

KAPALNÉ KRYSTALY

(Janča: přednáška, Mihálka: Optoelektronika)

Změny barvy lidského těla, živočichů a rostlin za určitých podmínek byly známy od pradávna. Koncem minulého století (1988) byly poprvé připraveny syntetické kapalné krystaly (**Liquid Crystal, LC**). Pod pojmem kapalný krystal rozumíme takové látky, které mají za přesně definovaných fyzikálních podmínek některé vlastnosti kapalin a jiné, typické pro běžné krystaly. Podle chemického složení se jedná o organické sloučeniny.

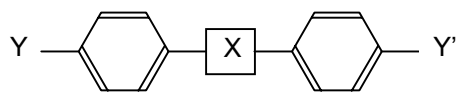
Stav (fázi), kdy se látky svými mechanickými vlastnostmi podobají kapalinám a elektrickými, magnetickými a optickými vlastnostmi polykrystalickým strukturám nazýváme mezomorfní stav. Mezomorfní stav je charakterizován vysokým stupněm uspořádání molekul na relativně velkých vzdálenostech. Pokud látka do mezomorfního stavu přechází vlivem teploty, nazývá se termotropní. Stejného efektu lze dosáhnout rozpuštěním původně krystalické látky ve vhodném rozpouštědle. Látky tohoto druhu se nazývají lyotropní.

Až v roce 1968 se přišlo na fyzikální skutečnosti, vhodné pro početné technické aplikace. Je to především citlivost na teplotu, tlak, elektrické a magnetické pole, záření, která umožňuje transformovat nejrůznější fyzikální veličiny na světelné signály. Zvláště výrazně se užitečnost kapalných krystalů projevuje ve zobrazovací technice (displeje).

Chemické sloučeniny, schopné tvořit kapalné krystaly jsou většinou aromatické sloučeniny, zřídka alifatické. Aromatické sloučeniny jsou odvozené od benzenového uhlovodíkového jádra (šest uhlíků ve vrcholech šestiúhelníku), alifatické pak od necyklických jader, hlavně metanu.

Kapalné krystaly

Stabilní mezofáze lze očekávat u sloučenin s následující strukturou molekuly



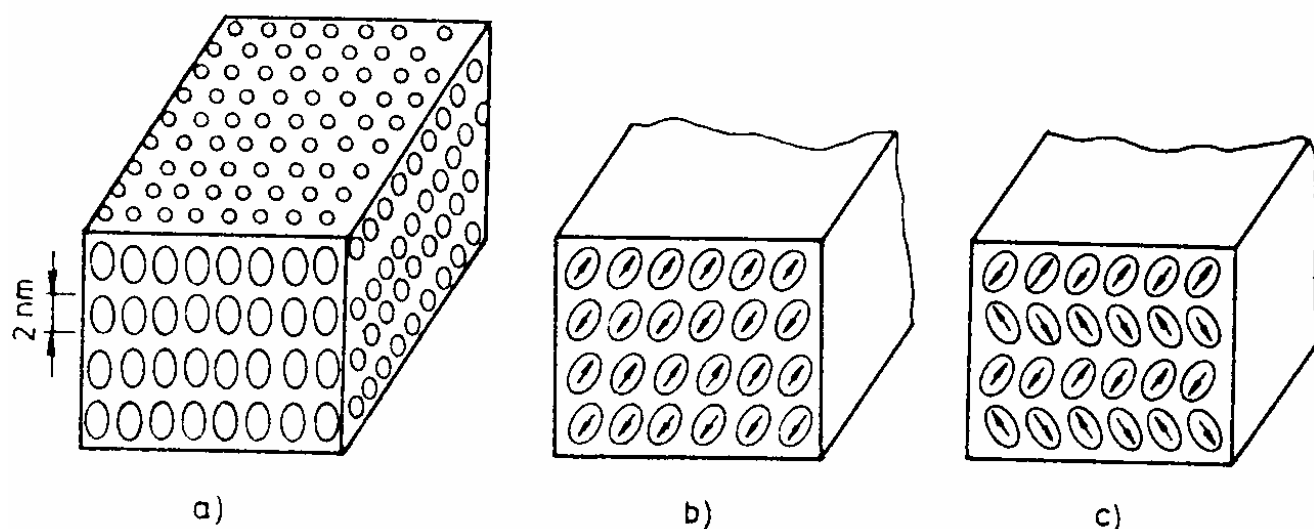
Centrální skupina X a koncové skupiny Y, Y' rozhodují o tom, zda bude nebo nebude sloučenina

mezomorfní. X, Y a Y' musí mít velké dipólové momenty a polarizovatelnost. Boční řetězce snižují schopnost k mezomorfismu.

Podle topologického uspořádání molekul nebo řetězců molekul v prostoru dělíme kapalné krystaly na

- a) smectické (smektika)**
- b) nematické (nematika)**
- c) cholesterické (cholesterika)**

SMEKTICKÉ KRYSTALY



**Obr. 1: Uspořádání molekul smektického kapalného krystalu (SLC),
b) antiparalelní orientace dipólů v sousedních vrstvách SLC,
c) antiparalelní orientace dipólů dvou sousedních molekul ve stejné vrstvě SLC.**

Vyznačují se dlouhými lineárními molekulami, které jsou uloženy v rovnoběžných vrstvách. Delší osy molekul mají délku asi 2 nm a vzhledem k povrchu krystalu mají stálou orientaci. Nejčastěji jsou na povrch kolmé (typ A), obrázek 1, jiné svírají s povrchem úhel závisící na teplotě (typ B). Smektika typu A se chovají jako jednoosé krystaly, typ B jako dvouosé krystaly.

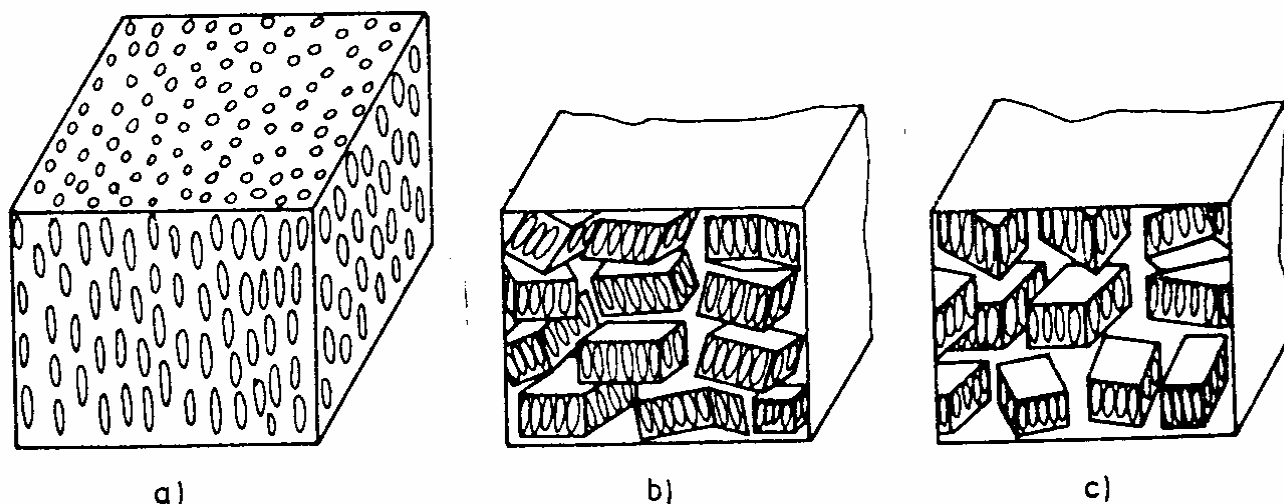
Existují i orientace, u kterých je i v jedné vrstvě orientace os ve dvou směrech. Podél vrstev lze smektika navzájem snadno posunovat.

