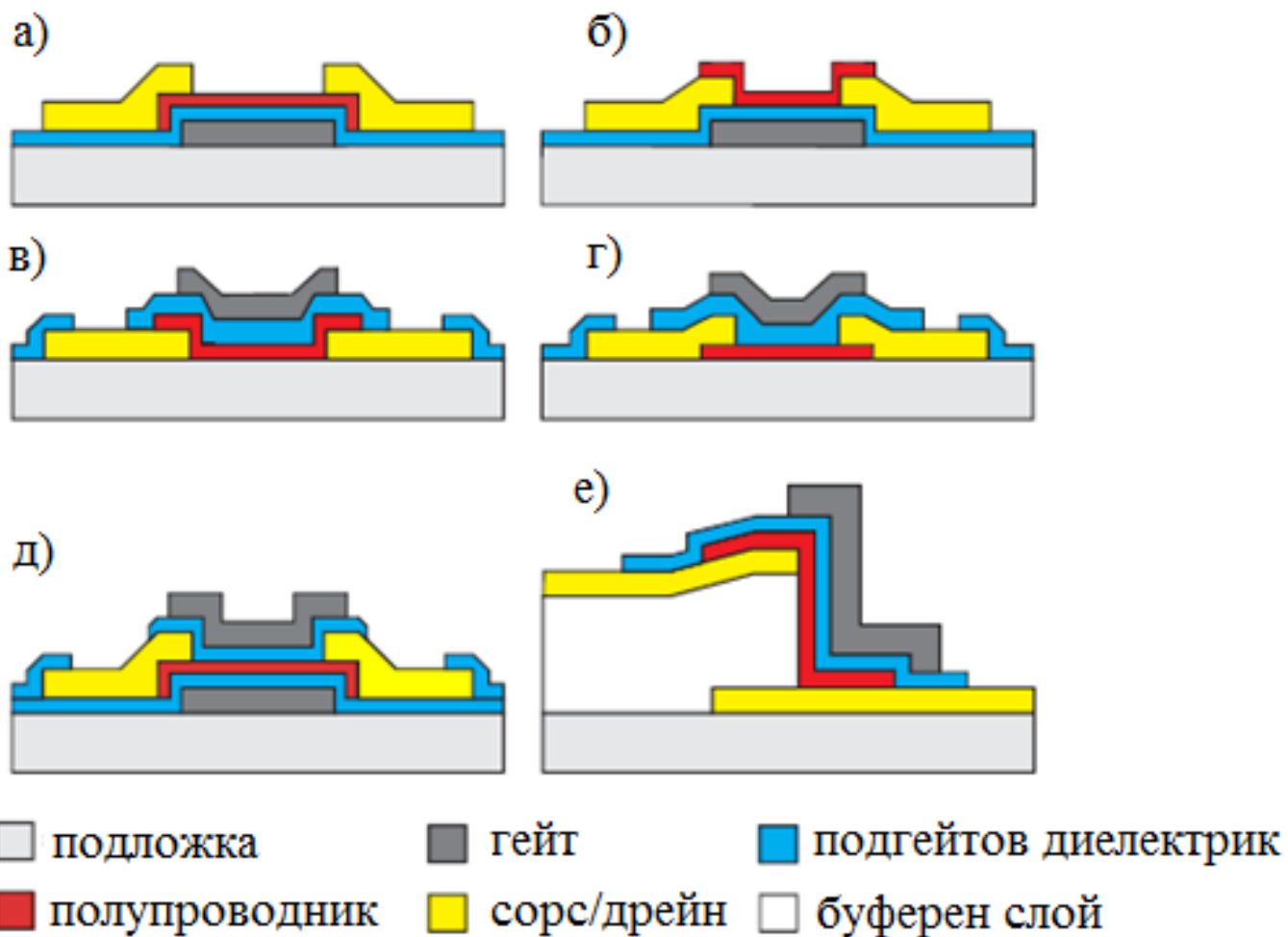


Тънкослойни транзистори (Thin Film Transistors – TFT)

- Структура на TFT
- Режими на работа и основни характеристики
- Основни материали и технологични процеси за изграждане на TFT елементите (подложка, буферни слоеве, металооксиден полупроводник, подгейтов диелектрик, електроди)
- Приложения

