

Flat Panel Displays

平板显示技术

液晶材料特性及LCD组件

张小宁

电子物理与器件教育部重点实验室

2018年7月





液晶材料特性及LCD原理

- 一、液晶分子的结构
- 二、液晶的光电特性
- 三、液晶显示器的主要组件及功能



一、液晶分子的结构

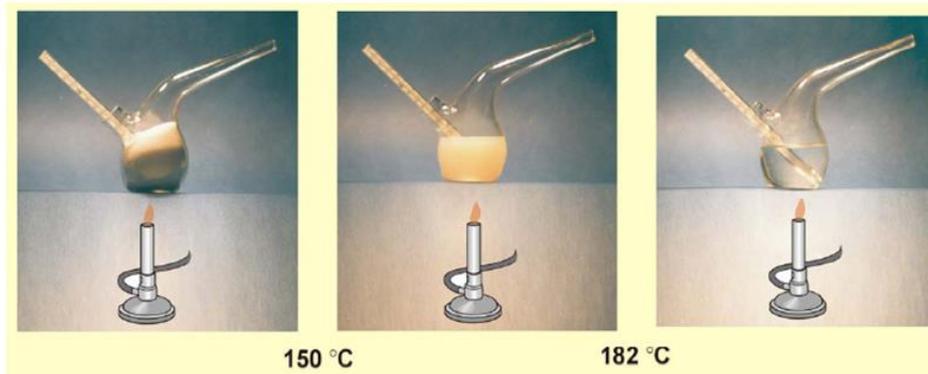
什么是液晶?



液晶显示器:

泛指利用液晶所制作出来的显示器，目前主要指**薄膜晶体管液晶显示器, Thin-film transistor liquid crystal display (TFT LCD)**。

TFT LCD的两个特征：薄膜晶体管+液晶

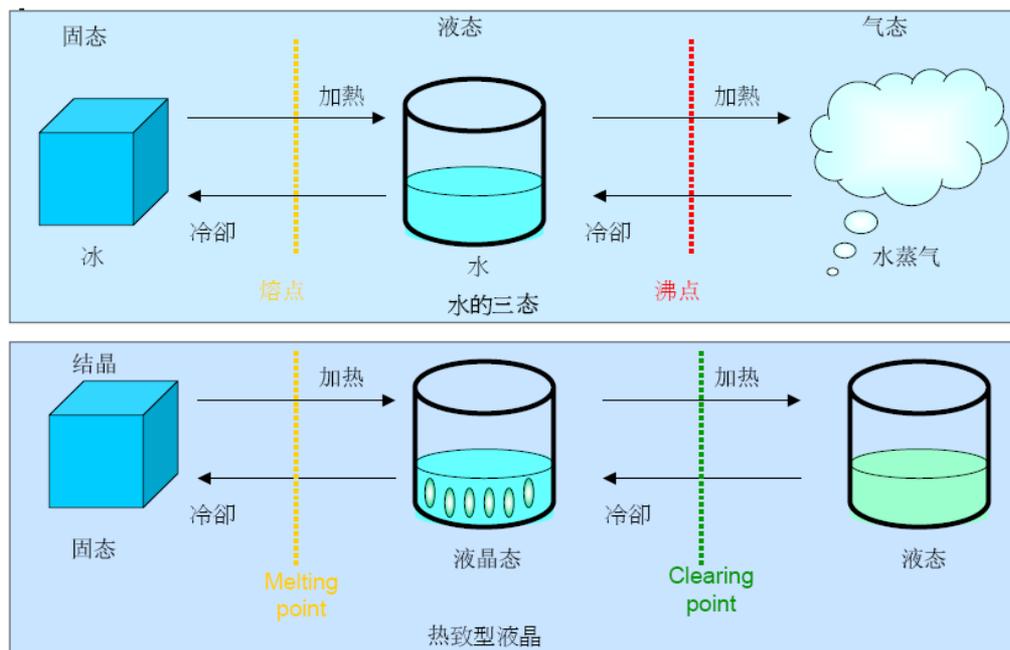


1. **液态晶体的首次发现**。1888年，被奥地利的植物学家 Friedrich Reinitzer 在观察从植物中分离精制出的安息香酸胆固醇 (cholesteryl benzoate) 的融解行为时发现，此化合物加热至 145.5 度 $^{\circ}\text{C}$ 时，固体会熔化，呈现一种介于固相和液相间之半熔融流动白浊状液体。这种状况会一直维持温度升高到 178.5 度 $^{\circ}\text{C}$ ，才形成清澈的液态 (isotropic liquid)。
2. 1889年，研究相转移及热力学平衡的德国物理学家 O. Lehmann，对此化合物作更详细的分析。他在**偏光显微镜**下发现，此黏稠之半流动性白浊液体化合物，具有**异方性结晶**所特有的**双折射率** (birefringence) 的光学性质，即**光学异相性** (optical anisotropic)，故将这种似晶体的液体命名为液晶。



一、液晶分子的结构

液晶态



1. 物质的三态？物质的三态是针对水而言的。
2. 液晶是什么态？液晶态？

介于固体跟液体之间的一种状态，这种状态仅是材料的一种相变化的过程。只要材料具有上述的过程，即在固态及液态间有此一状态存在，物理学家便称之为液晶态。



二、液晶的分类

液晶的分类

液晶既有固态的晶格，又有液态的流动性。当液态晶体刚发现时，因为种类很多，所以不同研究领域的人对液晶会有不同的分类方法。

1. 依分子排列的有序性来分，

- 层状液晶(Sematic, 近晶相);
- 线状液晶(Nematic, 向列相);
- 胆固醇/胆甾型液晶(cholesteric, 胆甾相);
- 碟状液晶(disk).

2. 按分子量的高低:

- 高分子液晶(polymer liquid crystal, 聚合许多液晶分子而成)
- 小分子液晶两种。TFT LCD属于小分子液晶。

3. 按液晶态的形成原因:

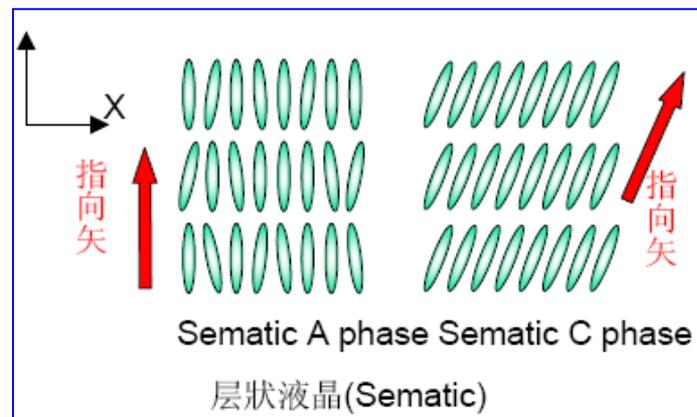
- 因浓度形成液晶态: 溶致型液晶(**lyotropic**); 液晶分子在适当溶剂中达到某一临界浓度时, 便会形成液晶态。如: 肥皂水。
- 因温度形成液晶态: 热致型液晶(**thermotropic**)。层状液晶与线状液晶一般多为热致型的液晶。固态受热→溶解形成液晶态, 持续加热→溶解成液态(等方性液态), 即: 所谓二次溶解现象。



二、液晶的分类

(1) 层状液晶(Sematic)

1. 由液晶棒状分子聚集一起,形成一层一层的结构,其每一层的分子的长轴方向相互平行,长轴的方向对于每一层平面是垂直或有一倾斜角;
2. 由于其结构非常近似于晶体,所以又称做近晶相。
3. 层与层间的键结会因为温度而断裂,所以层与层间较易滑动,每一层内的分子键结合较强,不易被打断,因此就单层来看,其排列不仅有序且黏性较大。

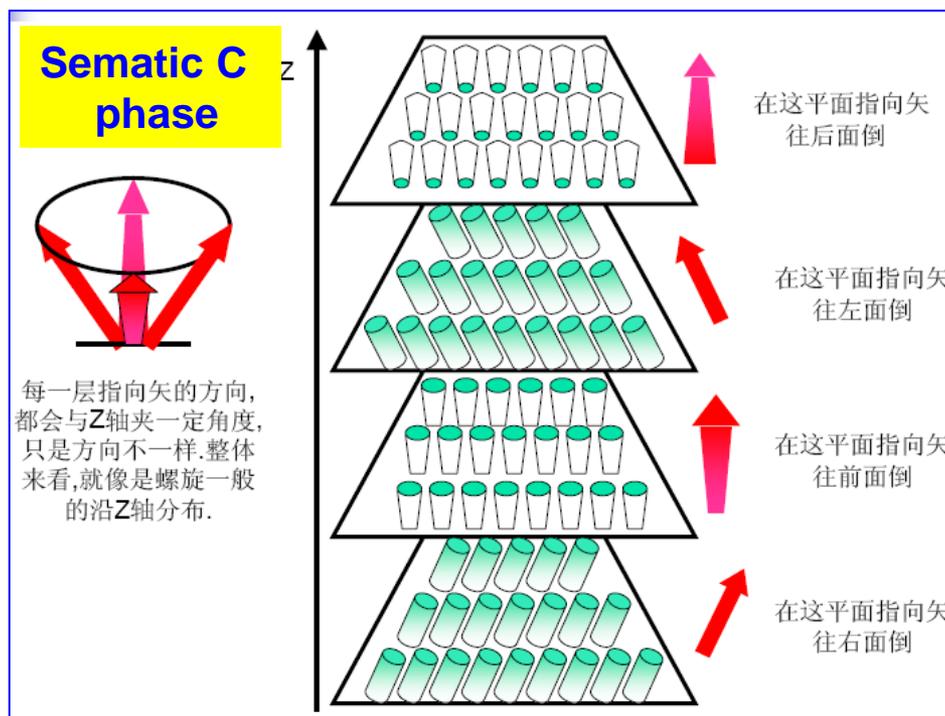


指向矢:

1. 如果宏观描述液晶的物理特性,则可以把某区域液晶分子的平均指向定义为指向矢(**director**),这就是这一区液晶分子平均方向。层状液晶的秩序参数**S(order)**趋近于**1**;
2. 以层状液晶来说,由于其液晶分子会形成层状的结构,因此可根据指向矢的不同分为不同的层状液晶。



一、液晶分子的结构

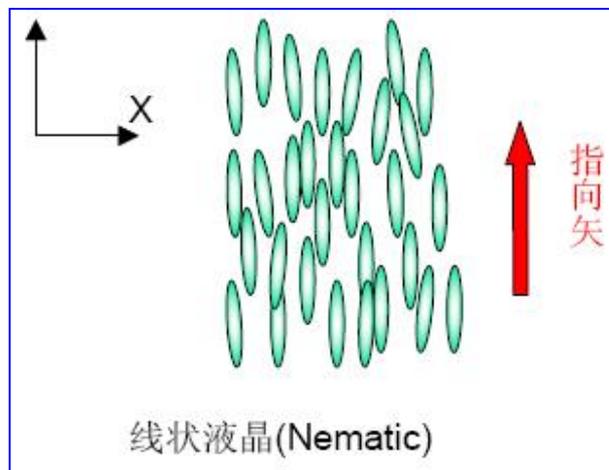


1. 当液晶分子的长轴都是垂直站立的话, 就称之为“**Sematic A phase**”;
2. 当液晶分子的长轴站立方向有某种的倾斜角度, 就称之为“**Sematic C phase**”;
3. **B phase**其实是**C phase**的一种变形而已, **C phase**如果带**chiral**的结构就是**B phase**。而且其结构中除了每一层的液晶分子都具有倾斜角度之外, 一层一层之间的倾斜角度还会形成像螺旋的结构。