Smektika mají díky vysoké viskozitě (vnitřní tření) nejblíže k pevným látkám.

V bodě tavení (přechod pevná fáze - kapalný krystal) dochází k uvolnění laterálních vazeb mezi jednotlivými vrstvami, které díky nízké vzájemné adhezi mohou po sobě klouzat bez újmy na uspořádanosti. Přechod kapalný krystal - izotropní kapalina je charakterizován porušením uspořádanosti ve vrstvě, které je způsobeno tepelným procesem (vibrace molekul).

NEMATICKÉ KRYSTALY (NLC)

Molekuly nematických kapalných krystalů nejsou uspořádány do konkrétních vrstev, těžiště molekul jsou stochasticky rozptýlena jako v normální kapalině, viz obrázek 2.

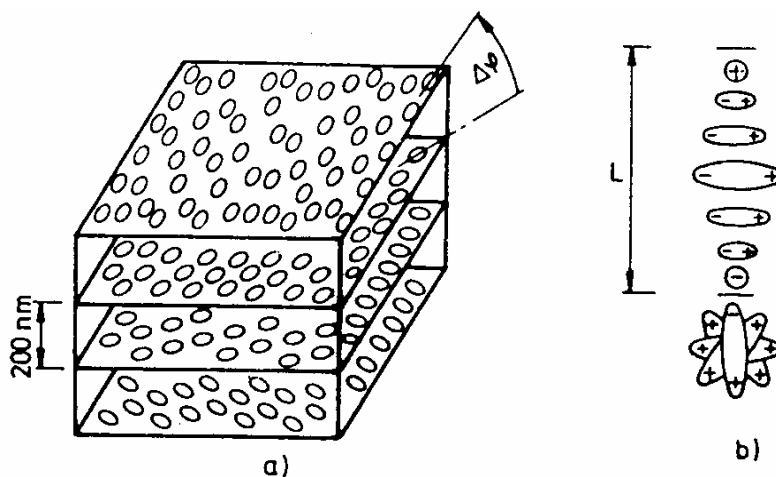


Obr. 2: Uspořádání molekul nematického kapalného krystalu (NLC), b), c) dvě možné pseudovrstvy nematického kapalného krystalu.

Těžiště nejsou nehybná, ale chaoticky se přesouvají. Molekuly jsou protáhlé (tyčinkovitého tvaru) a podél dlouhých os navzájem rovnoběžné. Tuto rovnoběžnost zachovávají i při svém pohybu, který se vyznačuje 4 stupni volnosti - translace ve směru os a rotace okolo dlouhé osy. Nematický kapalný krystal lze znázornit krabičkou zápalek ponořenou do kapaliny, ve které se mohou zápalky pohybovat uvedeným způsobem. Z vláknitého vzhledu byl odvozen i jejich název, z řeckého slova νημα = vlákno, drát.

Existují i pseudovrstevnaté struktury - něco mezi nematickou a smectickou strukturou. Molekuly budují domény, každá doména má odlišnou orientaci.

CHOLESTERICKÉ KRYSTALY (CLC)



**Obr. 3: Uspořádání molekul cholesterického kapalného krystalu (CLC),
b) nárys a pôdorys cholesterické spirály.**

Dostaly svůj název od cholesterolu, ze kterého se původně získávaly. Protáhlé molekuly jsou seřazeny do rovnoběžných vrstev vzdálených navzájem asi o 200 nm, tedy asi stonásobek vzhledem k smektikům (SLC). V každé vrstvě mají molekuly orientovanou dlouhou osu jedním směrem, který se však v jednotlivých vrstvách liší. Ve dvou sousedních vrstvách jsou osy molekul vůči sobě pootočené o konstantní úhel $\Delta\phi$, viz obrázek 3.

Úhel $\Delta\phi$ je různý pro různé materiály, nejčastěji bývá $\Delta\phi = 0,18^\circ$. To znamená, že po 1000 vrstvách jsou již osy antiparalelní. Celková tloušťka vrstvy kapalného krystalu k tomu potřebná bude: $200 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1000 \approx 0,2 \text{ mm}$. Podél osy kolmé na rovinu vrstev vytvářejí molekuly pod sebou spirálovitou plochu s periodou L (Obr. 3b). Tato periodická struktura, včetně jejích poruch je pozorovatelná polarizačním mikroskopem.

Kapalné krystaly

Pro cholesterické kapalné krystaly jsou charakteristické dvě textury:

- a) Grandjeanova
- b) dvojkuželová (ohniskově - kuželovitá).

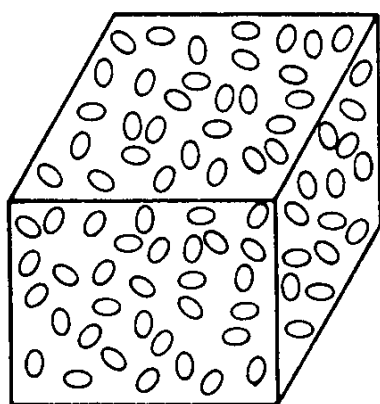
U Grandjeanovy textury jsou osy spirálových ploch orientovány kolmo na povrch. Mezi zkříženými nikoly se cholesterický krystal chová jako jednoosý pevný monokrystal. Procházející světlo je zbarvené v důsledku interference, barva světla závisí na úhlu pozorování, kroku spirály L , druhu sloučeniny a pokrývá oblast spektra od viditelné až po infračervenou.

U ohniskově - kuželové textury jsou osy spirál orientovány všemi možnými směry. Mezi zkříženými hranoly (polarizátor a analyzátor) je pozorovatelný dynamický rozptyl (viz dále).

Mechanickým tlakem nebo elektrickým polem přechází Grandjeanova textura na ohniskově-kuželovou, případně se transformuje až na nematickou strukturu.

Cholesterická mezofáze se považuje za speciální případ nematické mezofáze.

Přidáním opticky aktivní látky do NLC, dostaneme cholesterický kapalný krystal. Na molekulární úrovni jsou NLC a CLC podobné. Laterálně se však cholesterické molekuly od nematických liší tím, že mají do chemické struktury zabudován jeden nebo více asymetrických uhlíků.



Obr.4: Náhodná orientace molekul izotropní kapaliny.

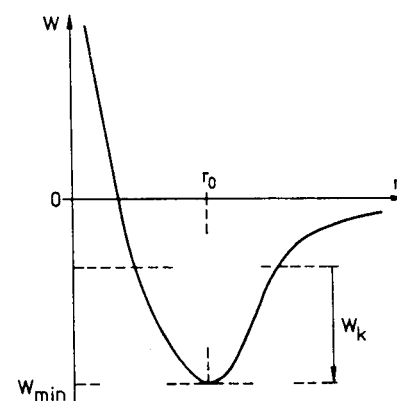
V izotropní kapalině CLC jsou molekuly ponatáčeny náhodně do všech možných směrů, viz obrázek 4. Z neuspořádanosti molekul pramení i nezávislost vlastností na směru v krystalu.