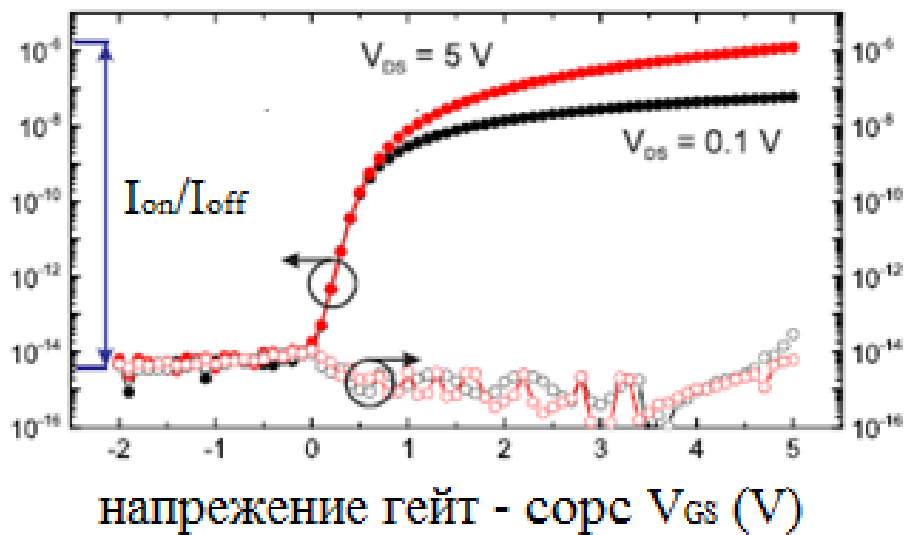
- Структура на TFT



Основни конфигурации на TFT: (а) с долен гейт (bottom-gate (BG)), (б) копланарен с долен гейт BG TFT, (в) с горен гейт (top-gate (TG)), (г) копланарен с горен гейт TG TFT, (д) с двоен гейт (double-gate (DG)) и (е) вертикален TFT (VTFT).

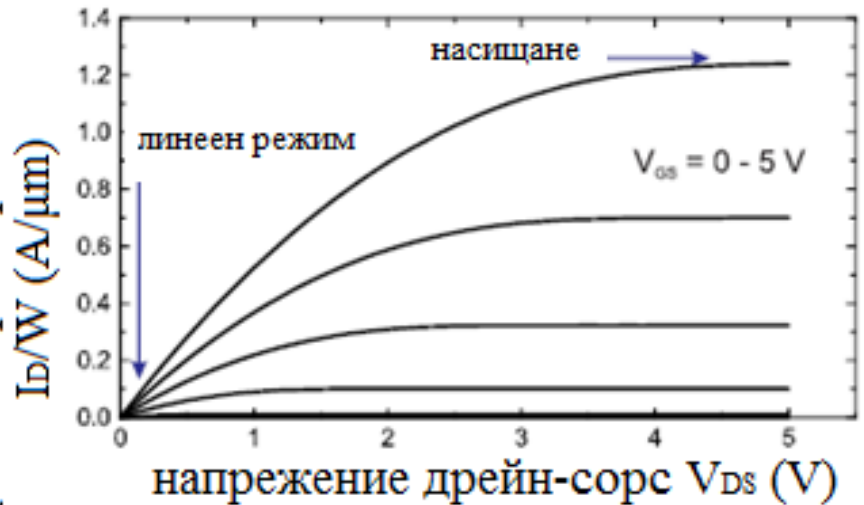
- Режими на работа и основни характеристики

Нормализиран дрейнов ток I_D/W (A/ μm)



Нормализиран гейтов ток $|I_G/W|$ (A/ μm)

Нормализиран дрейнов ток I_D/W (A/ μm)



Типични волт-амперни характеристики на TFT при дължина на канала 30 μm .

За линейния режим важи следната зависимост на тока от напрежението, където W е ширината на канала, μ е подвижността на токоносителите в канала, C_{ox} е специфичният капацитет на диелектрика на единица площ, L е дължината на канала, а V_{TH} е прагово напрежение на формиране на канала.

$$I_{D,lin} = \frac{W \cdot \mu \cdot C_{ox}}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS}$$

В режим на насищане зависимостта е следната:

$$I_{D,sat} = \frac{W \cdot \mu \cdot C_{ox}}{2 \cdot L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

При TFT подвижността на транзистора като цяло се различава от подвижността на използвания за него полупроводник! Възникват допълнителни фактори, влияещи върху подвижността, като например Кулоново разсейване на токоносителите от заряди в диелектрика под формата на дефектни състояния и повърхностна грапавост на слоевете, които контактуват. Има две компоненти, които определят общата подвижност: полева и подвижност на насищане.

