald P.: Looped finger transformation in frustrated cholesteric liquid crystals. *Phys. Rev. E* 59, 5562 (1999).



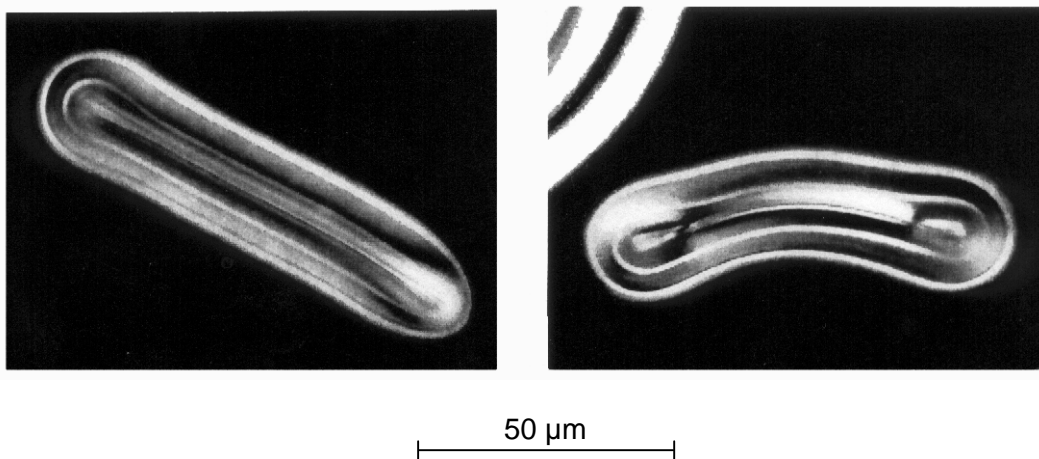
Obr. 1. a) čtyři typy cholesterických prstů rostoucích z rozhraní během směrového tuhnutí z rozhraní mezi cholesterickou a isotropní fází  
 b) profil optické hustoty podél linie a – b (nepolarizované světlo).



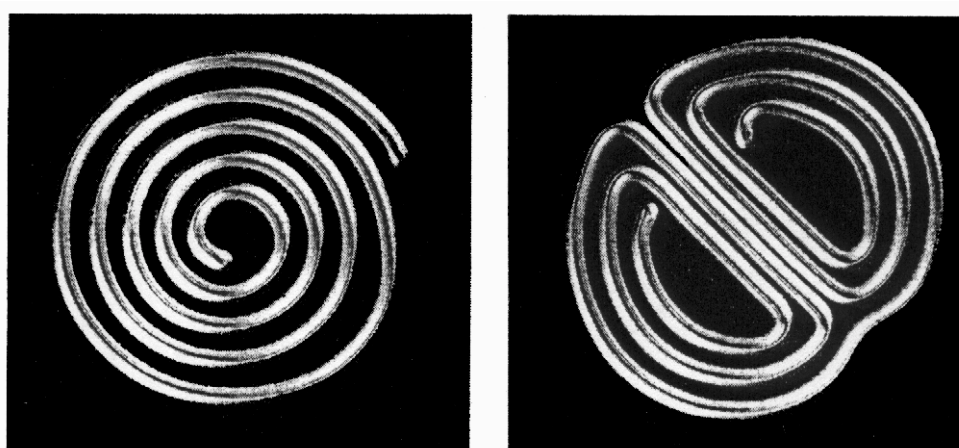
Obr. 2. Topologické modely cholesterických prstů v řezu kolmém k podélné ose (tečky reprezentují direktor kolmý k rovině řezu, čárky směr direktoru v rovině řezu a šipky direktor vykloněný z roviny řezu).