一、液晶分子的结构

(2) 线状液晶(Nematic, 向列相)



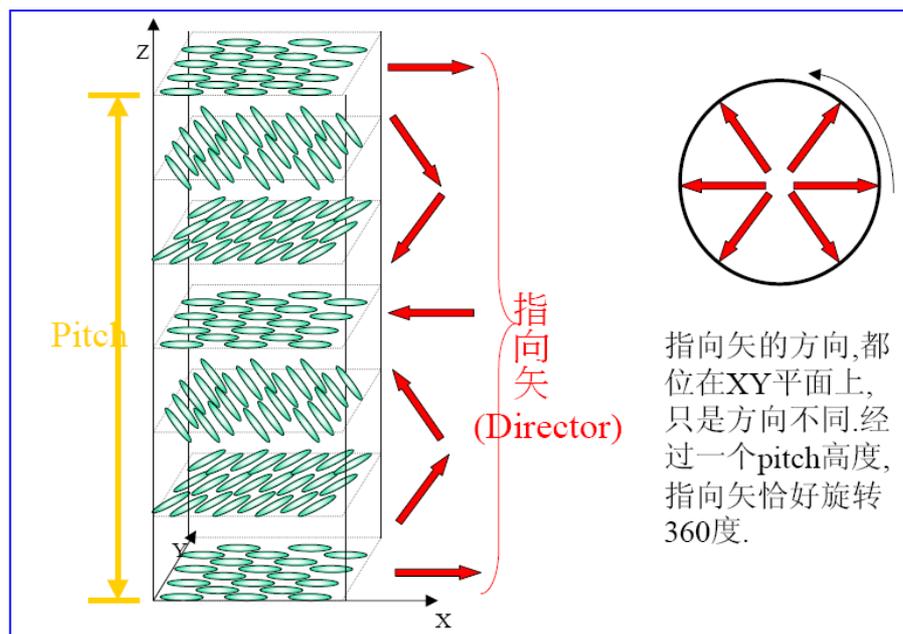
1. **Nematic=thread**; 肉眼观察这种液晶时,看起来像丝线一般;
2. 这种液晶分子在空间上具有一维 规则性排列,所有棒状液晶分子长轴会选择某一特定方向(也就是 指向矢)作为主轴并相互平行排列,而且不像层状液晶一样具有分层结构。
3. 与层状型液晶比较其排列比较无秩序,其秩序参数 S 较层状型液晶小。黏度较小,所以较易流动(它的流动性主要来自对于分子长轴方向较易自由运动)。
4. 线状液晶就是现在的TFT LCD常用的TN(Twisted nematic)型液晶。



一、液晶分子的结构

(3) 胆固醇/胆甾型液晶(cholesteric)

名字的来源: 它们大部份是由胆固醇的衍生物所生成的, 有些没有胆固醇结构的液晶也有此液晶相。

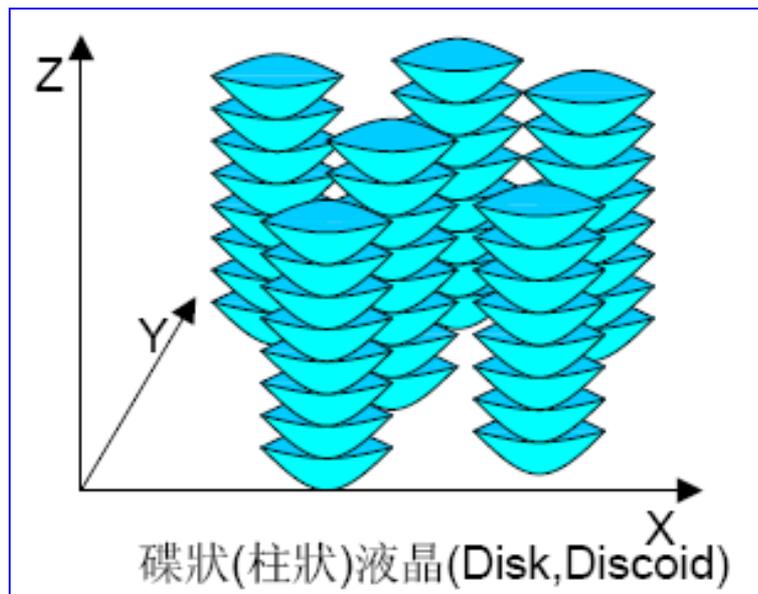


1. 每层均很像线状液晶, 正因为它每一层跟线状液晶很像, 所以也叫做Chiral nematic phase。
2. 从z轴方向看, 其指向矢随一层一层的不同呈螺旋状分布, 当其指向矢旋转360度所需的分子层厚度就称为pitch。
3. 对胆固醇液晶, 由于不同层的指向矢不同, 就会有不同的光学或电学的差异, 也因此造就了不同的特性。



一、液晶分子的结构

(4) 碟状液晶(disk)



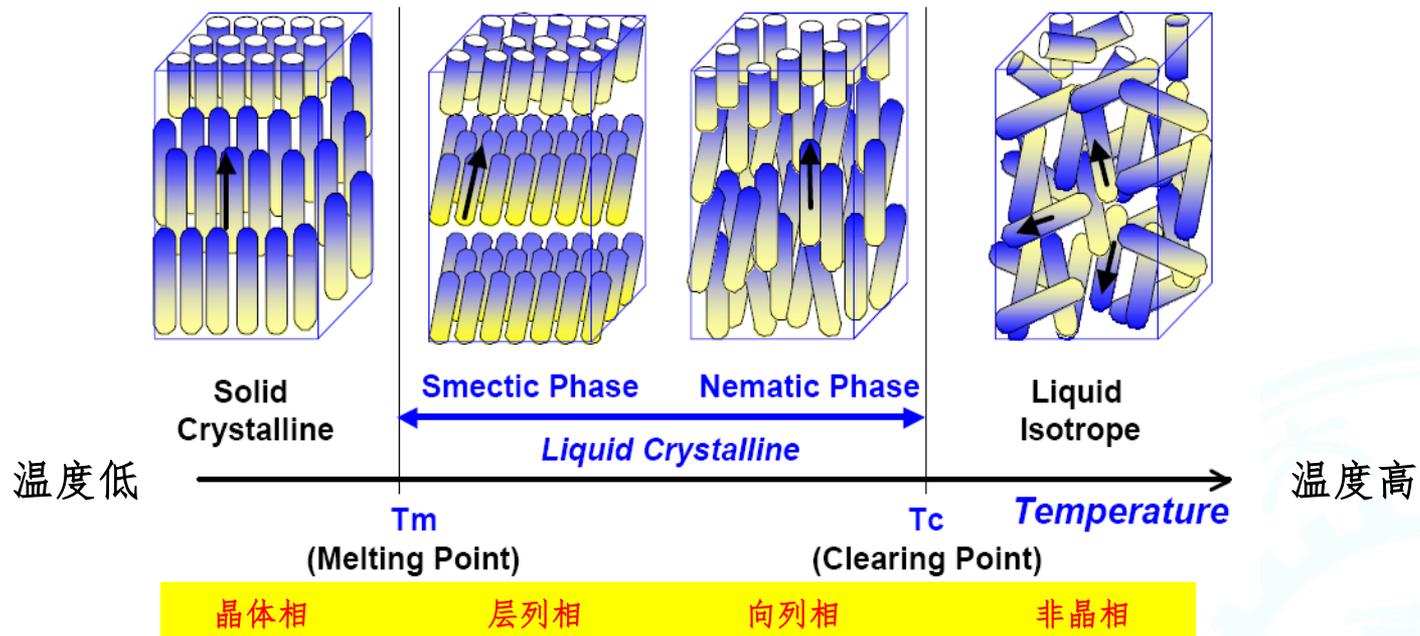
也称为柱状液晶，以单个的液晶来说，像碟状(disk)，但是其排列就像是柱状(discoid)。



一、液晶分子的结构

液晶材料相变：液晶相与温度的关系

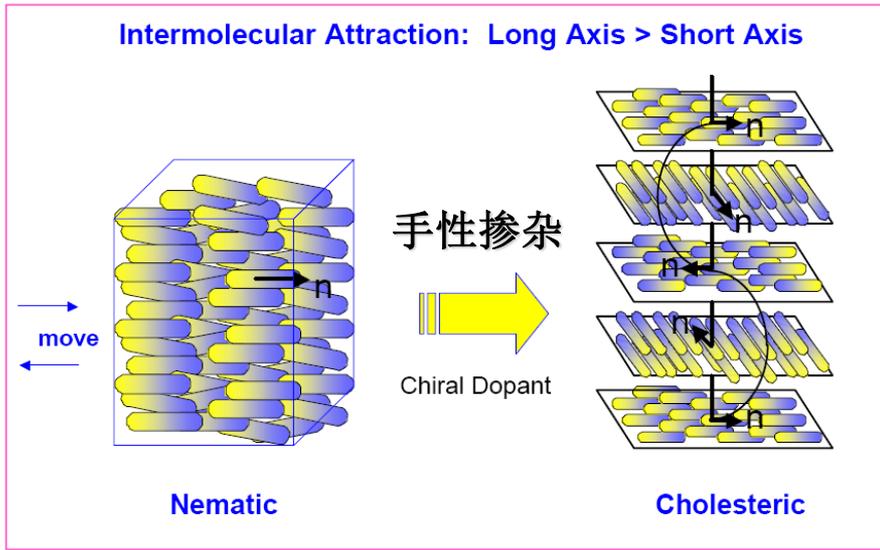
* Operating Temperature Range for Display Application