VNITŘNÍ PŘÍČINY USPOŘÁDÁNÍ MOLEKUL

Mezomorfnní stav se vyznačuje vysokým stupněm uspořádanosti molekul na velkou vzdálenost. O mezomorfnních stavech rozhodují intermolekulární síly tří druhů:

1. Elektrické přitažlivé síly mezi dipóly molekul.
2. Síly, kterými na sebe působí indukované dipóly. Tyto síly mají původ v měnící se polarizaci molekul.
3. Disperzní síly, které vznikají při spontánních oscilacích elektronových oblaků.

Záleží na potenciální energii dvou sousedních molekul. Na obrázku 4 je znázorněná závislost energie mezimolekulární interakce W na vzdálenosti mezi dvěma molekulami r . Průběh vykazuje ostré minimum $W_{min} = W(r_0)$, které odpovídá nejstabilnějšímu stavu útvaru. V souboru kapalino-krystalogenních molekul



Obr. 5: Závislost energie molekulární interakce na vzdálenosti molekul.

vzniká více minim, přičemž prostřední z nich odpovídají mezomorfnním stavům.

Vznik kapalných krystalů se vysvětluje růzností termických vibrací jednotlivých atomů (nebo skupin atomů) budujících makromolekulu. Amplitudy tepelných kmitů atomů, vázaných uvnitř molekuly kovalentně, závisí na vazbách se sousedními atomy. Při silných vazbách jsou amplitudy kmitů menší a naopak. Amplitudy okrajových skupin jsou větší jak amplitudy skupin uprostřed molekuly. Uprostřed jsou nejčastěji benzénová jádra a na okraji uhlovodíkové řetězce. Při zahřívání roste rychleji kinetická energie okrajových skupin a tavení začíná od konce molekuly. Vazebné síly na okraji slábnou a vrstvy po sobě mohou klouzat, vzniká tekutost a viskózní anizotropie smectického krystalu.

Reálné kapalné krystaly nejsou ideálně uspořádané struktury, mají četné defekty (viditelné i mikroskopem). Nejmarkantnější jsou **dezinklinační čáry**. Pod pojmem dezinklinace rozumíme úhlovou odchylku molekul od obecné orientace. Dezinklinační poruchy vytvářejí souvislé čáry, které se působením elektrického nebo magnetického posouvají, vzájemně na sebe působí a deformují se. Existuje několik typů těchto čar.

WILLIAMSOVY DOMÉNY

V předchozí kapitole jsme popisovali uspořádanost molekul kapalných krystalů. Vraťme se k obrázku 2b),c), který znázorňuje uspořádání do pseudovrstev. Původně souvislé vrstvy u SLC se rozpadly na pseudovrstvy (domény). Doménou rozumíme seskupení téměř stejně orientovaných molekul. Orientace v sousedních doménách je však odlišná. Doménové struktury jsou pozorovatelné v mikroskopu - jedna doména obsahuje řádově 10^{14} molekul.

S přiložením elektrického napětí roste počet domén, ale jejich rozměry se zmenšují a jejich tvar se neustále mění. Působením elektrického pole dochází k mutaci molekulárního uspořádání. V tenké vrstvě LC vzniká téměř rovnoběžná pásová textura domén. Pásky jsou kolmé na původní směr molekulární orientace LC. U orientovaných nematických kapalných krystalů, jejichž molekuly jsou rovnoběžné se směrem orientace, se pod vlivem elektrického pole stanou paralelní pásky kolmé ke směru původní orientace.

Šířka pásu d je úměrná tloušťce vzorku: $d = k \times h$ (k je konstanta úměrnosti). Pásová textura působí na světlo jako difrakční mřížka.

Vznik těchto (Williamsových) domén je vázán na určité fyzikální podmínky. Např. u NLC se tvoří v látkách s měrným odporem $\rho = 10^{13} \Omega\text{cm}$.

Výskyt Williamsových domén a vznik dynamického rozptylu je vázán na splnění nerovnosti

$\varepsilon_{\perp}\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}\varepsilon_{\parallel} > 0$, kde ε , σ jsou permitivita a elektrická vodivost, \perp , \parallel jsou směry vzhledem k rovinám elektrod.

Pro látky dielektricky přibližně izotropní platí

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon > 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\parallel} = \sigma_{\perp} > 0.$$

Když naopak platí $\sigma_{\parallel} = \sigma_{\perp} = \sigma > 0$,

potom $\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} < 0$, což je tzv. Heilmeyera podmínka pro tvorbu Williamsových domén a vznik dynamického rozptylu.

ÚČINKY EL. POLE NA KAPALNÉ KRYSTALY

LC se zpravidla chovají v elektrickém poli jako elektrické dipóly se směrem vektoru dipólového momentu

- a) souhlasným s geometrickou osou (delší) molekuly,
- b) kolmým na geometrickou osu,
- c) všeobecnou orientací.

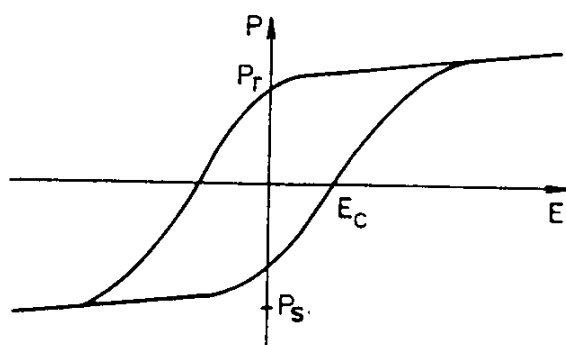
O tom, jak se molekula konkrétně v elektrickém poli zachová rozhoduje chemická konstituce. Dipóly podléhají v elektrickém poli mechanickým silám, které natáčejí celou molekulu tak, aby směr vektoru dipólového momentu splynul se směrem elektrického pole E .

(Dipólový moment $m = q_e l$.)

Stejnoseměrné pole E nejdříve stáčí molekuly do směru pole a potom způsobuje jejich po-

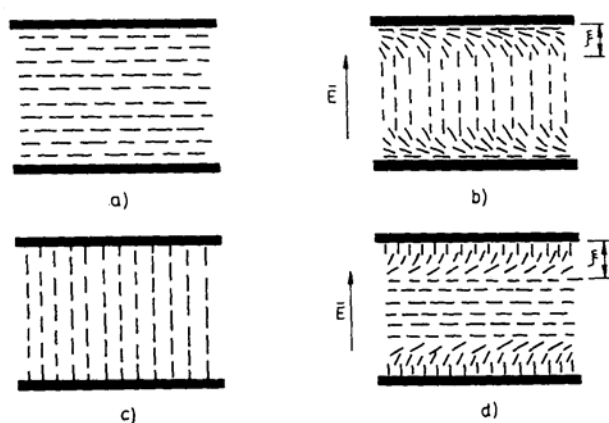
hyb ve směru pole. Silový účinek je zvláště zřetelný v oblastech s nehomogenním polem.

Vznik doménové struktury je spojen s přechodem kapalného krystalu do stavu s polární souměrností působením elektrického pole. Přechod je doprovázen elektrickou hysterezí, viz obrázek 6, kde je znázorněn průběh hysterezní smyčky $P = f(E)$, kde P je polarizace, E - elektrické pole.