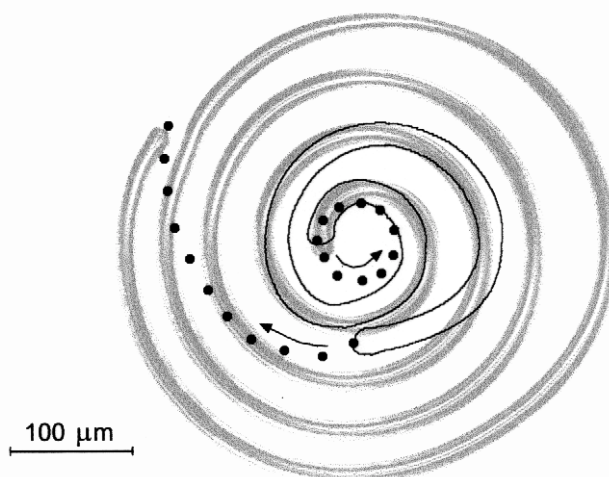
Obr. 3. Schéma elektrooptické buňky s kapalným krystalem



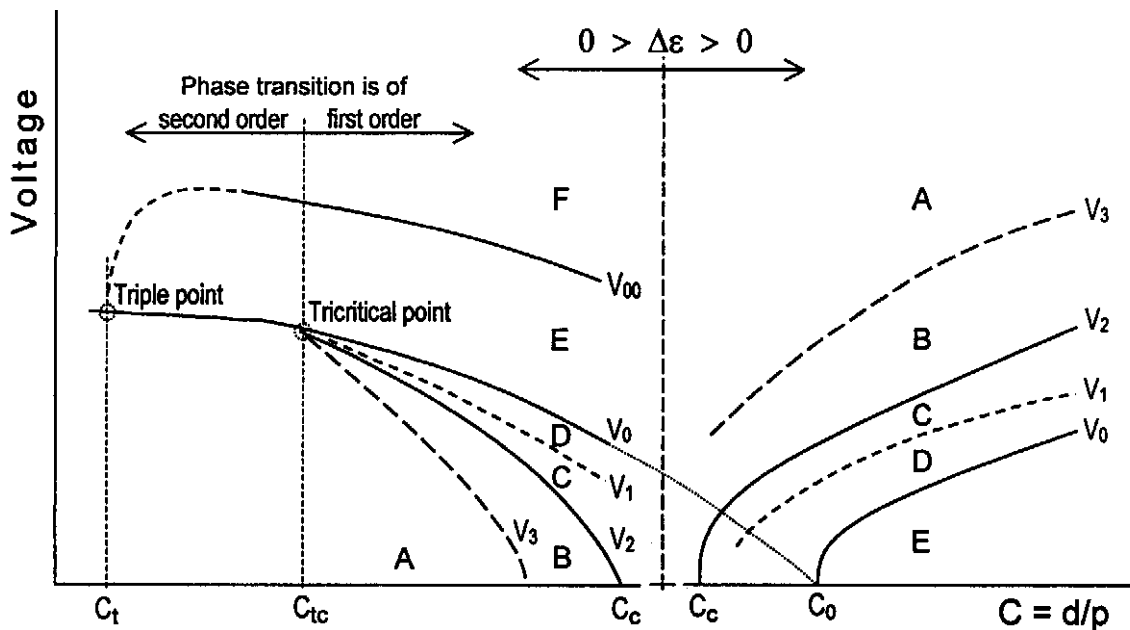
Obr. 4. Cholesterické prsty CF-1 a CF-2 mezi zkříženými polarizátory v rovnováze s okolní nematickou mezofází při kritickém napětí



Obr. 5. CF-2 rostoucí v podobě jednoduché a zdvojené spirály při mírně podkritickém napětí (mezi zkříženými polarizátory)

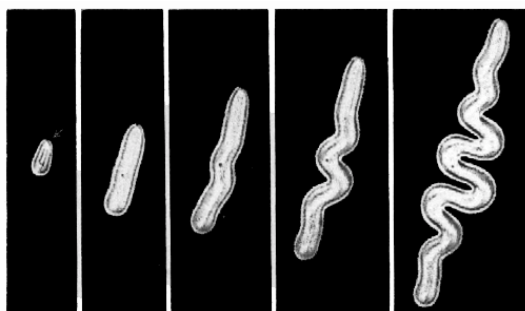


Obr. 6. Schematické znázornění růstu spirály CF-2 v elektrickém poli v časovém rozmezí 10 minut. Body označují pohyb konců spirály.