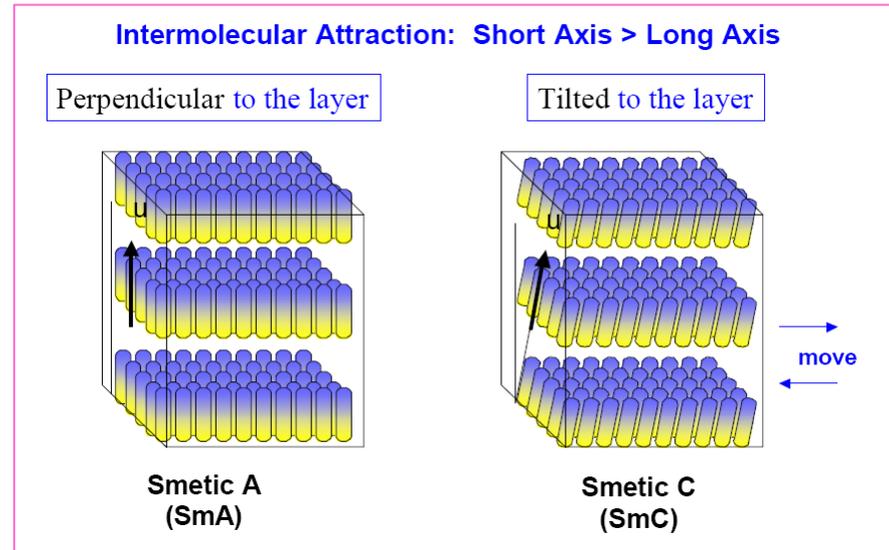
一、液晶分子的结构

液晶材料相变：液晶分子间相互作用



向列相

胆甾相





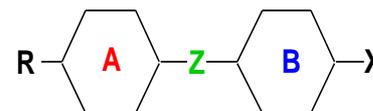
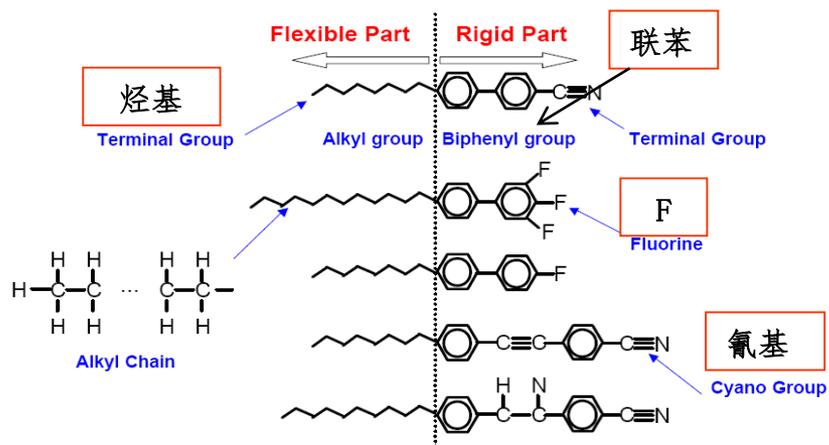
液晶材料特性及LCD原理

- 一、液晶分子的结构
- 二、液晶的光电特性
- 三、液晶显示器的主要组件及功能



二、液晶的光电特性

液晶分子基本结构



R	A	Z	B	X
烷基		—		Alkyl
烷氧基		-COO-		Alkoxy
烯基		-C ₂ H ₄ -		CN
		-N=N-		F, Cl
		-C≡C-		CF ₃
		(C≡C) ₂		OCF ₃
				S
				NCS

- 桥键连接是刚性的，有利于形成液晶相。
- 如果分子的刚性部分导致强的各向异性相互作用，那么增加键长不利于液晶相的稳定。
- 如果刚性部分不引起强的空间阻碍，增加链长有利各向异性的相互作用。

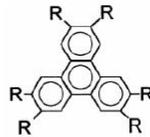
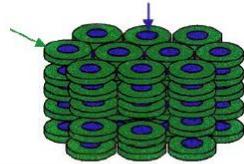


二、液晶的光电特性

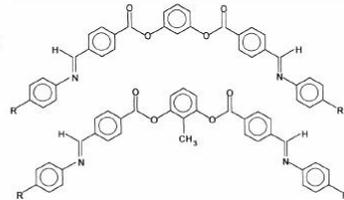
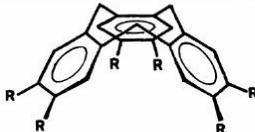
热致液晶材料

A mesophase formed by heating a solid or cooling an isotropic liquid. A mesogenic phase exists in certain temperature range.

A. Rod-like



B. Disc-like

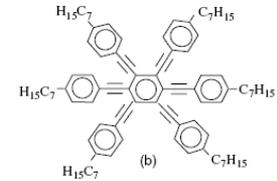
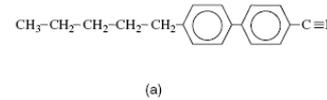


C. Bowlic

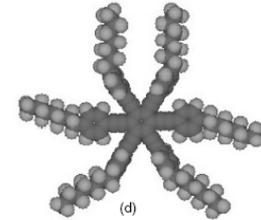
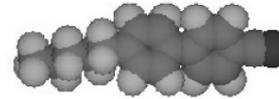
D. Banana

Thermotropic Liquid Crystals

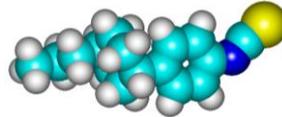
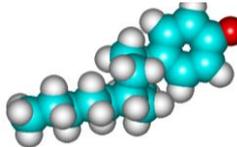
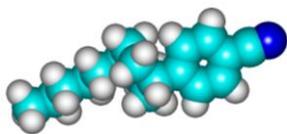
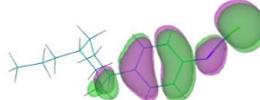
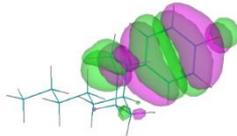
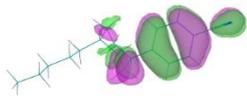
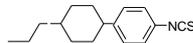
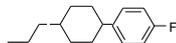
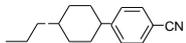
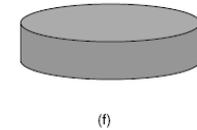
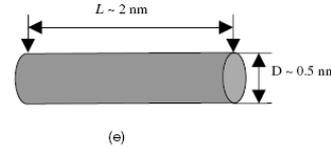
化学结构



空间填充模型



物理模型

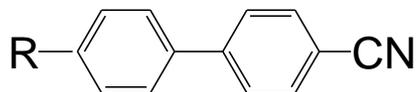




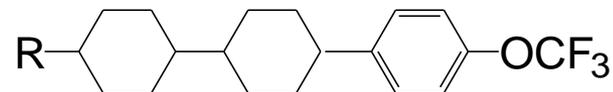
二、液晶的光电特性

几种重要液晶材料的分子结构

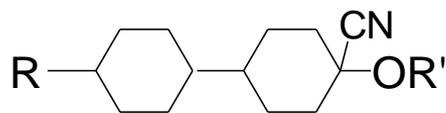
TN



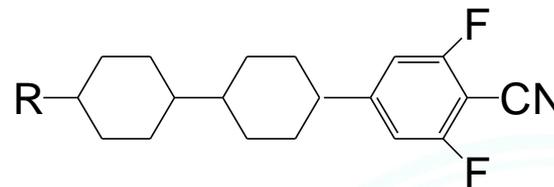
TN-TFT



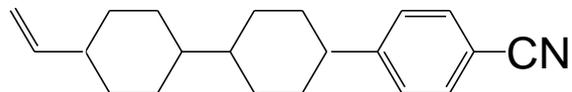
Guest-Host



IPS-TFT



STN



VA-TFT





二、液晶的光电特性

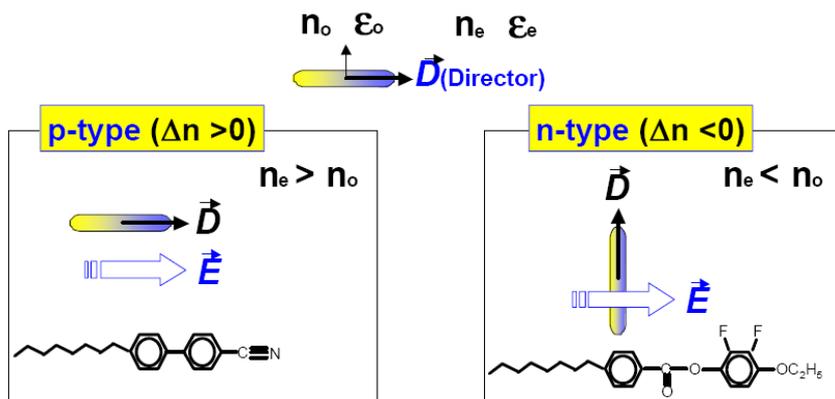
液晶分子的结构为各向异性 (Anisotropic)，介电系数及折射系数等光电特性都具有各向异性，利用这些性质改变入射光的强度，以便形成灰阶，但不能形成彩色。

1. 介电系数 ϵ (dielectric permittivity)

- 介电系数分开成两个方向的分量： $\epsilon_{//}$ (与指向矢平行的分量)与 ϵ_{\perp} (与指向矢垂直的分量)。
- 当 $\epsilon_{//} > \epsilon_{\perp}$ ，为介电系数各向异性的正型的液晶，可以用在平行配位；而 $\epsilon_{//} < \epsilon_{\perp}$ ，为介电系数各向异性的负型液晶，只可用在垂直配位才能有所需要的光电效应。

Birefringence: $\Delta n = n_e - n_o$

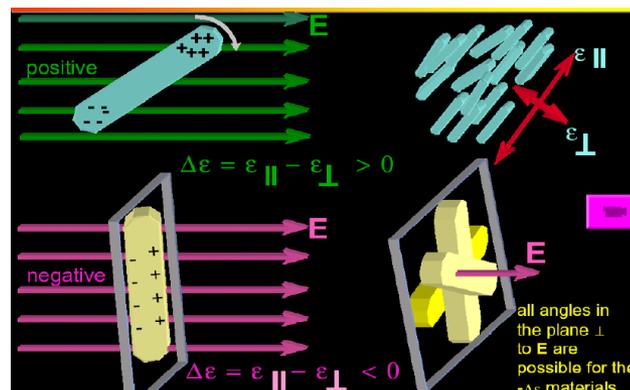
Dielectric Anisotropy: $\Delta\epsilon = \epsilon_e - \epsilon_o$



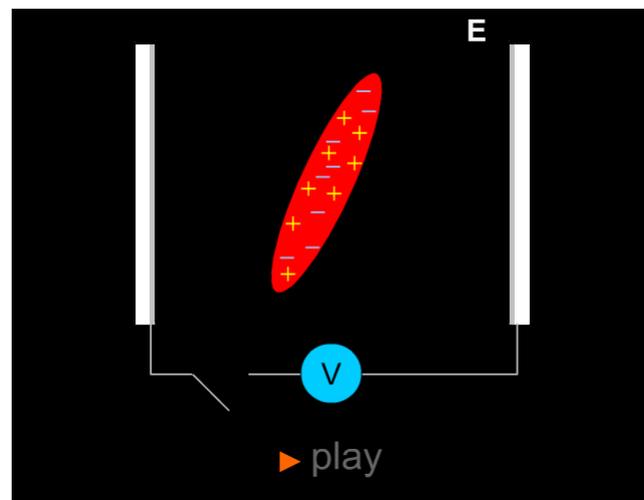


二、液晶的光电特性

- 当有外加电场时，液晶分子会因介电系数各向异性为正或负，来决定液晶分子的转向是平行或是垂直于电场，来决定光的穿透与否。
- TFT LCD上常用的TN型液晶大多是属于介电系数正型的液晶。当介电系数异方性 $\Delta\epsilon(\epsilon_{//}-\epsilon_{\perp})$ 越大的时候，则液晶的临界电压(threshold voltage)就会越小，液晶可以在较低的电压下工作。