Obr. 6: Dielektrická hysterezní smyčka $P=f(E)$.

Kapalné krystalv



Obr. 7: Deformace uspořádanosti molekul el. polem:
a) horizontální (homogenní) uspořádání molekul,
b) deformace horizontálního uspořádání,
c) vertikální (homeotropní) uspořádání molekul,
d) deformace vertikálního uspořádání.

Ve střídavých polích jsou molekuly v důsledku setrvačnosti těžko pohyblivé. U NLC se molekuly orientují kolmo na E , protože jejich dipólový moment je kolmý na dlouhou osu.

V tenké vrstvě mezi dvěma elektrodami mohou být molekuly LC natočené vzhledem k rovině elektrod rozmanitě. Předpokládejme, že jsou paralelní s elektrodami. Potom hovoříme o horizontálním (homogenním) uspořádání molekul (Obr. 7a), které se dá dosáhnout triboelektrickým

nabitím stěn elektrod (tření). Když je LC dostatečně čistý a kladně dielektricky anizotropní, tj. $\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} > 0$, tak vnější elektrické pole E stočí molekuly do směru vektoru E (Obr.7b). Hovoříme o deformaci horizontálně uspořádaných molekul. Těsně u vnitřních stěn elektrod zachovávají molekuly původní orientaci. Horizontální orientace pozvolna přechází do vertikální. Vzdálenost ξ , od které začíná čistě vertikální uspořádání molekul, je nepřímo úměrná E . ($\xi = \frac{c_1}{E}$) a nazývá se tloušťka elektrické coherence. Konstanta c_1

závisí na vlastnostech stěn a vlastnostech kapalného krystalu (vizkozitě). Tento jev vzniká u NLC a je vysvětlován indukovanou orientací molekul. Deformovaná textura má diametrálně odlišné fyzikální vlastnosti od původní. Např. nedeformovaná struktura světlo propouští, deformovaná je pohlcuje.

Deformační jev se vyskytuje ve dvou verzích. První verze (horizontálně deformační) byla již popsána. U druhé verze jsou molekuly bez přítomnosti pole orientované kolmo na stěny elektrod (Obr. 7c). Hovoříme o svislém (homeotropním) uspořádání molekul vzhledem k vnitřním stěnám. Pokud na elektrody, mezi kterými je tenká vrstva nematického LC, přiložíme napětí, vzniklé elektrické pole v látce se zápornou dielektrickou anizotropií přeorientuje molekuly kolmo na směr pole. Nastala deformace původně vertikálně uspořádaných molekul na vodorovné uspořádání. Deformace postupuje směrem od stěn dovnitř kapalného krystalu a má spojitý průběh. Ve vzdálenosti ξ je už úplná. Pokud pole nepřekročí prahovou hodnotu E_{pr} , průsvitnost krystalu s rostoucím polem narůstá.

VLIV MAGNETICKÉHO POLE NA CHOVÁNÍ LC

Chování LC v magnetickém poli je podmíněno benzénovými jádry v molekulovém řetězci. Organické molekuly jsou ve většině případů diamagnetické, $\kappa < 0$. Jejich objemová magnetická susceptibilita κ je veličinou směrově závislou (tenzorovou). Zajímají nás vždy zejména její hodnoty ve směru delší geometrické osy a směru kolmém na tento směr. V magnetickém poli se budou molekuly natáčet tak, aby jejich energie byla co nejmenší, tj. delší osou kolmo na směr siločar.

Jak se chová NLC s aromatickými jádry?

Nechť \mathbf{H} je kolmá na rovinu šestiúhelníku benzénového jádra. Teoretický rozbor ukazuje, že tato rovina se bude natáčet tak, aby byla rovnoběžná se směrem magnetických siločar. V této poloze je potenciální energie benzenového jádra minimální.

Při izolované molekule by byl orientační účinek magnetického pole zastřený tepelným kmitáním. Při velkém souboru v LC převládne účinek magnetického pole nad tepelným a účinkem tepelných vibrací. Elektrody paralyzují účinek vnějšího magnetického pole \mathbf{H} jen do vzdálenosti $\xi = \frac{C}{H}$ (ξ je délka magnetické koherence). Ana-

logie obrázku 7.

U některých NLC dochází i ke skokovým změnám magnetické susceptibility.

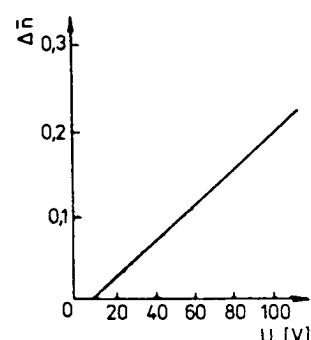
U cholesterických LC dochází účinkem magnetického pole k rozvinutí cholesterické spirály. Když přes CLC prochází magnetické pole kolmé na osu spirály, krok spirály L se prodlouží. Při určitém kritickém poli H_{kr} bude $L \rightarrow \infty$ a molekuly se seřadí rovnoběžně do nějakého směru.

Pro sloučeniny s velkým L ($10 \mu\text{m}$) je $H_{kr} = 1 \text{ T}$. Rozvinutím spirály se cholesterická struktura změnila v nematickou.

Magnetické a magnetooptické vlastnosti kapalných krystalů se zatím v praktických aplikacích využívají velmi málo. Důvody jsou čistě technického rázu.

ŠÍŘENÍ SVĚTLA KAPALNÝMI KRYSTALY

Planparalelní vrstva NLC jeví dvojlom podobně jako křemen nebo islandský vápenec. Velikost rozdílu indexu lomu řádného a mimořádného paprsku $\Delta n = n_e - n_o$, závisí i na velikosti přiloženého napětí U na vrstvu NLC. Dvojlom NLC je lineární funkcí U podle obrázku 8. $\Delta n = a + s U$, kde $a = \Delta n$ (pro 7 V), $s = 0,002$ (směrnice přímky). Velikostí přiloženého napětí U lze měnit dráhové (fázové)



Obr. 8: Závislost dvojlomu na elektrickém napětí

rozdíly mezi řádným a mimořádným paprskem, čímž lze navodit řadu pozoruhodných interferenčních jevů.

Cholesterické kapalné krystaly se vyznačují selektivním odrazem dopadajícího světla na planparalelní vrstvě. Barva světla se mění v závislosti na úhlu odrazu. Odražené monochromatické světlo bude mít maximální intenzitu v tom směru ψ , pro který je splněna Braggova podmínka

$$\lambda = 2L \sin \frac{\psi}{2}. \quad (L \text{ je zdvih spirály})$$

U složeného (bílého) dopadajícího světla budou jednotlivé spektrální složky λ_k vykazovat maximum ve směrech ψ_k , vyplývajících z řešení předchozí rovnice

$$\psi_k = 2 \arcsin \frac{\lambda_k}{2L}.$$

Barva odraženého světla tedy závisí na kroku závitnice L . Tento parametr lze elektricky, magneticky i teplotně snadno ovlivňovat, což má zásadní význam.

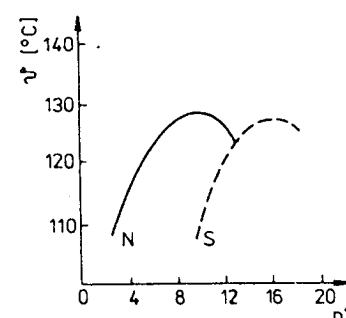
Spirálová konfigurace molekul u CLC způsobuje silné natáčení roviny lineárně polarizovaného světla. Na 1 mm tloušťky činí stáčení až $60\,000^\circ$ (u běžných organických sloučenin je to jen 300°).