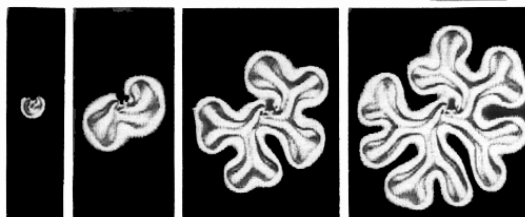
Obr. 7. Fázový diagram frustrované cholesterické mezofáze v elektrickém poli

- (A) Stablní homeotropní nematická fáze a nestablní cholesterická fáze (prsty zanikají okamžitě)
- (B) Stablní homeotropní nematická fáze a metastablní cholesterická fáze (prsty se plynule zkracují, jejich šířka je dobře definována)
- (C) Izolované prsty, které se jen prodlužují, metastablní homeotropní nematická fáze
- (D) Izolované prsty se při růstu větvi až zaplní celý prostor periodickou finger print texturou
- (E) Stablní periodická textura (zvlněná planární cholesterická textura)
- (F) Stablní planární cholesterická textura s optickou osou kolmou k elektrodám

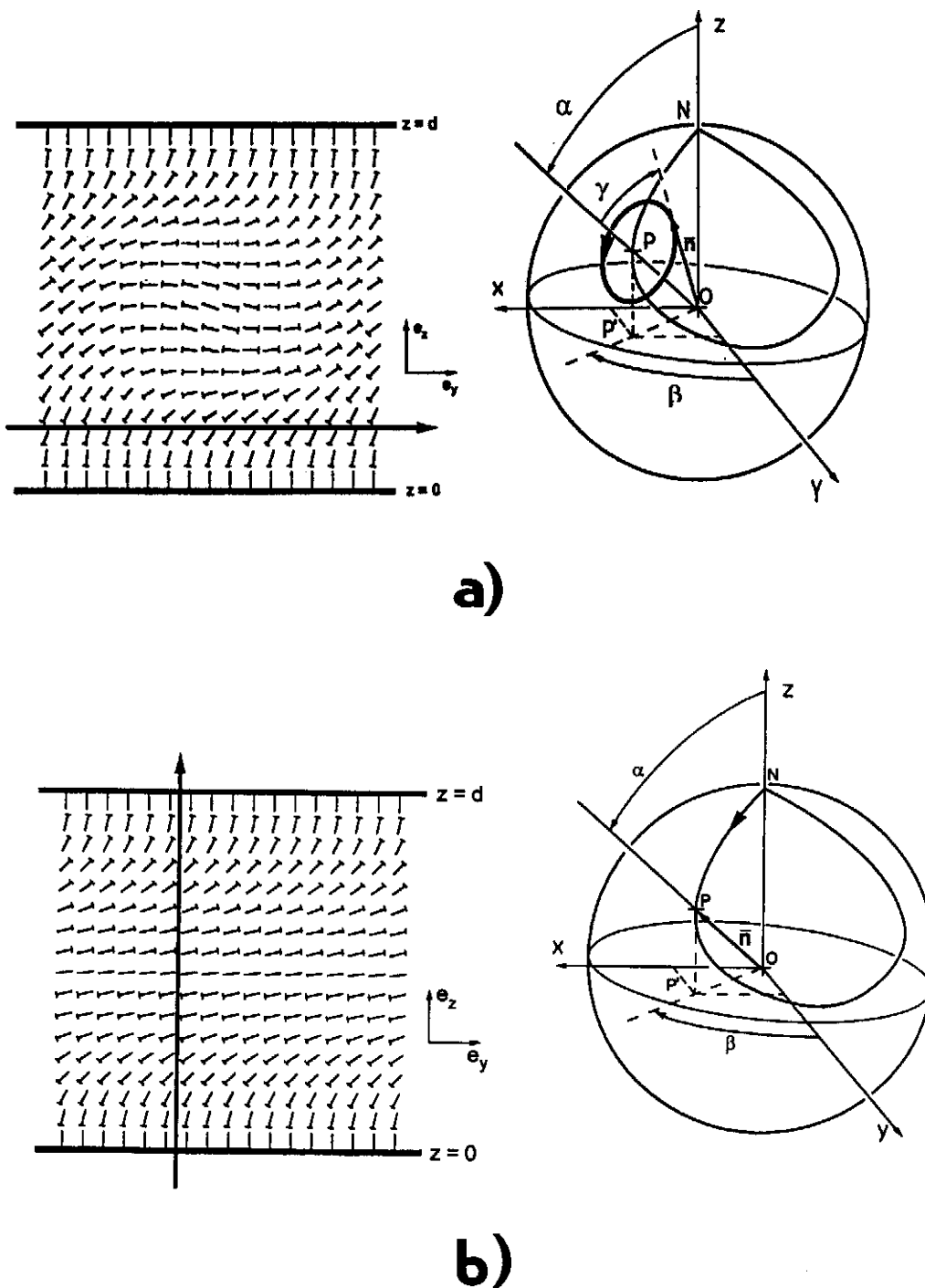


C

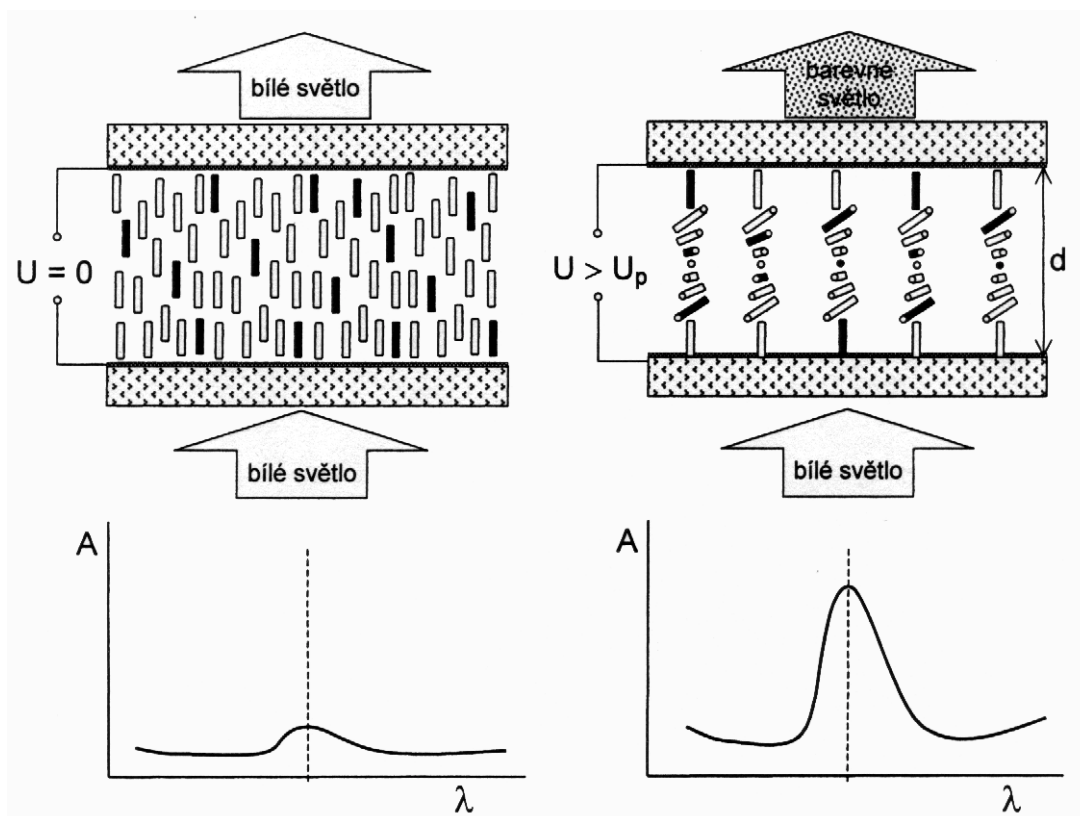
Způsoby růstu cholesterických prstů CF-1 oblastech D a C fázového diagramu