液晶电学各向异性：液晶分子在电场中的转向。

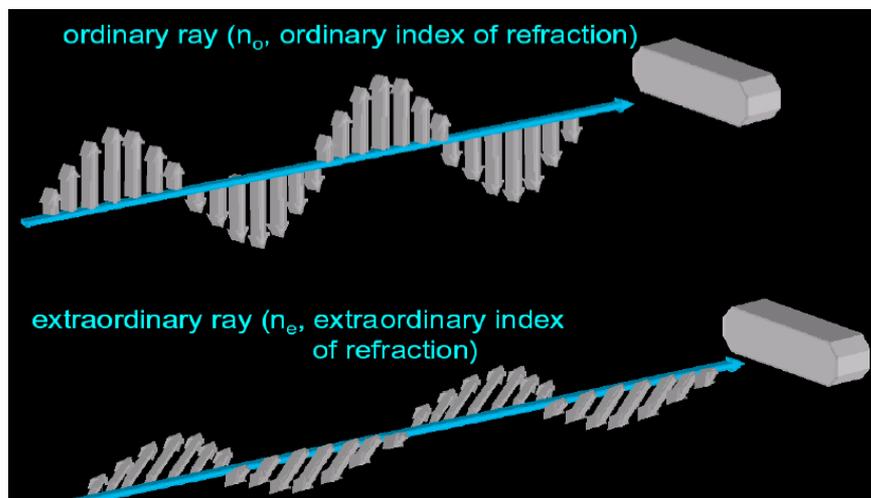




二、液晶的光电特性

2. 折射系数(refractive index)

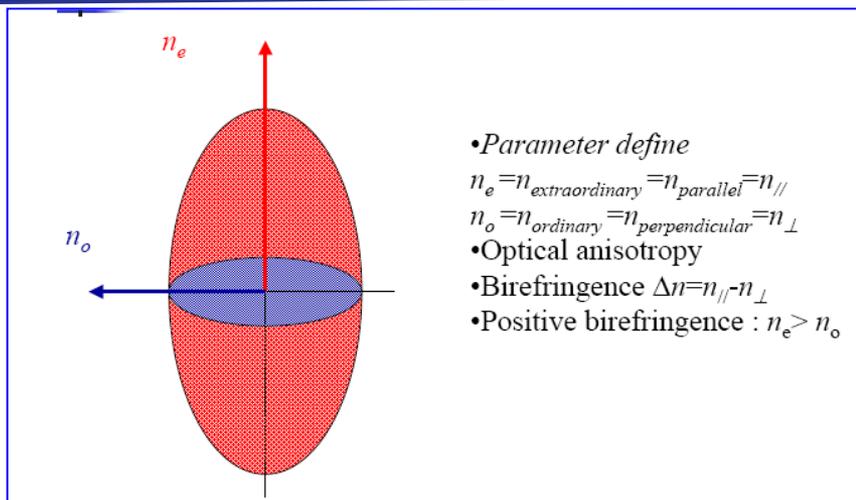
- ① 液晶分子大多由棒状或是碟状分子所形成，因此跟分子长轴平行或垂直方向上的物理特性会有一些差异，故液晶分子也被称做是各向异性晶体。
- ② 折射系数依照跟指向矢垂直与平行的方向，分成两个方向的向量：分别为 $n_{//}$ 与 n_{\perp} 。
- ③ 对单光轴(**uniaxial**)的晶体来说，有两个不同折射系数的定义，一个为 n_o ，它是指对于**ordinary ray**的折射系数，所以才简写成 n_o ，表示光波的电场分量是垂直于光轴。
- ④ n_e 是对于**extraordinary ray**的折射系数，表示光波的电场分量平行于光轴。
- ⑤ 双折射率(**birefringence**) $\Delta n = n_e - n_o$ 。



液晶光学各向异性



二、液晶的光电特性



Birefringence: $\Delta n = n_e - n_o$
Dielectric Anisotropy: $\Delta \epsilon = \epsilon_e - \epsilon_o$

$n_o \quad \epsilon_o \quad n_e \quad \epsilon_e$

p-type ($\Delta n > 0$)

$n_e > n_o$

n-type ($\Delta n < 0$)

$n_e < n_o$

1. 层状液晶、线状液晶及胆固醇液晶分子为棒状:
2. 其指向矢的方向与分子长轴平行, 参照单光轴晶体的折射系数定义: 垂直于液晶长轴方向 $n_{\perp}(=n_o)$ 及平行液晶长轴方向 $n_{//}(=n_e)$ 两种。所以当光入射液晶时, 会受到两个折射率的影响, 造成在垂直液晶长轴与平行液晶长轴方向上的光速会有所不同。
3. 若光的行进方向与分子长轴平行时的速度, 小于垂直于分子长轴方向的速度时, 这意味着平行分子长轴方向的折射率大于垂直方向的折射率(因为折射率与光速成反比), 也就是 $n_e - n_o > 0$ 。所以双折射率 $\Delta n > 0$, 称做是光学正型的液晶, 层状液晶与线状液晶几乎都是属于光学正型的液晶。
4. 光的行进方向平行于长轴时的速度较快, 代表平行长轴方向的折射率小于垂直方向的折射率, 所以双折射率 $\Delta n < 0$, 称它做是光学负型的液晶, 胆固醇液晶多为光学负型的液晶。

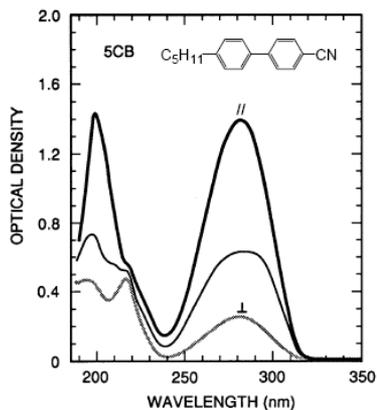


二、液晶的光电特性

折射率的计算

三波长模型

$$n^{e,o}(\lambda) \cong 1 + g_0^{e,o} \frac{\lambda^2 \lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + g_1^{e,o} \frac{\lambda^2 \lambda_1^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + g_2^{e,o} \frac{\lambda^2 \lambda_2^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2}$$



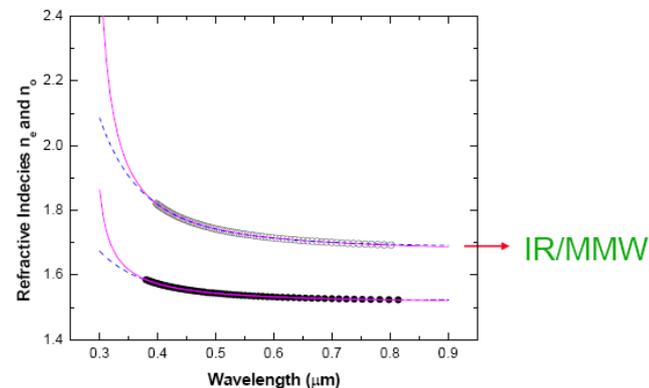
Three band Model: 5CB
 $\sigma \rightarrow \sigma^*$: $\lambda_0 \sim 120\text{nm}$ (~isotropic)
 $\pi \rightarrow \pi^*$: $\lambda_1 \sim 200, \lambda_2 \sim 280\text{nm}$

Low Δn : more σ electrons
 High Δn : more π electrons

扩展的Cauchy模型

Off-resonance, $\lambda \gg \lambda_2 \rightarrow$ Power series & keep 3 terms

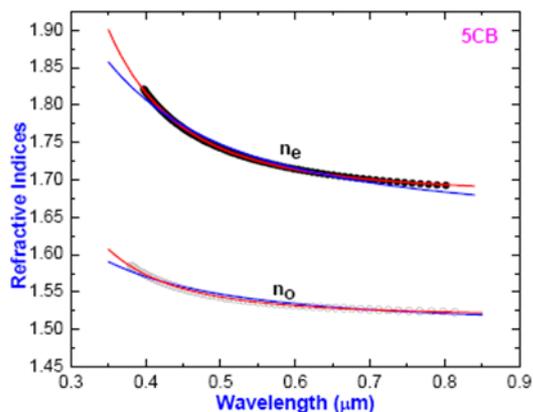
$$n_e(\lambda, T) = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2} + \frac{C_e}{\lambda^4} \quad n_o(\lambda, T) = A_o + \frac{B_o}{\lambda^2} + \frac{C_o}{\lambda^4}$$



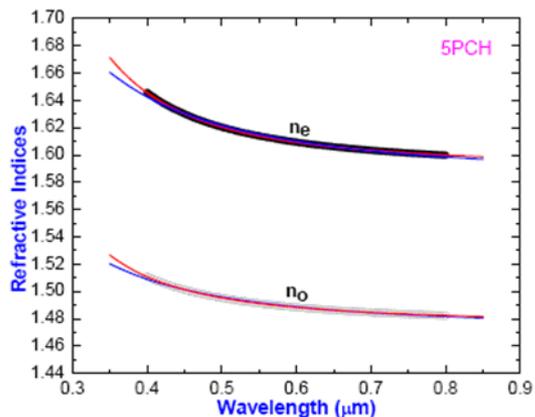


二、液晶的光电特性

两系数Cauchy模型



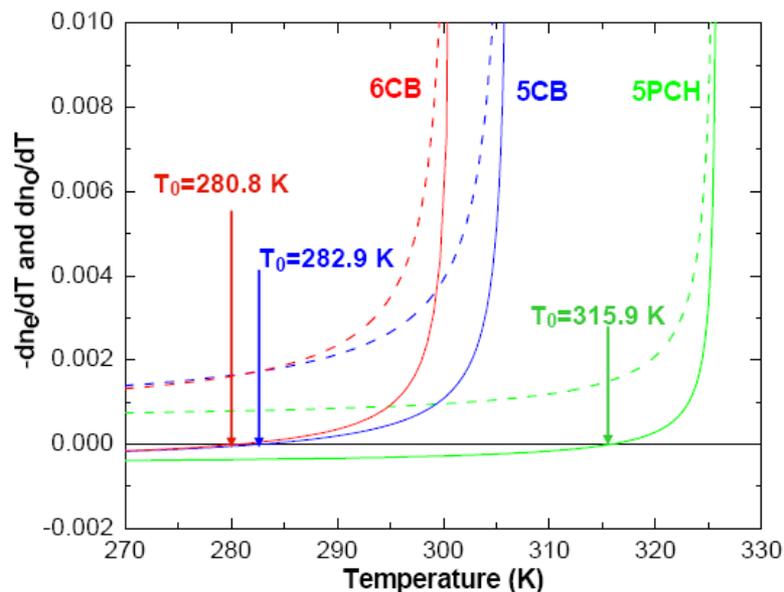
3-coefficient: $\Delta n \geq 0.2$



2-coefficient: $\Delta n < 0.12$

$$n_e(\lambda, T) = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2} \quad n_o(\lambda, T) = A_o + \frac{B_o}{\lambda^2}$$