MEZOMORFNÍ PŘECHODY

Mezomorfnní přechod je každá vratná (reverzibilní) změna fáze kapalino-krystalogenní látky. Nejjednodušší přechody jsou pevná látka - kapalný krystal, kapalný krystal - izotropní kapalina. Pokud je posloupnost (sled) přechodů pevný krystal - kapalný krystal - izotropní kapalina reverzibilní (vratná), tj. při ochlazování izotropní kapaliny prochází intermediální fází kapalného krystalu, říkáme, že mezomorfismus je enantiotropní. Pokud se při zahřívání pevného krystalu dostaneme přímo do izotropní kapaliny nebo při ochlazování izotropní kapaliny získáme přímo pevný krystal, je mezomorfismus monotropní.

Se zvyšováním teploty narůstají amplitudy tepelných kmitů, uvolňují se laterální mezimolekulární vazby. Při dosažení teploty T_1 se stává látka tekutou. Další zvyšování teploty navozuje rozpad doménové struktury, který se stane úplným při určité teplotě T_2 . Molekuly se pohybují volněji, kapalina se stává izotropní. Šířka mezomorfnního intervalu $\Delta T = T_2 - T_1$ závisí na délce řetězce a počtu uhlovodíků v koncových skupinách, obrázek 9.

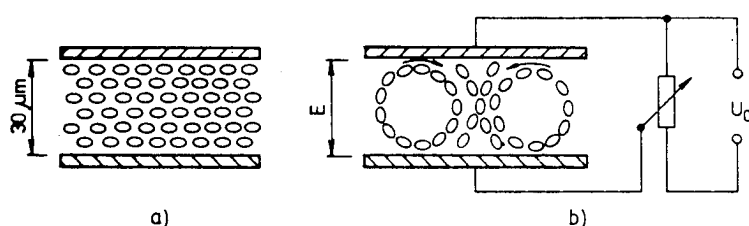
Křivka N platí pro nematiko-izotropní přechod, S pro smektiko-izotropní. Kromě samotného počtu uhlíků jsou teploty ovlivněny i tím, zda je jejich počet sudý nebo liché. Experimentálně se zjistilo, že látky silně polární a s velkou molekulární hmotností se obvykle taví při nižších teplotách.



Obr. 9: Závislost teploty přechodu na počtu uhlíků v koncové skupině.

Existují i sloučeniny, které vykazují více mezomorfnních (mezofázových) přechodů - polymezomorfismus. Náklonnost k polymorfismu vykazují zejména SLC. Molekuly s pravolevou symetrií procházejí při ohřevu těmito fázemi: pevná látka–smektická fáze–nematická fáze–izotropní kapalina.

DYNAMICKÝ ROZPTYL



Obr.10: Uspořádání molekul nematického krystalu

a) bez vnějšího napětí,

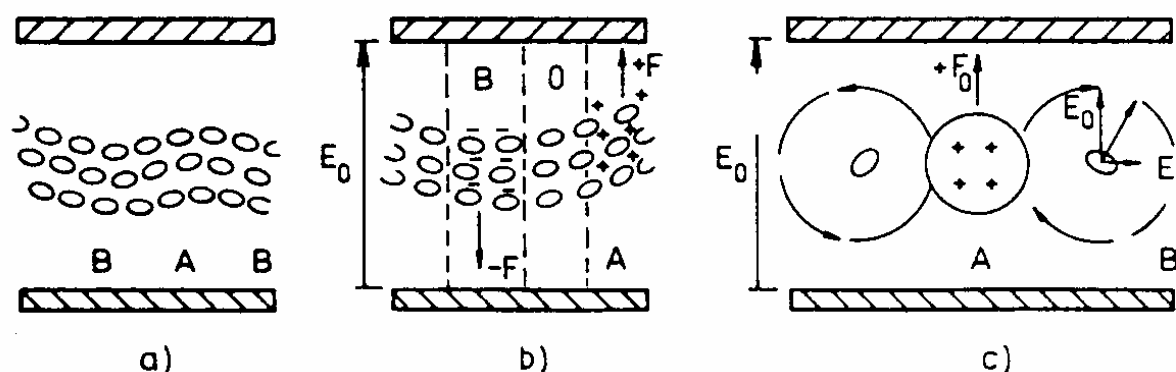
b) hydromechanická cirkulace vyvolaná přiloženým napětím.

Mějme vrstvu (asi $30\text{ }\mu\text{m}$) NLC se zápornou dielektrickou anizotropií, tj. $\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} < 0$. Elektrický dipól těchto molekul je kolmý na dlouhou osu molekuly, což zpravidla způsobuje skupina N-O.

Nechť jsou molekuly mezi dvěma průhlednými elektricky vodivými elektrodami triboelektricky seřazeny podle obrázku 10a. Vrstva kapalného krystalu v mezomorfním stavu je čirá. Připojme k systému nastavitelné napětí podle obrázku 10b. S rostoucím napětím od nulové hodnoty se kapalný krystal postupně vyjasňuje, stává se homogennějším. Vysvětlujeme to orientačním účinkem pole. Při napětí 5 V elektrické pole dosáhne prvního prahu, $E_{l,th} = 5\text{V}/30 \times 10^{-6}\text{ m} = 200\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ a povrch v odraženém světle se silně znehomogenizuje. Objeví se na něm světlejší a tmavší místa. Současně se dá vizuálně pozorovat (pomocí jemných prachových částic) hydromechanická cirkulace po uzavřených trajektoriích (obr. 10b).

Další zvyšování napětí změní proudění kapaliny na turbulentní - tomuto odpovídající intenzita elektrického pole je druhý práh $E_{ll,th}$. Objeví se četné dezinklinační čáry. Optickým důsledkem této turbulence je silný rozptyl světla, nazývaný dynamickým rozptylem (DS). Svazek dopadajících rovnoběžných paprsků se stane rozbíhavým, světlo se šíří všemi směry. Tento jev objevil v roce 1968 Heilmeyer. Vznik režimu dynamického rozptylu nezávisí na polaritě napětí, objevuje se tedy i při střídavém napětí (do určité mezní frekvence).

Výklad dynamického rozptylu:



Obr. 11:

- a) Uspořádání molekul vlivem tepelného nepokoje,
- b) nárůst elektrických nábojů vlivem elektrického pole a vodivostní anizotropie,
- c) síly působící na náboje.

Předpokládá se, že i v kapalném krystalu bez elektrického pole existují oblasti s mírně narušeným uspořádáním (obr. 11a). Toto narušení je vyvoláno tepelným pohybem molekul. Vytvářejí se zóny se střídavě kladným (A) a záporným (B) nábojem. Vznik zón je umožněn malou měrnou vodivostí LC (10^{-9} Sm^{-1}) a její anizotropií. Přiložené elektrické pole E_0 a jím způsobený nepatrný příčný proud, periodicitu lokalizace nábojů ještě zvýrazňuje (Obr. 11b). Síly $\vec{F}_e = \pm q_e \vec{E}_0 = \pm q_e \rho \vec{i}$ uvedou kapalinu do pohybu. Mezi přilehlými nabitými zónami se vytváří další přídavná pole E_1 , která se sčítají s polem od vnějšího zdroje E_0 . Molekuly NLC se natáčí kolmo na směr výslednice (Obr. 11c).