$$\mu_{FE} = \mu_{lin} = \frac{L}{W \cdot C_{ox} \cdot V_{DS}} \cdot \frac{dI_D}{dV_{GS}}, \quad \mu_{sat} = \frac{2 \cdot L}{W \cdot C_{ox}} \cdot \frac{d^2 I_D}{dV_{GS}^2} = \frac{2 \cdot L}{W \cdot C_{ox}} \cdot \left(\frac{d\sqrt{I_D}}{dV_{GS}} \right)^2$$

Други важни параметри на TFT:

- Съотношение на тока на дрейна при включено към изключено състояние I_{on}/I_{off} с типична стойност 10^6
- Контактно съпротивление между дрейна и полупроводника, както и между сорса и полупроводника – влияе върху преходната проводимост.

$$g_m = I_D/V_{GS} \quad (0.012 \text{ mS за TFT и около } 0.8\text{-}1 \text{ mS за MOSFET)}$$

- Капацитет на припокриване между контакта на гейта и електродите за сорс и дрейн, особено при някои от конфигурациите, е важен параметър, тъй като пряко влияе върху граничната честота f_T на TFT, която определя бързодействието на транзистора.

$$C_G = C_{GS} + C_{GD} = C_{ox} \cdot W \cdot (L + L_{OV,TOT})$$

$$f_T = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{g_m}{C_G} \propto \frac{\mu \cdot (V_{GS} - V_{TH})}{L \cdot (L + L_{OV,TOT})}$$

- Напрежение на отпушване – зависи от V_F нивото на Ферми на полупроводника според легиращата концентрация N_a и C_i динамичния капацитет на MOS кондензатора

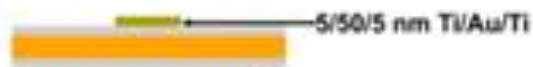
$$V_T = 2V_F + \sqrt{(2q\epsilon_0\epsilon_s N_a 2V_F)/C_i}$$

- Основни материали и технологични процеси

плазмено стимулирано
химическо отлагане от
паро-газова фаза (PECVD)



е-лъчево изпарение
и свличане



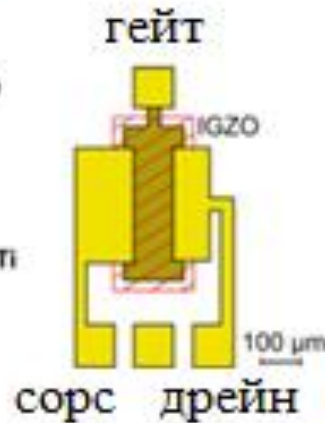
атомно послойно
отлагане (ALD)



ВЧ магнетронно разпръскване
и мокро ецване



е-лъчево изпарение
и свличане



Гъвкави TFT

Подложки – основни изисквания:

- 1) Повърхност съвместима със стандартните процеси на получаване на тънки слоеве (висока гладкост).
- 2) Температурата на топене или на фазов преход на подложката да е висока.
- 3) Сгъваема (в съответствие с механичните изисквания на крайните устройства) и в същото време стабилна.
- 4) Деформируемост на подложката, причинена от температурни градиенти, механично натоварване и др. да бъде по-малка от минималния размер на устройството.
- 5) Наличност в големи количества и размери на ниска цена.
- 6) Устойчивост на химикали като фоторезисти, проявители и ецващи разтвори.
- 7) За специфичните приложения – оптична прозрачност, разтегливост, биосъвместимост и биоразградимост.

Полиимид (PI) с дебелина на листа 5 - 125 μm (фолио Kapton) - малък коефициент на топлинно разширение (СТЕ) от $12 \cdot 10^{-6}$ m/K, слаба абсорбируемост на влага, висока температура на размекване TG = 360 °C и грапавост на повърхността под 15 nm.

Когато е необходима оптична прозрачност (както в управлението на дисплеите, например), тогава не е удачно използването му, заради по-голямата му оптична плътност. Тогава се прибегва до ПЕТ (PET) и ПЕН (PEN), които обаче са температурно чувствителни.

Защитни и буферни слоеве

- 1) Намаляват грапавостта на повърхността на подложката;
- 2) Намалява абсорбцията и десорбцията на разтворители по време на производство;
- 3) Подобрява сцеплението между подложката и слоевете.