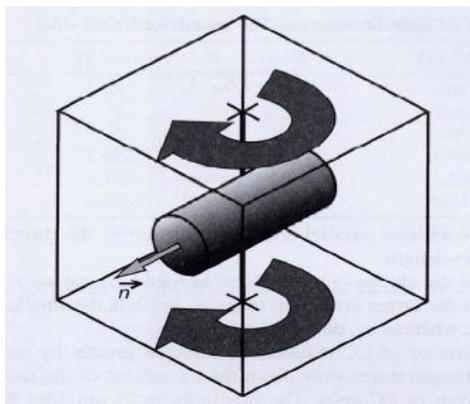
$-dn_e/dT$ and dn_o/dT



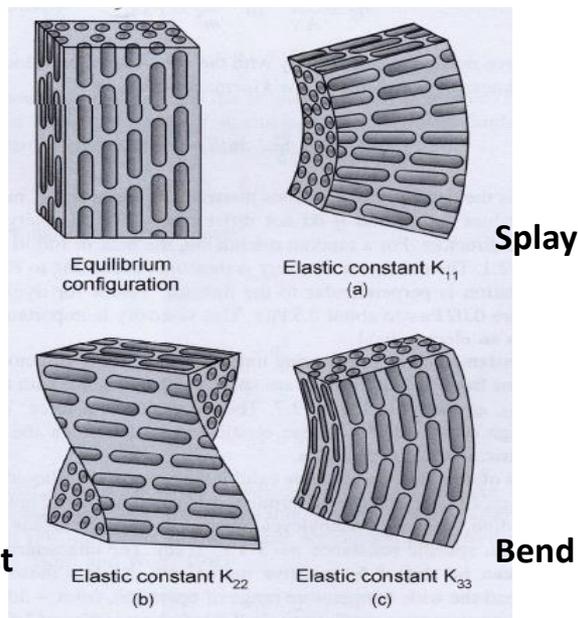


二、液晶的光电特性

3. 其它特性



垂直指向矢转向

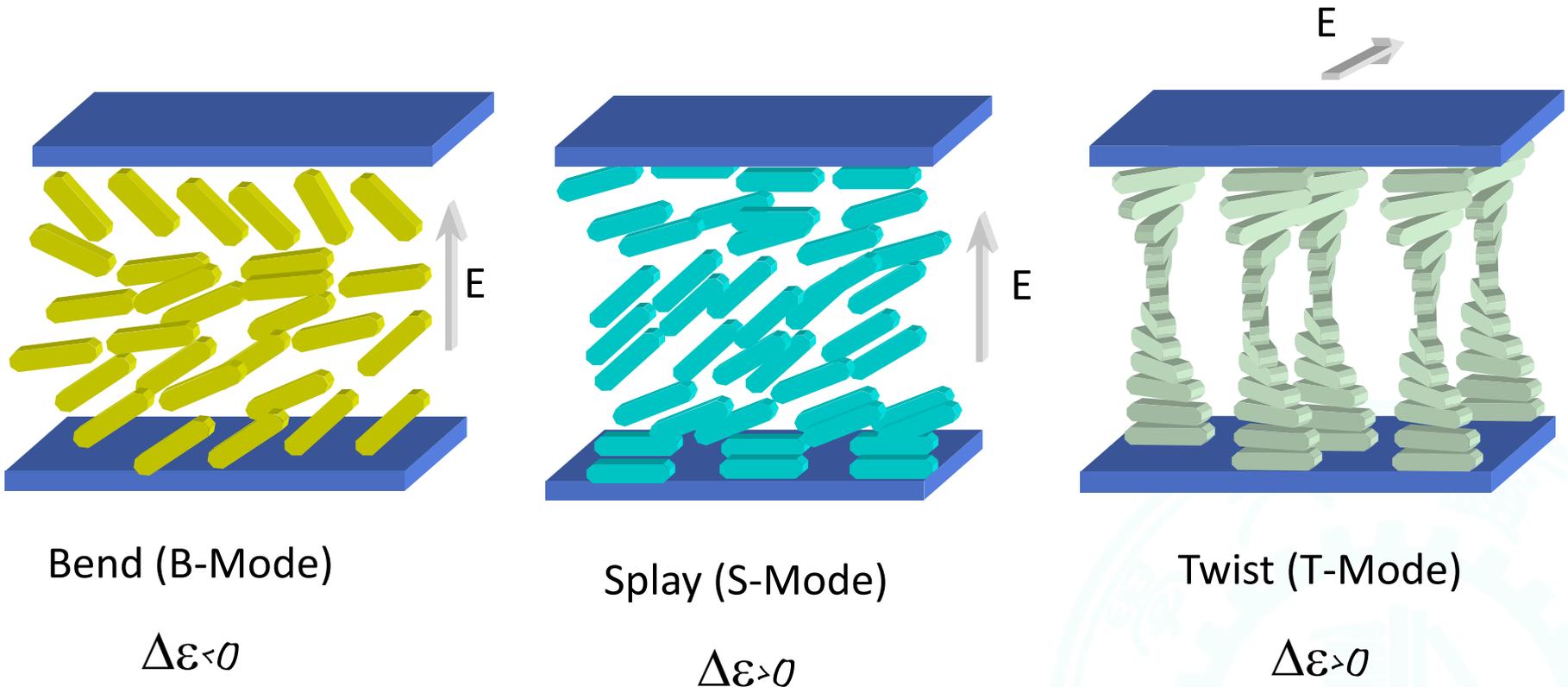


- 弹性常数(elastic constant : κ_{11} , κ_{22} , κ_{33}), κ_{11} 指的是张开(splay)弹性常数, κ_{22} 指的是扭曲(twist)的弹性常数, κ_{33} 指的是弯曲(bend)的弹性常数。
- 黏性系数(viscosity coefficients , η), 则会影响液晶分子的转动速度与反应时间(response time), 其值越小越好, 但是此特性受温度的影响最大。
- 磁化率(magnetic susceptibility), 也因为液晶的各向异性, 分成 $\chi_{//}$ 与 χ_{\perp} , 磁化率的各向异性定义为 $\Delta\chi = \chi_{//} - \chi_{\perp}$;
- 电导系数(conductivity)等等光电特性。



二、液晶的光电特性

Electrically Controllable Birefringence (ECB)

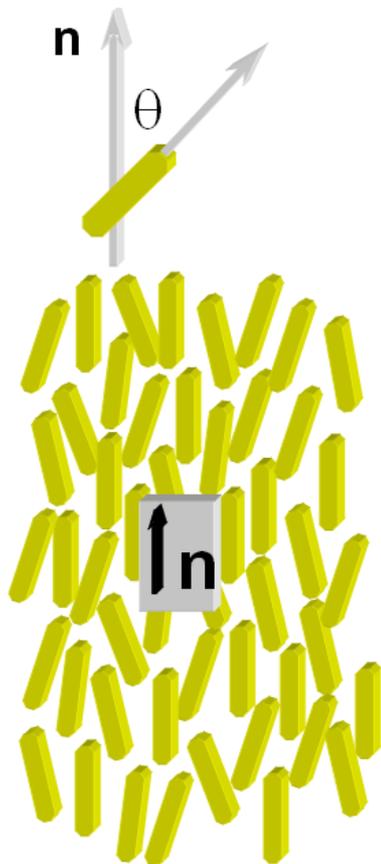




二、液晶的光电特性

液晶的序参数

Order Parameter



$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = \frac{1}{2} (3 \langle \cos^2 \theta \rangle - 1)$$

$$\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{\int \cos^2 \theta d\Omega}{\int d\Omega} = \frac{1}{3}$$

no order

$$\langle \cos^2(\theta = 0^\circ) \rangle = 1$$

perfect order

$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = 1$$

perfect crystal

$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = 0$$

isotropic fluid



二、液晶的光电特性

The order parameter S , is proportional to a number of important parameters which dictate LC performance.

Parameter	Nomenclature	proportional to \propto
<i>Elastic Constant</i>	K_{ij}	S^2
<i>Birefringence</i>	Δn	S
<i>Dielectric Anisotropy</i>	$\Delta \epsilon$	S
<i>Magnetic Anisotropy</i>	$\Delta \chi$	S
<i>Viscosity Anisotropy</i>	$\Delta \eta$	S

Example:

Does the threshold voltage for a TN increase or decrease as the operating temperature increases?

$$V_{th} \propto \sqrt{K/\Delta\epsilon} \propto \sqrt{S^2/S} = \sqrt{S}$$

Scales as the square root of S ,
Therefore, $V_{th} \downarrow$ as $T \uparrow$



二、液晶的光电特性

总结:

- 液晶的介电系数与折射系数最重要，介电系数是液晶受电场的影响决定液晶分子转向的特性，而折射系数则是光线穿透液晶时影响光线行进路线的重要参数。
- 液晶显示器就是利用液晶本身的这些特性，加适当的电压，控制液晶分子的转动，进而影响光线的行进方向，来形成不同的灰阶→可能成像。
- 单靠液晶本身是无法当作显示器的，还需要其它的材料来帮忙，以下介绍有关液晶显示器的各项材料组成与其操作原理。