Kapalné krystaly

- 1) Jedna z teorií předpokládá, že dynamický rozptyl souvisí s vytvořením opačně nabitých iontů, které vznikají díky vlhkosti LC a elektrolytickou disociací. Je totiž zajímavé, že u dokonale vysušených vzorků dynamický rozptyl nenastává. Pohybem iontů se rozrušuje normální orientace molekul a vznikají rozptylová centra s průměrem 2 až 5 μm . Koncentrace těchto center je 10^8 až 10^9 cm^{-3} nebo 10^{14} až 10^{15} m^{-3} ; tato koncentrace závisí na intenzitě elektrického pole a je úměrná stupni zakalení (nebo naopak). Vlnová délka světla je 5× až 10× menší než rozměry rozptylových center a nastává tedy rozptyl pro jakoukoliv vlnovou délku ve viditelném oboru.
- 2) Jiná teorie dynamického rozptylu vychází ze skutečnosti, že LC představuje anizotropní prostředí pro elektrický proud I . Znamená to, že vektor proudové hustoty \mathbf{i} a vektor \mathbf{E} nejsou obecně v LC rovnoběžné. Vektor \mathbf{i} lze rozložit do složek, z nichž jedna je kolmá na \mathbf{E} . Tato kolmá složka podmiňuje vznik prostorových nábojů. Působením dodatečného pole vznikne příčné proudění molekul a mění se i orientace vektoru polarizace \mathbf{N} . Jev je podporován zápornou anizotropií permitivity ε a elastickými mezimolekulárními silami. Po mutaci vektoru polarizace vzrůstá kolmé proudění a narůstají prostorové náboje. Na to vznikají elektrodynamické nestability a turbulentní pohyb. Vrstva LC přestane být transparentní a začne silně rozptylovat dopadající světlo. Z hlediska použitelnosti je mutace optických vlastností, vyvolaná elektrickým polem, použitelná pro černo-bílé displeje. Tenká vrstva NLC je schopna rozptylovat světlo až $10^8\times$ účinněji než stejně silná vrstva etylalkoholu. Tlusté vzorky NLC jsou neprůhledné.

BAREVNÉ JEVY LC

VLIVEM TEPLoty A ELEKTRICKÉHO POLE

Některé LC, které se nalézají v mezomorfním stavu se už při nepatrných změnách teploty nápadně zabarvují (termická kolorizace). Už nepatrné změny teploty vyvolávají změny barevných odstínů. Sytost zabarvení závisí na druhu použitého materiálu a úhlu dopadajících a odražených paprsků. Jako termosenzitivní materiály se používají estery cholesterolu a kyselin. Byly již připraveny směsi s mezomorfním intervalem $0,01^{\circ}\text{C}$, to znamená, že při změně teploty o tento interval proběhne barva celé spektrum. Modrý odstín odpovídá nejvyšší, červený nejnižší teplotě. Jev se fyzikálně vysvětluje pomocí interference.

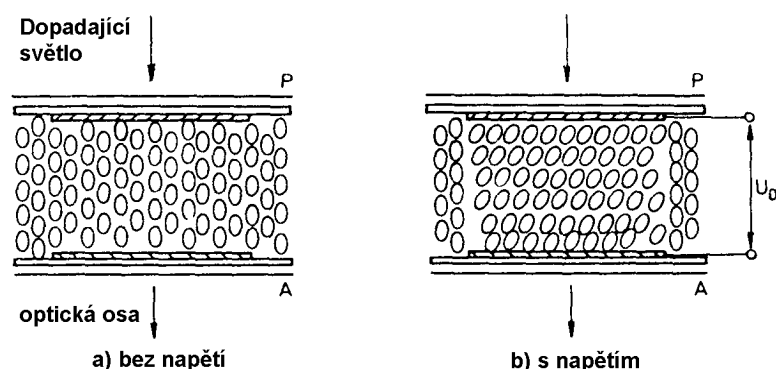
NLC s kladnou dielektrickou anizotropií (dipólový moment má směr delší osy molekuly), ke kterým bylo dodáno pleochorické barvivo se zabarvují účinkem elektrického pole. Pleochorismus je projevem selektivní pohltivosti určitých vlnových délek. Zabavení (doplňkovými vlnovými délkami) závisí na směru dopadajícího světla a úhlu pozorování. Některé pleochorické látky mají molekuly podobné NLC, což jim dovoluje proniknout do struktury NLC.

Když je molekula barviva svojí delší osou rovnoběžná s vektorem intenzity elektrického pole elektromagnetické vlny polarizovaného světla, nastane absorpce světla barvivem a pozorovatel vidí jen jeho doplňkovou barvu. Při kolmosti dlouhé osy molekuly na rovinu kmitání **E** prochází světlo beze změny. Rovnoběžnost molekul kolorantů s polarizační rovinou se dociluje vnějším elektrickým polem.

Modifikace barvy se vyvolá elektrickým polem řádově 4 MV m^{-1} . Barviva se nesmějí v LC rozpouštět.

DVOJLOM V HOMEOTROPNÍ VRSTVĚ

Dvojlohm v LC lze rovněž řídit elektrickým polem. Homeotropní vrstva bez napětí se chová jako jednoosý krystal s optickou osou rovnoběžnou s kolmicí dopadu (Obr. 12a).



Obr. 12:

a) Homeotropní vrstva kapalného krystalu,
b) dvojlomná vrstva.

Homeotropie (osy molekul jsou kolmé na průsvitné elektrody) se získá přidáním povrchově aktivní přísady do mateřského NLC. Přiložením vnějšího napětí U_0 na elektrody se změní původní (svislá) orientace molekul (Obr. 12b). Tento jev se nazývá *deformace vertikálních fází (DAP)*.

Vzniká u molekul se zápornou anizotropií permitivity. Úhel sklonění os molekul závisí na polaritě a velikosti U_0 . Vzniká dvojlomnost - index lomu řádného paprsku $n_o=f(E)$ bude jiný jako u mimořádného paprsku $n_e=f(E)$. Oba indexy lomu jsou funkcí elektrického pole. Rozdíl optických drah

$$\Delta s = n_o(E)l_o - n_e(E)l_e,$$

kde l_o , l_e jsou vzdálenosti proběhnuté řádným a mimořádným paprskem. Vzorek umístěný mezi zkřížené nikoly bez elektrického pole pohlcuje polarizované světlo. Zorné pole za analyzátozem je tmavé. Již při připojení nízkého napětí (2,5 V) se zorné pole vyjasní a současně i zbarví. Barva propouštěného světla se může měnit

a) tloušťkou vrstvy LC

b) elektrickým polem.

Protože $n = f(\lambda)$ je podmínka interferenčních maxim splněna vždy jen pro některé vlnové délky. Odstíny nejsou tedy čisté a výrazné.