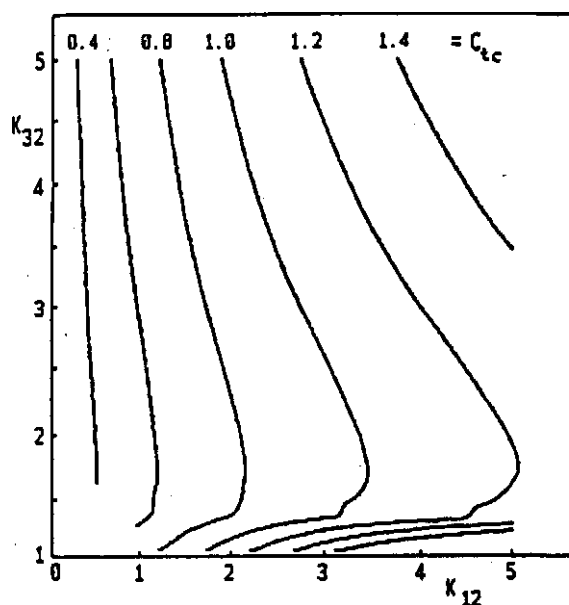
D



Obr. 8. Schematické znázornění orientace direktoru v buňce s homeotropním kotvením s pomocí tzv. hřebíkové metody (vlevo) a s pomocí pomoci jednotkové sféry  $S^2$  (vpravo)  
 a) napříč prstem CF-1 ve směru šípky  
 b) ve směru optické osy planární textury TIC  
 (tečky reprezentují direktor kolmý k rovině řezu, čárky směr direktoru v rovině řezu a „hřebíky“ direktor vykloněný z roviny řezu).



Obr. 9. Schematické znázornění funkce elektrooptické buňky s elektrickým polem indukovaným fázovým přechodem " nematic  $\leftrightarrow$  cholesteric " v nepolarizovaném světle. Tyčinky znázorňují molekuly kapalného krystalu (světlé) a barviva (tmavé). ( $d < p$ , pozitivně dichroické barvivo rozpuštěné v chirálním kapalném krystalu s  $\Delta\epsilon < 0$ , homeotropní kotvení na elektrodách)



Obr. 10. Diagram elastických konstant  $K_{32} - K_{12}$  pro volbu  $C_{tc}$  ve směsi ROCHE 2860



Table 1 . Feasible dichroic display types with positive contrast without polarizers ( $\Delta\epsilon < 0$ )

$C = d/p$	SWITCHING MODE	DISPLAY TYPE
$C_i < C < C_{ic}$	<p style="text-align: center;">Positive dichroic dye</p> <p style="text-align: center;">V(A) <math>\longleftrightarrow</math> V(E) <math>\longleftrightarrow</math> V(F)</p> <p style="text-align: center;">V(A) <math>\longleftrightarrow</math> V(F)</p> <p>homeotropic [colorless]      periodic pattern [color]      planar texture [color]</p> <p style="text-align: right;">slightly scattering      non-scattering</p>	2-level
$C_{ic} < C < C_e$	<p style="text-align: center;">Positive dichroic dye</p> <p style="text-align: center;">V(B) <math>\longleftrightarrow</math> V(E) <math>\longleftrightarrow</math> V(F)</p> <p>homeotropic [colorless]      periodic pattern [color]      planar texture [color]</p> <p style="text-align: right;">scattering      non-scattering</p>	3-level
$C_{ic} < C < C_e$	<p style="text-align: center;">Mixture of positive and negative dichroic dye</p> <p style="text-align: center;">V(B) <math>\longleftrightarrow</math> V(E) <math>\longleftrightarrow</math> V(F)</p> <p>homeotropic [colorless]      periodic pattern [color I]      planar texture [color II]</p> <p style="text-align: right;">scattering      non-scattering</p>	3-level