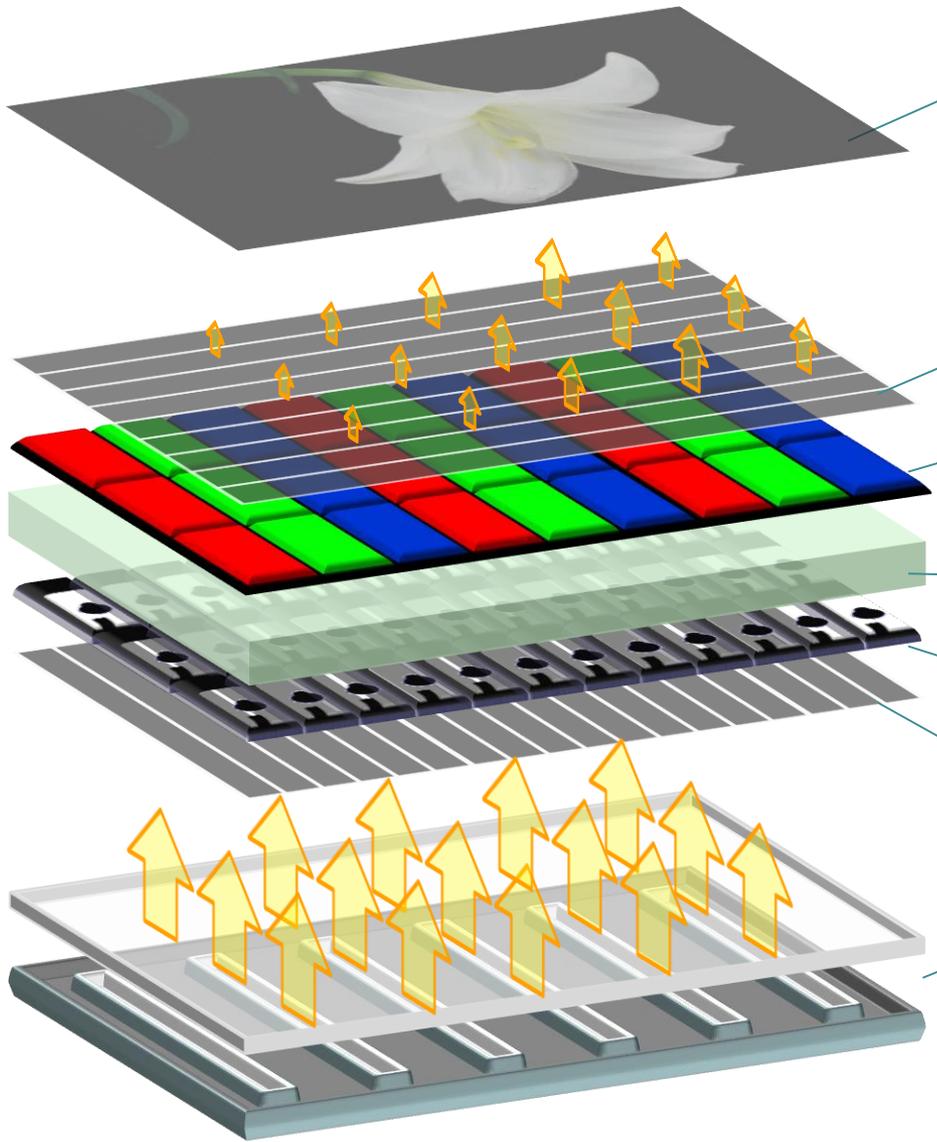


液晶材料特性及LCD原理

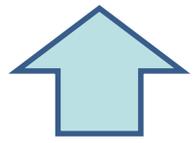
- 一、液晶分子的结构
- 二、液晶的光电特性
- 三、液晶显示器的主要组件及功能



三、液晶显示器的主要组件及功能



Very Low Efficiency ~ 5% only



Analyzer: 95%

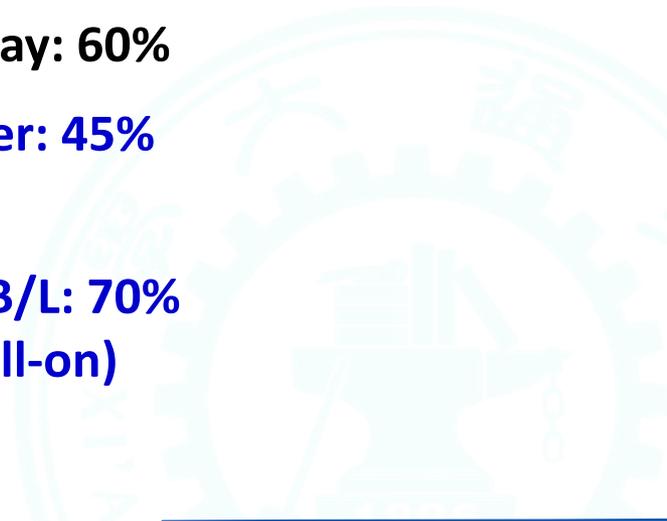
Color Filter : 33%

LC-Transmittance: 90%

TFT-Array: 60%

Polarizer: 45%

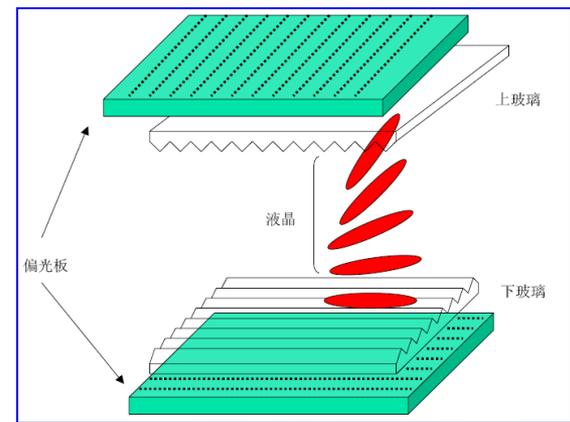
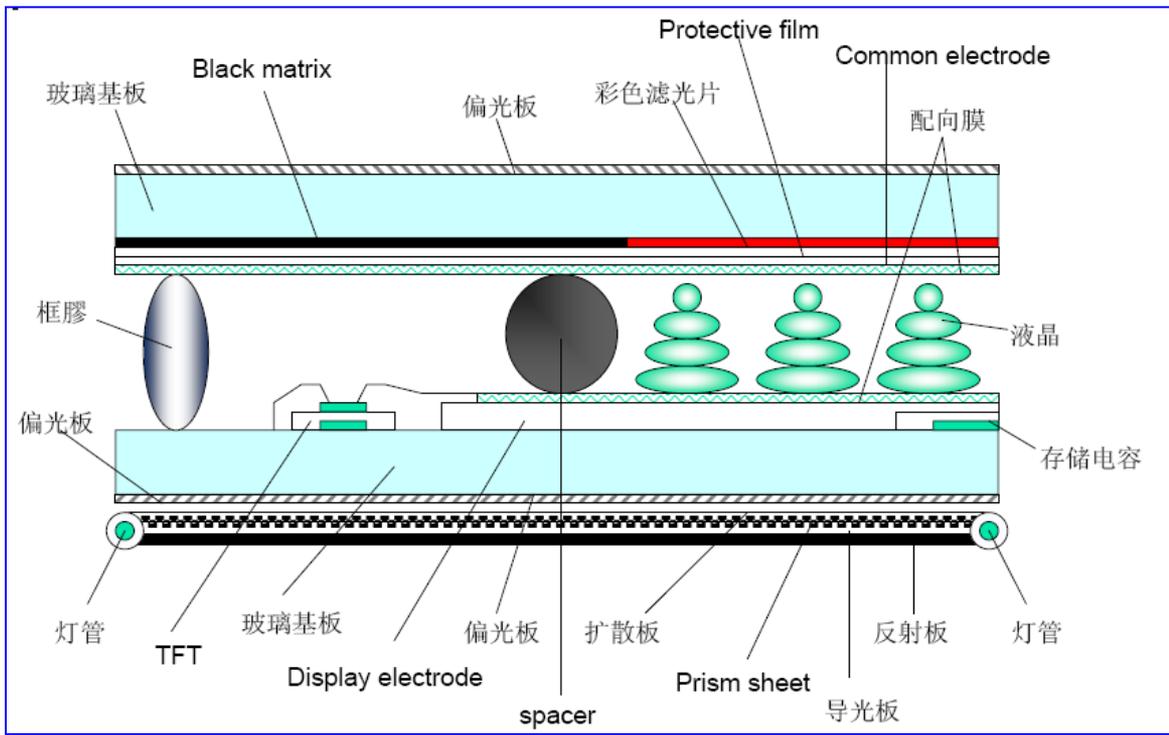
**CCFL B/L: 70%
(Full-on)**





三、液晶显示器的主要组件及功能

TN(Twist Nematic)型LCD的结构原理

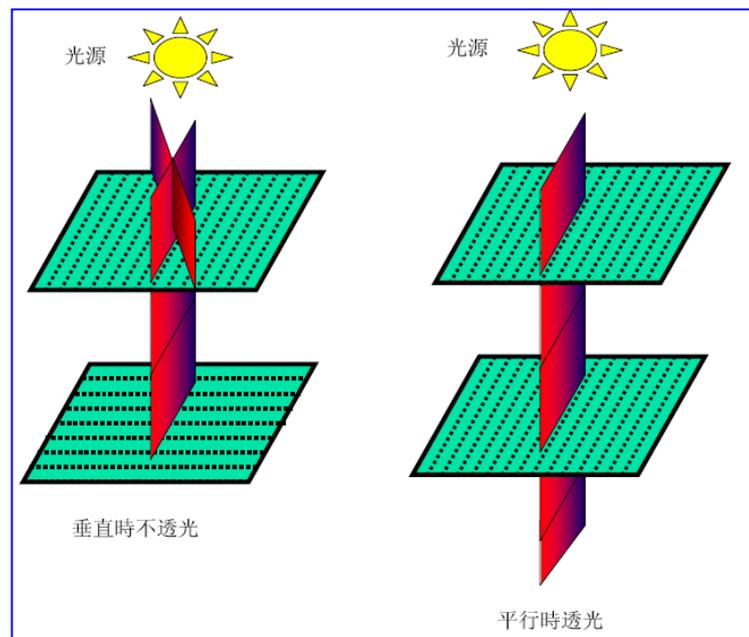
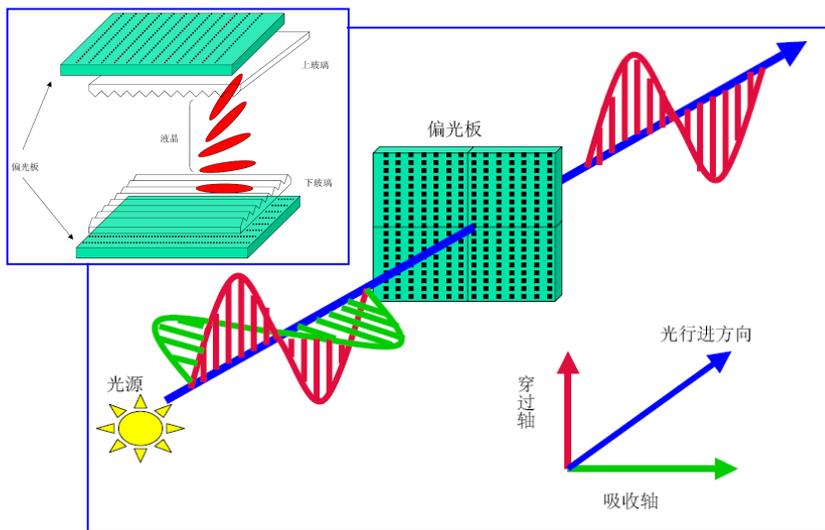




三、液晶显示器的主要组件及功能

1. 偏光板(polarizer)

- 光波的行进方向与电场及磁场互相垂直的，同时光波的电场与磁场分量互相垂直的，即：行进方向与电场及磁场分量彼此两两互相垂直。
- 旋转两片偏光板的相对角度, 会发现随着相对角度的不同, 光线的亮度会越来越暗. 当两片偏光板的栅栏角度互相垂直时, 光线就完全无法通过。
- 电场控制液晶转动, 来改变光的行进方向, 不同的电场大小, 就会形成不同灰阶/亮度了。