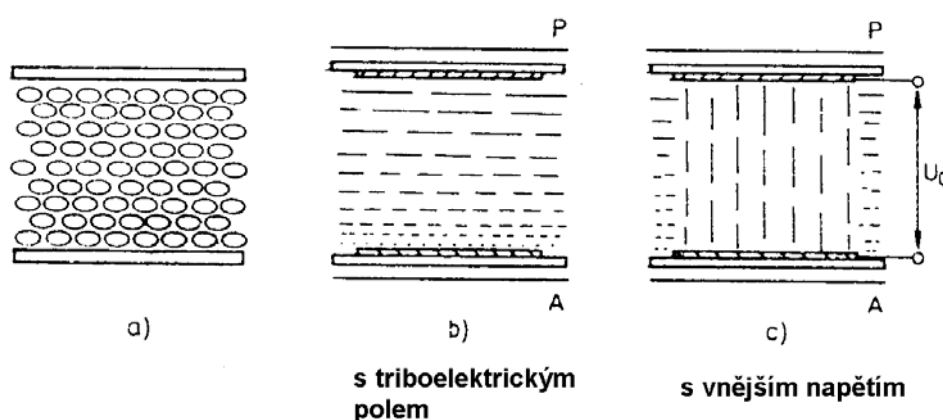
Kapalné krystaly

Vyvolání efektu dvojlomu je ještě vázáno na následující podmínky:

1. NLC se zápornou anizotropií ε musí být téměř dokonale zbaven stop vody.
2. Vodivé, průhledné elektrody (SnO_2) musí být termicky upraveny tak, aby vznikla speciální krystalická struktura SnO_2 .
3. K zamezení dynamického rozptylu se používá nízkofrekvenční napětí akustické frekvence ($f = 1 \text{ kHz}$).
4. Zdroj primárního světla musí dávat dostatečně rovnoběžné svazky (kolimace).

OTOČENÝ NEMATICKÝ KRYSTAL

NLC je tenká vrstva ($20\mu\text{m}$) uzavřená mezi planoparalelními deskami. Homogenní planární strukturu dostaneme pomocí tření desek (vhodnou tkaninou) stále stejným směrem. Třecí náboje (triboelektrina) indukují elektrické pole E , které přinutí molekuly LC zaujmout svými dlouhými osami rovnoběžné polohy se směrem pole. Když nyní např. spodní desku otočíme o 90° vzhledem k horní, zkroutí se i elektrické siločáry. Dostaneme buňku podle Obr. 13b



Obr. 13:

- a) Homogenní vrstva,
- b) Postupné pootočení molekul,
- c) Orientace molekul ve směru elektrických siločar.

Molekuly jsou vyznačeny již jen úsečkami, průmětem delších os. Molekuly těsně u horní a spodní desky jsou orientovány navzájem kolmo. Podobně se budou orientovat i polarizační roviny. Světlo z polarizátoru rovnoběžného s analyzátozem neprochází - zorné pole je tmavé.

Po přiložení vnějšího napětí na vrstvu se molekuly zorientují v případě kladné anizotropie ε rovnoběžně s elektrickým polem (Obr. 13c). Po odpojení elektrického pole se obnoví původní stav, děj je reverzibilní. Těsně u desek, až do hloubky ξ se vliv elektrického pole neprojeví (viskózní a adhezní síly brání mutaci).

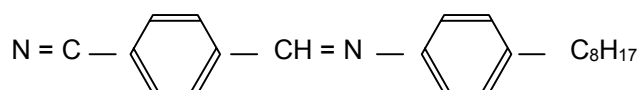
CHOLESTERICKO-NEMATICKÝ FÁZOVÝ PŘECHOD

Nechť CLC má molekuly uložené v rovinách kolmých na pozorovací průzorová skla. Směry orientace os šroubovic jsou stochastické povahy. Na hranicích domén způsobuje nedokonalost dvojkuželové textury rozptyl světla (projeví se zakalením vzorku).

Některé CLC s kladnou anizotropií dielektrické konstanty získávají vlivem elektrického pole nematickou texturu. Přiložené elektrické pole způsobuje vyjasnění původně zakaleného vzorku (děje se to skokem). Jde vlastně o jev opačný k dynamickému rozptylu (nepřímý pracovní mód). Jev se vysvětluje rozvinutím spirály CLC pod vlivem elektrického pole. Prahové napětí při konvenčních tloušťkách CLC činí 20 až 100 V.

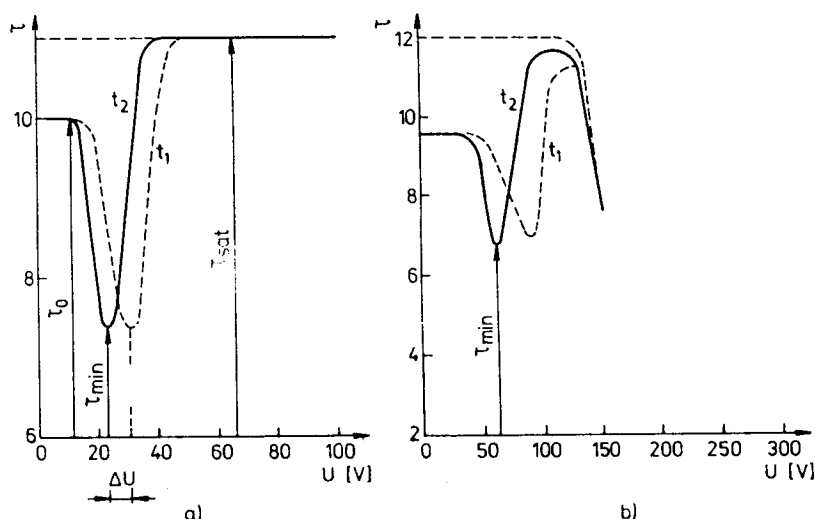
PAMĚŤOVÉ VLASTNOSTI KAPALNÝCH KRYSTALŮ

Podstata paměťového elektrooptického jevu spočívá v zachování určitých optických vlastností i po zániku příčiny, která tyto optické vlastnosti vyvolala (nejčastějšími příčinami jsou elektrické pole a teplota). Typickým příkladem je smektický LC označovaný CBOA *n*-(*p*-kyanobenzilidén)-*p*-*n*-oktylanilínu. Strukturní vzorec sloučeniny má tvar



Krystal se formuje zahřátím na 72°C a pomalým ochlazováním. Při zvyšování teploty prochází CBOA těmito mezofázemi:

pevný krystal (do 35°C) - smektická fáze (67°C) - nematická fáze (72°C) - izotropní kapalina.



Obr. 14: Závislost propustnosti τ na stejnosměrném napětí pro tloušťku vrstvy

a) 12 μm ,

b) 100 μm kapalného krystalu CBOA.

Pokud na kapalný krystal zahřátý na 53°C určité tloušťky přiložíme vnější napětí a toto budeme zvětšovat z nulové hodnoty, bude se činitel propustnosti (transparence $\tau = f(U)$) měnit podle obrázku 14a,b. Plná čára reprezentuje závislost $\tau = f(U)$ snímanou ($t_2=10$ min) po přiložení napětí, přerušovaná

okamžitě ($t_1=0$) po připojení napětí. Obě větve vykazují minima τ , při pozdějších měřeních se τ_{\min} posouvá k menším hodnotám U , ale v podstatě se jedná o paměťový efekt.

Kapalné krystaly

Po 10 minutách je charakter průběhu shodný s průběhem naměřeným okamžitě po připojení napětí. Výraznější paměťový jev se dosáhne snižováním teploty smektické fáze. Při teplotě 42°C by došlo k vymazání informace až za několik měsíců. Zvyšováním teploty se memorizační čas zkracuje. To se dá využít k vymazání informace. Takový druh paměti pracuje s propouštěným světlem, proto se hovoří o transmisní paměti.