Table 2 . Performance of dichroic displays with positive contrast without polarizers ( $\Delta\epsilon < 0$ )

DISPLAY	FRUSTRATION RATIO C	CONTROL VOLTAGE V
Two-level	necessary $C < C_e$ the best $C < C_{ic}$	1st level $V < V_3$ 2nd level $V > V_o$ or $V > V_{oo}$
Three-level	$C_{ic} < C < C_e$	1st level $V = 0$ 2nd level $V_o < V < V_{oo}$ 3rd level $V > V_{oo}$

Table 3 . Feasible switching modes for displays with positive contrast (positive dichroic dye,  $\Delta\epsilon < 0$ ,  $C < 1$ )

SWITCHING MODE	TEXTURES AND COLOR CHANGE
V(A) $\longleftrightarrow$ V(F)	<p>homeotropic <math>\longleftrightarrow</math> TIC (planar texture)</p> <p>[colorless]      [color]</p> <p style="text-align: right;">non-scattering</p> <p>the best case - short switching times without scattering effects</p>
V(A) $\longleftrightarrow$ V(E)	<p>homeotropic <math>\longleftrightarrow</math> periodic patterns</p> <p>[colorless]      [color]</p> <p style="text-align: right;">slightly scattering</p> <p>lower control voltage but longer switching times</p>
V(B) $\longleftrightarrow$ V(F)	<p>homeotropic <math>\longleftrightarrow</math> TIC (planar texture)</p> <p>[colorless]      [color]</p> <p style="text-align: right;">non-scattering</p> <p>transient scattering effects at turn-off</p>
V(B) $\longleftrightarrow$ V(E)	<p>homeotropic <math>\longleftrightarrow</math> periodic patterns</p> <p>[colorless]      [color]</p> <p style="text-align: right;">scattering</p> <p>long switching times</p>
V(F) $\longleftrightarrow$ V(E)	<p>TIC (planar) <math>\longleftrightarrow</math> periodic patterns</p> <p>[color I]      [color II]</p> <p>non-scattering      scattering</p> <p>with mixture of positive and negative dichroic dyes</p>

Investigation and application of chiral liquid crystals  
Slavomír Pírk  
Department of Physics, University of Pardubice

Abstract

Chiral liquid crystals are very interesting material not only for investigation but also for practical application. Classic cholesteric liquid crystals on the basis of cholesteryl esters were used as reversible and irreversible temperature indicators or vapour indicators already in sixties. Electro-optic application of chiral nematic liquid crystals started in seventies and many different displays of this type are produced in bulk up to now. However, chiral smectic liquid crystals have recently been intensively investigated as a new electro-optic material for realisation of very fast bistable displays with high-density information. Author's results in all these fields are briefly presented in the inaugural lecture.

Moreover, static and dynamic properties of different so-called cholesteric fingers (CF) in electro-optic cells with topologic frustration are described. By changing either voltage  $V$  or the confinement ratio  $C$  defined as the ratio of the cell gap to the pitch ( $C=d/p$ ), the phase diagram for chiral nematic phase in the parameter plane ( $C, V$ ) has been determined experimentally and theoretically, too. Usefulness of this diagram for realisation of positive contrast dichroic displays with electric field induced nematic-cholesteric transition is shown.