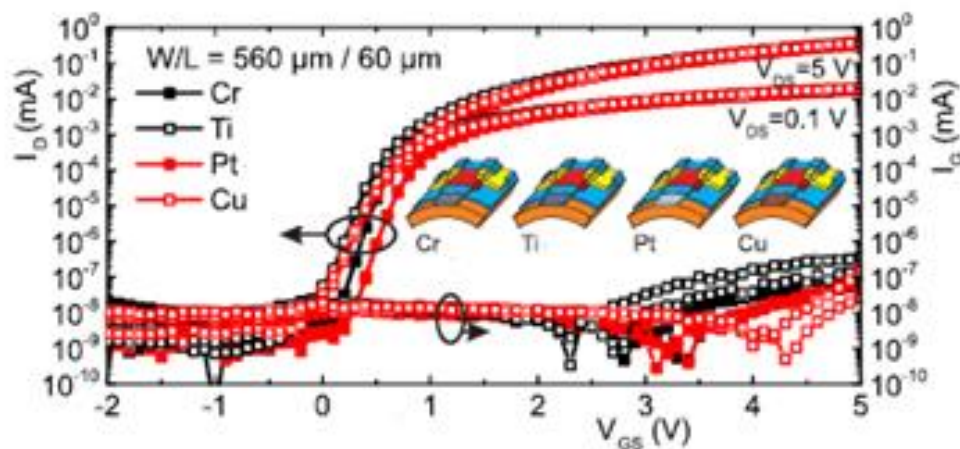
Обикновено се използва силициев оксид SiO_x , силициев нитрид SiN_x или алуминиев оксид AlO_x с дебелина около 10 nm.

Гейтов (подгейтов) диелектрик - функции

- 1) Дрейновият ток е право пропорционален на капацитета на диелектрика C_{ox} който е отношение на диелектричната му проницаемост и дебелината на слоя. За работата на нисковолтови TFT се препоръчват тънки диелектрици с висока диелектрична проницаемост.
- 2) Изолационните му свойства определят утечния ток на TFT.
- 3) Качеството на интерфейса между диелектрика под гейта и полупроводника може силно да повлияе на подвижността на токоносителите.

Използва се Al_2O_3 , който е директно анодиран върху алуминиевия гейт (лаб. упр. по Наноматериали). Диелектричната му проницаемост може да достигне >10 . Други възможни материали с голяма диелектрична проницаемост са HfO_2 , TiO_2 , Y_2O_3 .

Контактни (електродни) материали



Предавателни характеристики на гъвкави IGZO TFT, произведени с помощта на различни метали за гейт: хром (Cr), титан (Ti), мед (Cu) и платина (Pt), всички с подобни електрически характеристики.

За дрейн и сорс - молибденът и титанът осигуряват най-ниско контактно съпротивление. За прозрачни сорс/дрейн контакти се използват само ITO слоеве.

N-тип полупроводници – IGZO (индиево-галиево-цинков оксид)

P-тип полупроводници - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Zn}$ (галиево-цинков оксид)