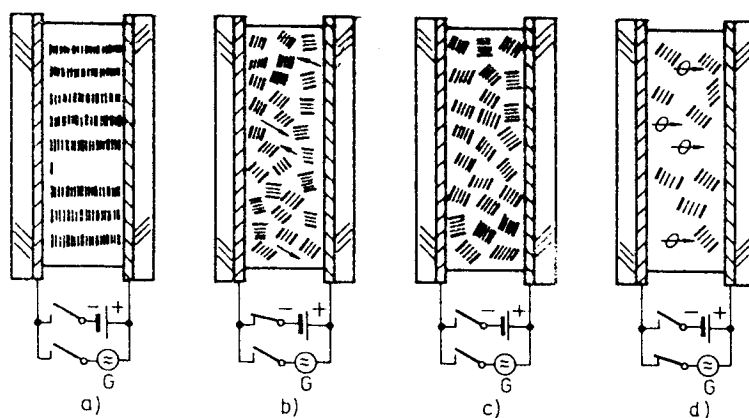
Jiné paměti jsou založené na účinku elektrického pole, nazývají se reflexní (pracuje se s odraženým

světlem). Záznam se vymazává nízkofrekvenčním elektrickým signálem.

Principiální zapojení optických pamětí, založených na účinku elektrického pole, je na obrázku 15 a-d. Zapojení a)

představuje klidový stav, b) - uskutečňuje se záznam informace stejnsměrným

polem, c) - informace se zachovává (konzervuje), d) - vymazání informace nízkofrekvenčním napětím.



Obr. 15: Buzení optické paměti:

- a) klidový stav,
- b) záznam informace,
- c) konzervace informace,
- d) vymazání záznamu.

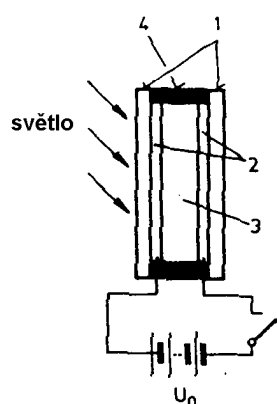
OSTATNÍ VLASTNOSTI KAPALNÝCH KRYSTALŮ

Termooptický jev vykazují SLC a CLC (př. CBOA). S teplotou se mění optické vlastnosti propustnost, odrazivost, zbarvení, rozptyl světla atd. Jsou to reverzibilní a reprodukovatelné děje.

Fotovoltaický efekt - na buňce LC vzniká při osvětlení elektrické napětí. Velikost napětí je úměrná osvětlení a nezávisí na ploše buňky LC.

Elektrodynamický efekt - molekuly LC se uvedou působením elektrického pole do pohybu. Aby k tomu došlo, nesmí být molekuly elektroneutrální. Dipólové molekuly se mohou pohybovat jen v nehomogenním elektrickém poli.

ZOBRAZOVACÍ BUŇKA



Obr.16: Řez buňkou LC.

Buňka založená na módu dynamického rozptylu se skládá ze dvou skleněných destiček 2, potažených zevnitř vodivými elektrodami (SnO_2 , InO , apod.). Mezi elektrodami je vrstva kapalného krystalu 35 až $100\mu\text{m}$ silná. Požadovaná vzdálenost elektrod a hermetizace se realizují distanční vložkou 4 ze slídy, teflonu, PVC apod., viz obrázek 16. Vložky mají obvykle tvar písmena U. Horní mezera v U slouží k plnění mezielektrodového prostoru kapalným krystalem. Na vyvedené elektrody se připojuje budicí napětí U_0 . Funkcí buněk je přeměnit elektrický signál v optický, např. změnou propustnosti, odrazivosti nebo zabarvení světla. Za jednou z elektrod (zadní) může být umístěno odrazné zrcadlo, čímž se dosáhne zvýraznění efektu.

POZOROVACÍ MÓDY

Buňka s LC světlo negeneruje, a proto je nutný vnější zdroj světla. V módu procházejícího světla (TM) musí být obě elektrody průsvitné. Pozorovatel pozoruje rozptýlené světlo.

V módu odraženého světla (RM) je zadní elektroda neprůhledná a působí jako zrcadlo. Světlo zde prochází buňkou dvakrát.

Každý z těchto módů je přímý nebo nepřímý.

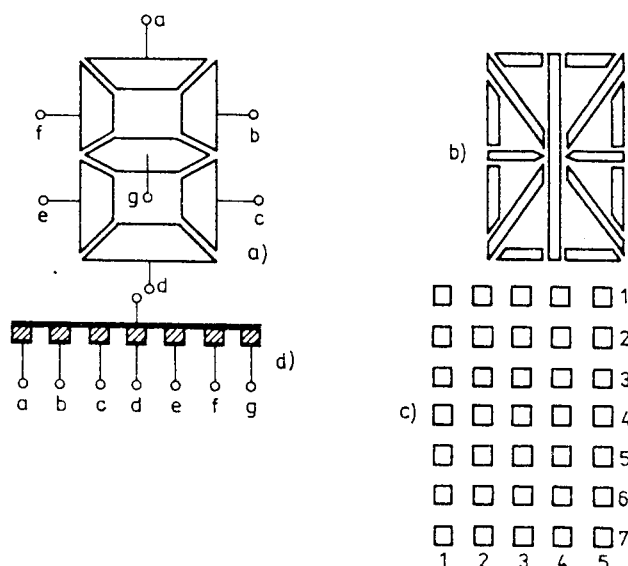
Přímý mód: Propouštěné nebo odražené světlo má větší intenzitu bez U_0

Nepřímý mód: Propouštěné nebo odražené světlo má větší intenzitu po přiložení U_0 .

Nevýhodou buněk s LC je jejich neviditelnost bez vnějšího osvětlení.

ZOBRAZOVACÍ DIGITOV  JEDNOTKY A MATICE

Zobrazovací element se skládá z několika buněk tvaru úseček (segmentů) nebo bod   sop radan ch tak, aby se mohly jejich kombinacemi vytvořit písmena abecedy nebo   slicice des tkov  soustavy. Dobr  čitelnost symbolů vy žaduje velk  počet zobrazovacích buněk,   m z roste i složitost řídicích obvod .  itelnost je protikladem jednoduchosti. Nejmenší mo n  počet segmentů je 7. Při zobrazování číslic zcela vystačíme se sedmisegmentov mi digitov mi jednotkami. Příklad nejčastější stylizace znaků je na obrázku 29a). Pro abecedn   slicov  zobrazování se vol  t  n cti a  patnácti segmentov  digity (29b). Je   věrnější stylizaci symbolů získáme



Obr. 29a): Sedmisegmentov  numerick  digitov  jednotka,

b) t  n ctisegmentov  digit,

c) 35-ti bun kov  pole

d) sch matick  značka digitu.

bodov m polem buněk LC (29c). Body (mal  plošky) jsou  sop rad ny do pěti sloupců a sedmi ř dk . Ovládací obvody jsou komplikovan .

Schématicky se digitov  jednotka označuje podle 29d. V technických aplikacích se používá termín digit.

Zviditelňování (vizualizace) znaků se dosahuje rozsv cen m příslušných úseček.

U buněk je nutno řídit jas nebo kontrast.

Budicí napětí bývá stejnosm rn  nebo st  davn .