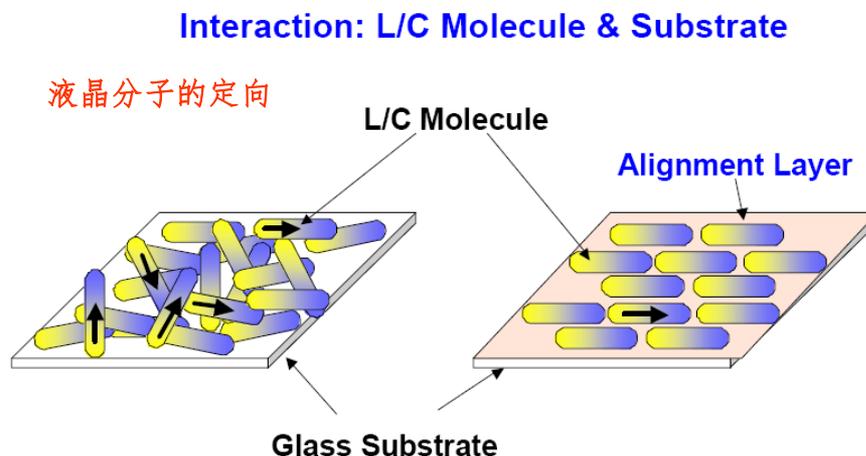




三、液晶显示器的主要组件及功能

2. 上下两层玻璃与配向膜

- 上下两层玻璃主要是来夹住液晶用的, 下层玻璃有TFT, 上层玻璃有Color filter;
- 两层玻璃在接触液晶的那一面, 并不是光滑的, 而是有锯齿状的沟槽, 主要目的是希望棒状液晶分子沿沟槽排列整齐, 如果是光滑的平面, 液晶分子的排列便会不整齐, 造成光线的散射、漏光;
- **配向膜**: 实际制造过程中无法将玻璃作成槽状分布, 一般会在玻璃的表面上涂布一层PI (polyimide), 然后再用布去做磨擦(rubbing)的动作, 好让PI的表面分子不再是杂散分布, 会依照固定而均一的方向排列, 而这一层PI就叫做配向膜, 其功能玻璃的凹槽一样, 提供液晶分子呈均匀排列的条件, 让液晶依照预定的顺序排列。

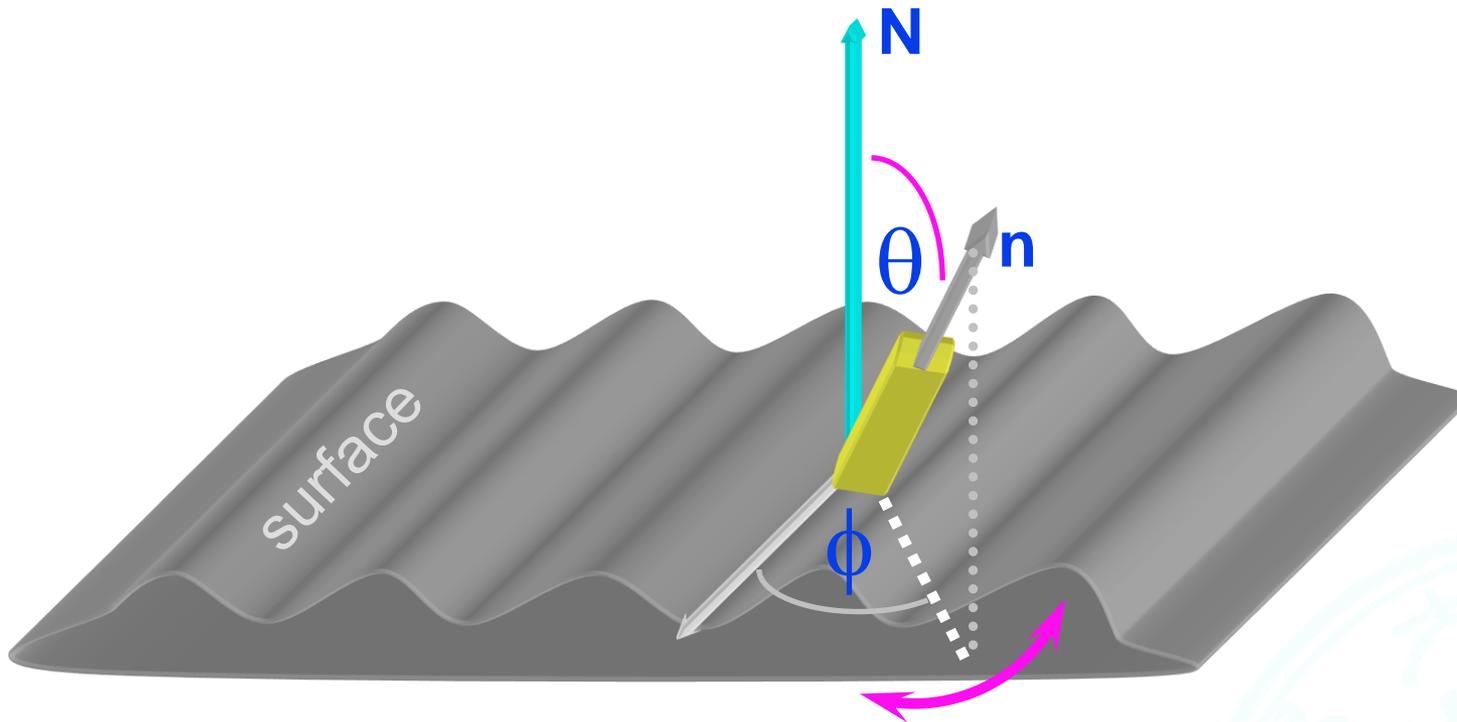




三、液晶显示器的主要组件及功能

Surface Anchoring

Polar anchoring (W_q)



Azimuthal anchoring (W_f) 方位角

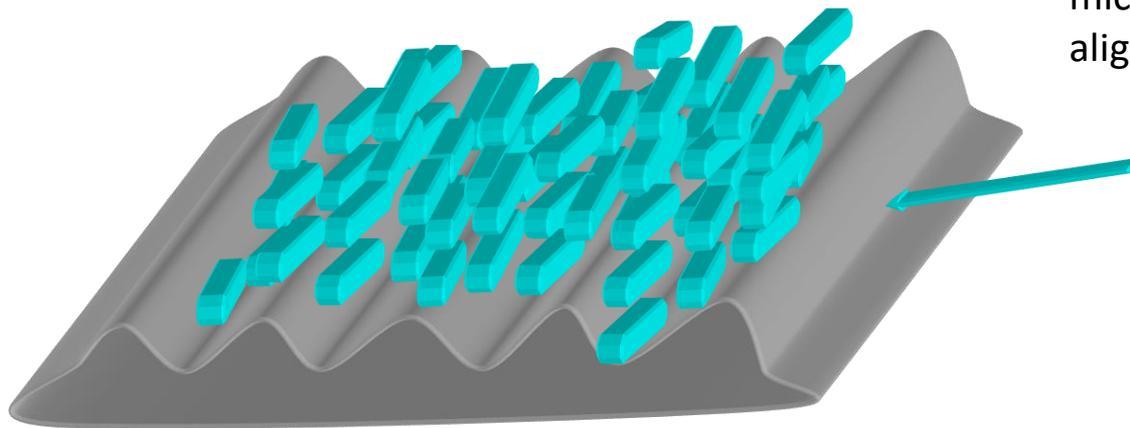
- Strong anchoring 10^{-4} J/m^2
- Weak anchoring 10^{-7} J/m^2