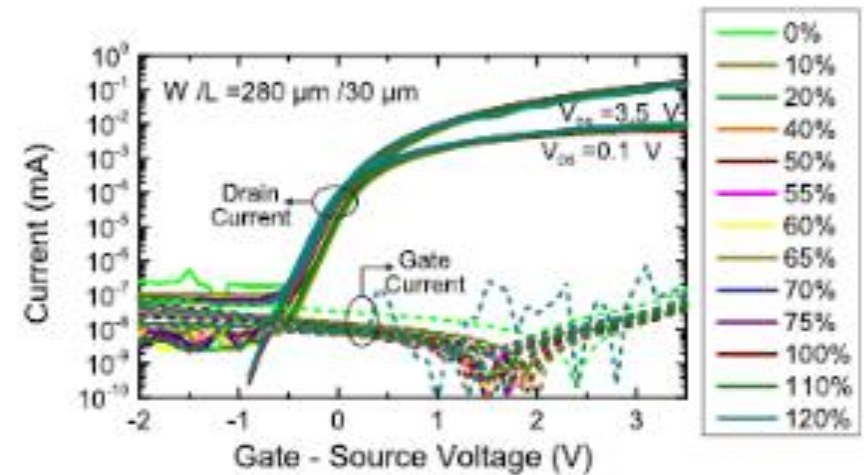
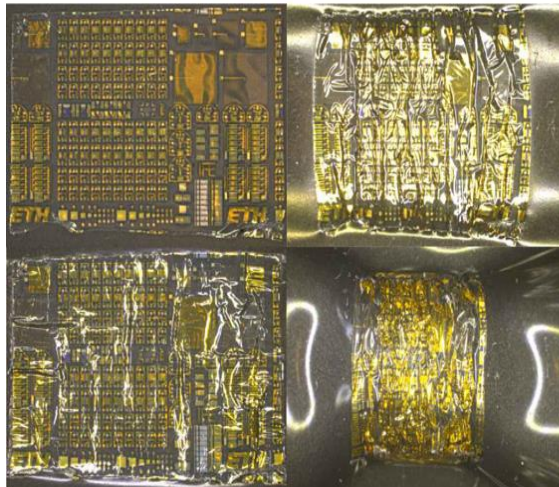
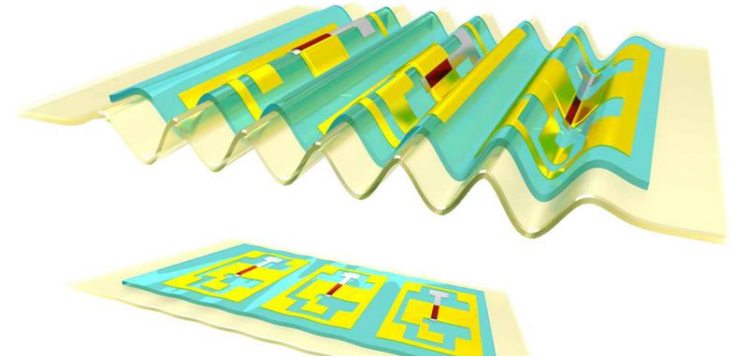
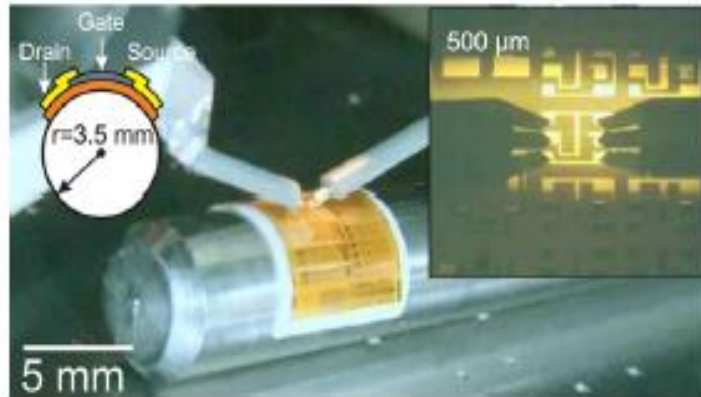
За гейта се използват (Cr), (Ti), (Cu), (Pt), като се разпръскват за постигане на по-голяма плътност и равномерност.

Когато е долен гейт контактът е двуслоен – обикновено Cr/Ti.

Когато трябва да е прозрачен контактът е от индиево-калаен оксид ITO, цинков оксид легиран с индий IZO, цинков оксид легиран с алуминий AZO.

- **Приложения**

Управляваща електроника на сензори , вкл. като биомедицински импланти

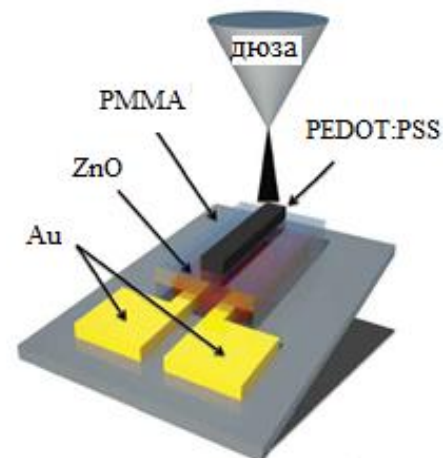


Огъваеми и разтегаеми еластични IGZO TFT, реализирани чрез вълнообразни геометрии: визуализация и микрофотографии, направени на различни етапи на разтягане и предавателни характеристики, измерени за различни нива на приложена деформация на вълнообразни устройства.