- W_q, f is energy needed to move director n from its easy axis



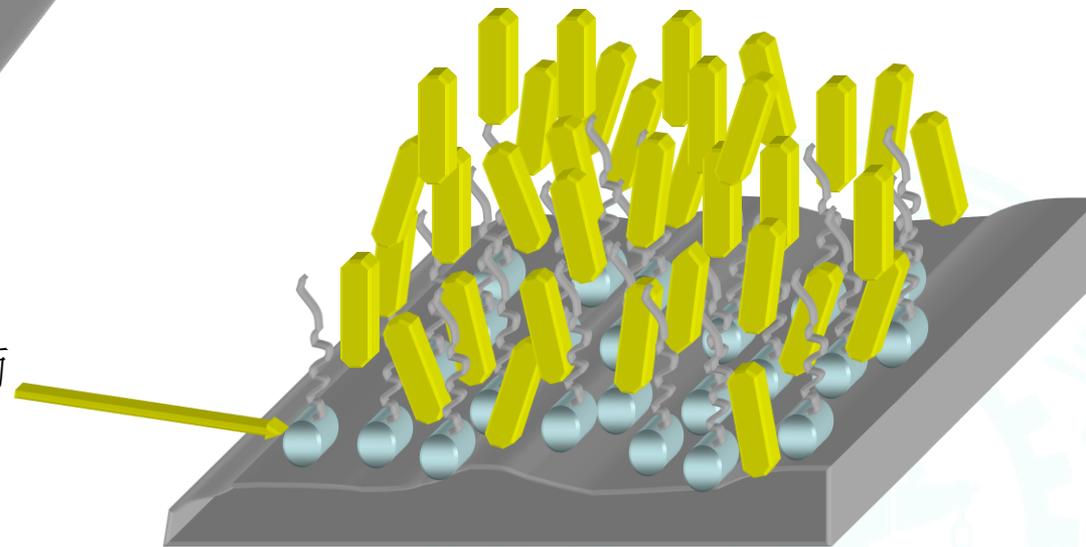
三、液晶显示器的主要组件及功能

Alignment at surfaces propagates over macroscopic distances



microgrooved surface - homogeneous alignment (//) rubbed polyimide 聚酰亚胺

ensemble of chains - homeotropic alignment (\perp) surfactant or silane/表面活性剂或硅烷

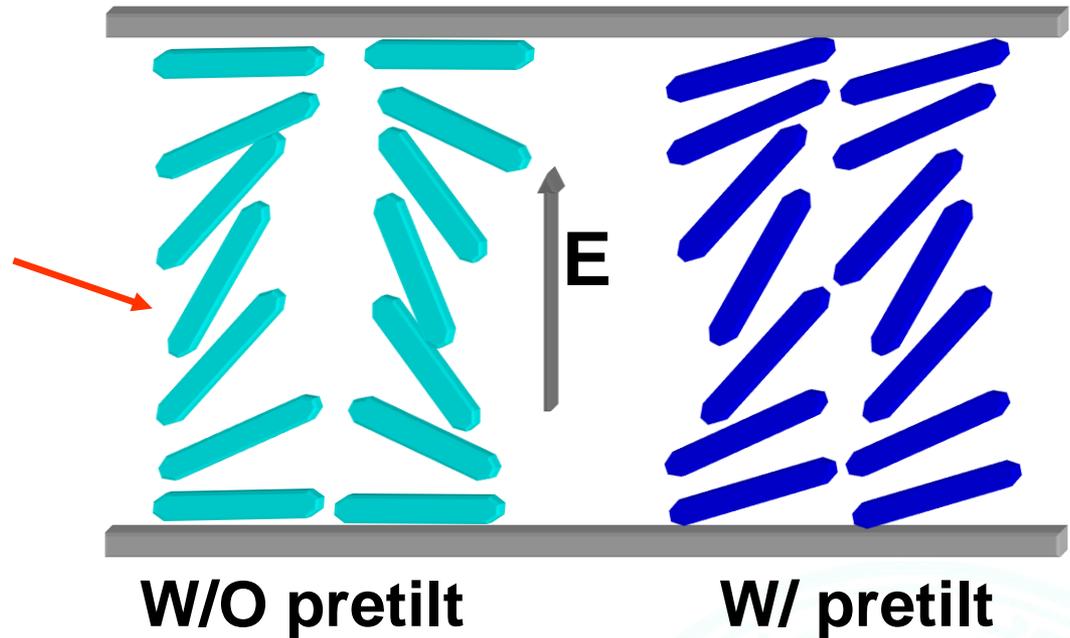




三、液晶显示器的主要组件及功能

Pretilt Angle

Pretilt angle stops
reverse tilt disinclination



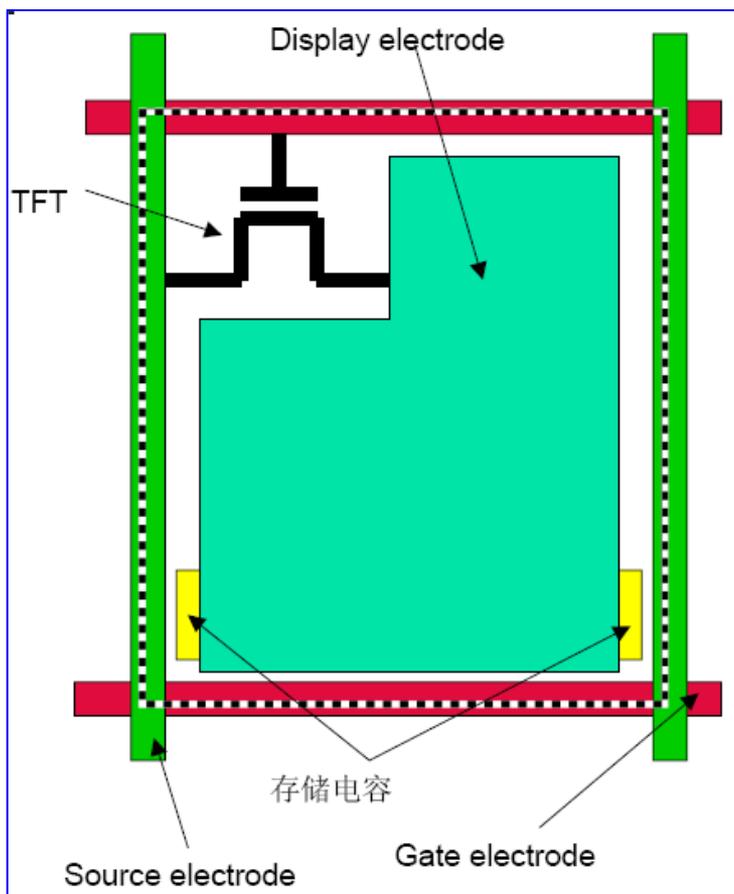
Pretilt angle effects on?

1. Threshold voltage
2. Response time
3. Contrast ratio



三、液晶显示器的主要组件及功能

3. TFT 及储存电容

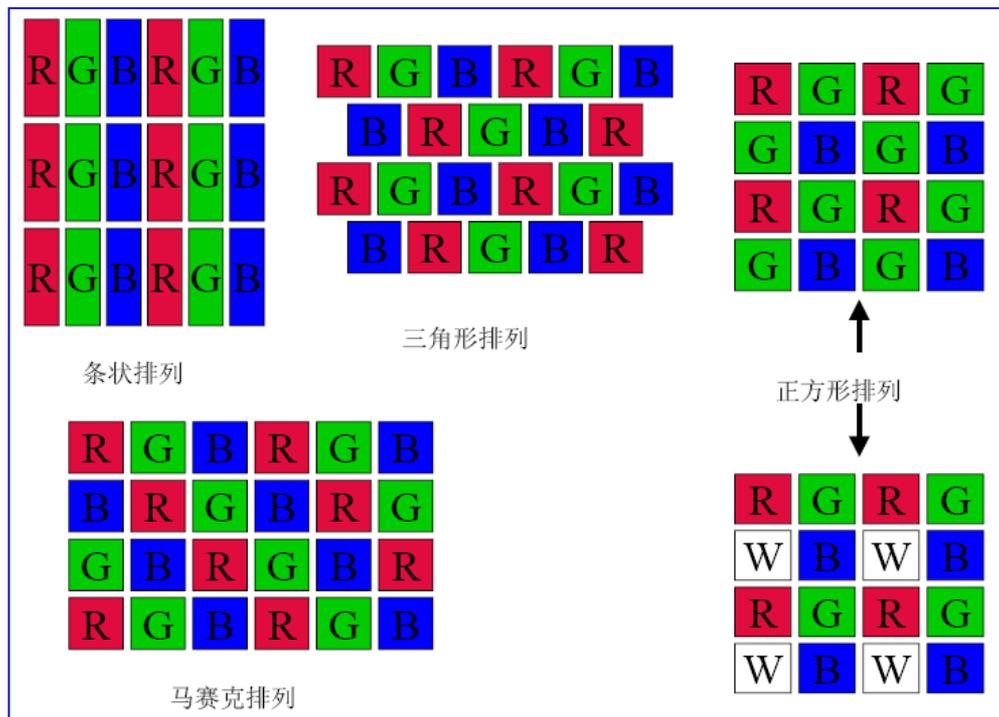
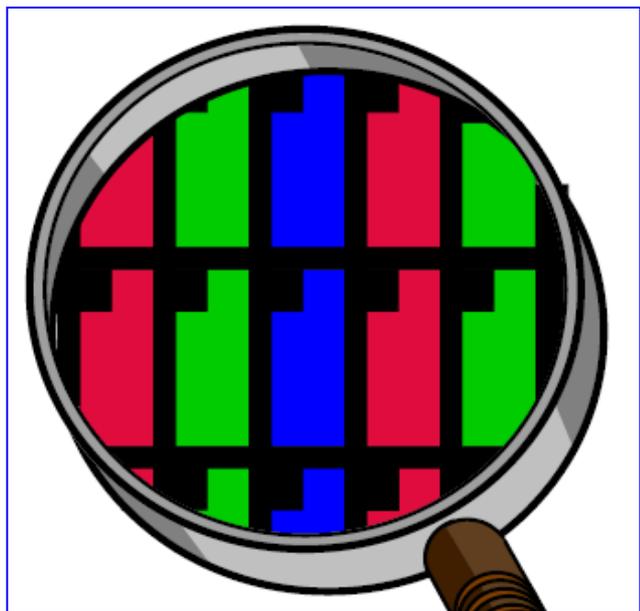


- 液晶显示器需要电压控制产生灰阶，薄膜晶体管可控制电压通过，进而控制液晶转向→TFT LCD。
- 上下两层玻璃间夹着液晶，形成平行板电容器，称为CLC (capacitor of liquid crystal)，约0.1pF。如果这个电容无法将电压保持到下一次再更新画面数据，所显示的灰度级就会不正确。
- 一般在面板设计上再加一个储存电容CS (约0.5pF)，使充好电的电压能保持到下一次更新画面时。
- 制作在玻璃上的TFT，只是一个使用晶体管制作的开关，它的主要工作是决定LCD source driver上的电压是不是要充到这个点来，至于这个点要充到多高的电压，以便显示出怎样的灰阶，都是由外面的LCD source driver来决定的。



三、液晶显示器的主要组件及功能

4. 彩色滤光片 (color filter, CF)



彩色滤光片的排列方式

- 条状排列(stripe)最常使用于OA的产品
- AV产品上：马赛克排列(mosaic，或是称为对角形排列)，三角形排列(triangle/delta)
- 正方形排列：以四个点来当作一个pixel，而四个点刚好形成一个正方形。



三、液晶显示器的主要组件及功能

5. 背光单元 (Backlight unit, BLU)

- 液晶显示器仅能控制光线通过的亮度,本身并无发光的功能,因此,必须加上一个背光板,来提供一个高亮度,而且亮度分布均匀的光源。
- 组成背光板的主要零件有灯管,反射板,导光板, **prism sheet**, 扩散板等等;
- 灯管是主要的发光零件;
- 导光板: 将光线分布到各处;
- 反射板则将光线限制,只往TFT LCD的方向前进;
- **prism sheet**及扩散板: 将光线均匀的分布到各个区域;

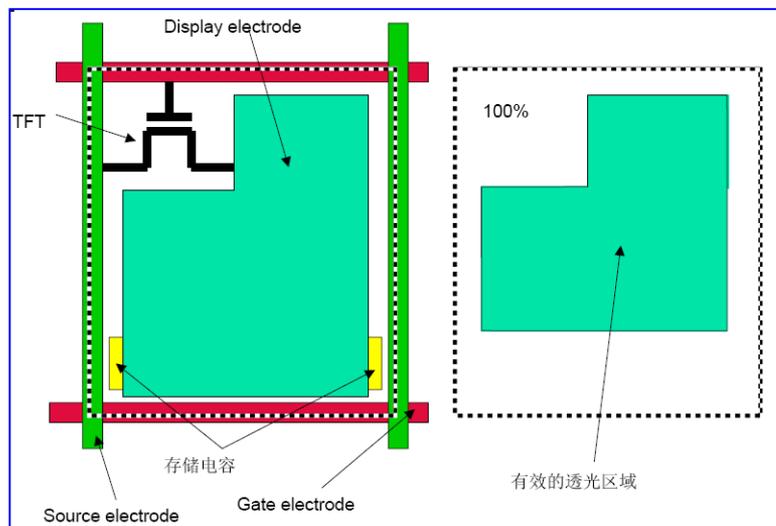
6. 框胶(Sealant)及Spacer

- 框胶: 让液晶面板中的上下两层玻璃,能够紧密黏住,并且提供面板中的液晶分子与外界阻隔,所以框胶正如其名,围绕于面板四周,将液晶分子框限于面板之内。
- **spacer**主要是提供上下两层玻璃的支撑,它必须均匀的分布在玻璃基板上,不然一旦分布不均造成部分**spacer**聚集在一起,反而会阻碍光线通过,也无法维持上下两片玻璃的适当间隙(**gap**),会成电场分布不均的现象,进而影响液晶的灰阶表现。



三、液晶显示器的主要组件及功能

7. 开口率(Aperture ratio)



- 开口率：有效的透光区域与全部面积的比例。亮度是LCD的重要参数，决定亮度最重要的因素就是开口率；
- 当光线经由背光板发射出来时，并不是所有的光线都能穿过面板，如：LCD source和gate驱动芯片用的信号走线，TFT，储存电容。这些部分除了不完全透光外，经过这些地方的光线不受电压的控制，无法显示正确的灰阶，需利用black matrix加以遮蔽，以免干扰到其它透光区域的正确亮度。



本节课结束

下一节课内容：

液晶显示器件原理与结构