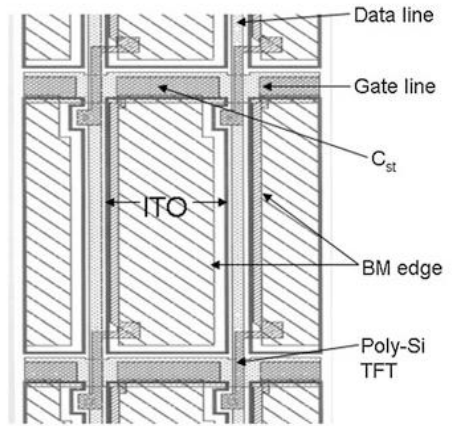
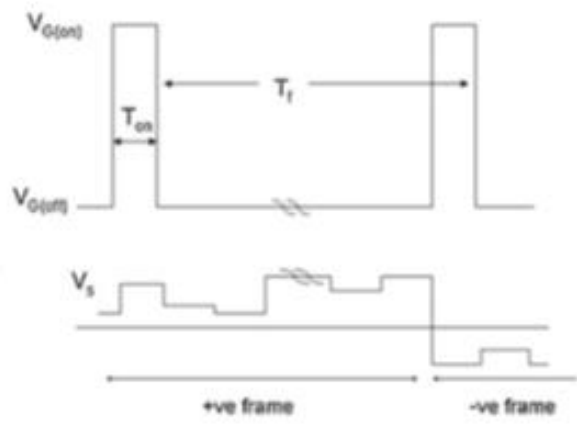
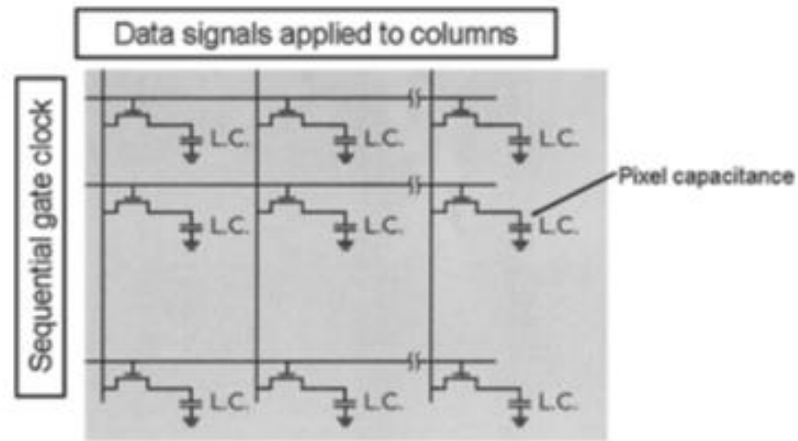
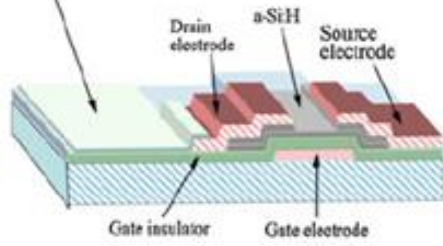
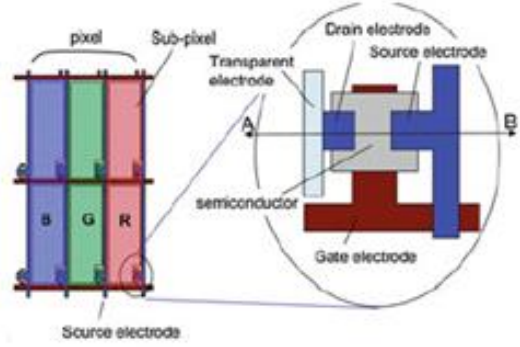
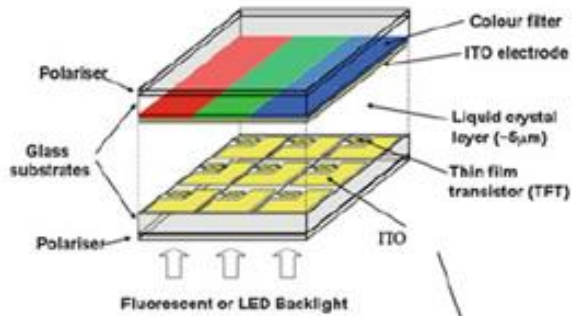
Когато става въпрос за принтирани компоненти, това означава, че изходните материали са във вид на разтвори и мастила, тоест в течна или течно-вискозна фаза. Тогава наборът от възможни материали, които трябва да са на органична (полимерна) основа, за да се разтварят лесно, се стеснява:

- бариерните слоеве са от PVP (Поливинилпиролidon);
- подгейтовите диелектрици са от полиметилметакрилат (PMMA);
- контактите са от проводящ полимер poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) легиран със сребърни наночастици;
- металооксидните полупроводници са калаен, меден и никелов оксид (SnO_x , Cu_xO и NiO).

Освен струйното принтиране е възможно и пулверизиране.



Адресираща матрица за управление на пикселите на дисплеите



$$I_{on} > 5 \times 2V_{sat} C_{LC}/T_{on}$$

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!