

**Милка Ръсовска, Мария Александрова,
Георги Добриков, Стефан Бояджиев**

ДИСПЛЕЙ

**София
2011**



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

доц. д-р Милка Маркова Минкова – Ръсовска
ас. д-р Мария Петрова Александрова
гл.ас. д-р Георги Христов Добриков
маг. инж. Стефан Иванов Бояджиев

ДИСПЛЕИ

София,
2011 г.

Списък на използваните съкращения	7
Увод	9
Глава 1 Изисквания и параметри на дисплеите. Области на приложение.	
Светотехнически параметри.....	10
1.1. Издължителни и неиздължителни плоски дисплеи.....	10
1.2. Основни параметри и характеристики на плоските дисплеи.....	10
1.2.1 Физически параметри.....	10
1.2.2 Яркост, цвет и спектрална чувствителност.....	11
1.2.3. Контрастно съотношение.....	13
1.2.4 Пространствени и времеви характеристики.....	14
1.2.5 Ефективност и консумирана мощност	15
1.2.6 Време на живот.....	15
1.2.7 Наличие на памет и възможност за съхранение на изображението.....	15
1.3. Характерни особености на различните видове плоски дисплеи.....	16
1.3.1. Течнокристални дисплеи (<i>Liquid Crystal Displays – LCD</i>).....	16
1.3.2 Плазмени дисплеи (<i>Plasma Display Panels – PDP</i>).....	16
1.3.3 Светодиодни дисплеи (<i>Light-Emitting Diode-Displays – LED</i>).....	17
1.3.4 Органични светоизлъчващи дисплеи (<i>Organic Light-Emitting Displays – OLED</i>).....	18
1.3.5 Дисплеи с полева емисия (<i>Field Emission Displays – FED</i>).....	18
1.3.6 Електрохромни дисплеи (<i>Electrochromic Displays – ECD</i>).....	19
1.3.7 Електрофорезни дисплеи (<i>Electrophoretic Displays – EPD</i>).....	20
1.3.8 Електролуминесцентни дисплеи (<i>Electroluminescent Displays – ELD</i>).....	20
Глава 2 Плазмени дисплеи (Plasma Display Panels - PDP).....	22
2.1 Въведение.....	22
2.2 Постояннотокови (DC) и променливотокови (AC) PDP. Принцип на действие.....	22
2.3 Технологичен ред на изготвяне на PDP.....	25
2.4 Технологични особености при получаването на отделните слоеве за PDP..	27
2.5 Асемблиране.....	30
2.6 Криви на Пащен.....	31
2.7 Управление на плазмените дисплеи.....	32
2.8 Плазмени дисплеи за телевизионно изображение.....	34
Глава 3 Електролуминесцентни дисплеи (Electroluminescent displays - ELD).....	35
3.1 Въведение.....	35
3.2 Променливотокови (AC) ELD. Принцип на действие.....	35
3.3 Яркост на светене. Волтъркостни и честотни характеристики.....	38

3.4 Енергетичен и светлинен добив	39
3.5 Технологичен ред на изготвяне на ЕЛД	41
3.6. Ситопечатна технология за нанасяне на ЕЛ слоеве	43
Глава 4 Органични светоизлъчващи дисплеи (Organic Light Emitting Displays – OLED).....	45
4.1 Въведение.....	45
4.2 Характерни особености на органичните материали, използвани в оптоелектрониката.....	45
4.3 OLED структура и принцип на действие.....	47
4.4 Материали и технологични особености при получаването на отделните слоеве за OLED.....	49
4.5 Технологичен ред на изготвяне на OLED.....	52
4.6 Асемблиране и стареене на OLED.....	55
4.7 Управление на OLED.....	56
4.8 Заключение.....	57
Глава 5 Течноокристални дисплеи (Liquid Crystal Displays – LCD).....	58
5.1 Течно кристали и приложението им в дисплеи.....	58
5.2 Принцип на работа на течноокристалните дисплеи.....	60
5.3 Видове течноокристални дисплеи.....	61
5.3.1 LCD с пасивна матрица.....	61
5.3.2 LCD с активна матрица. TFT (Thin Film Transistor) технология.....	61
5.3.3 TFT LCD с усукани нематични кристали (TN TFT).....	61
5.3.4 LCD със свръхусукани нематични кристали (STN LCD) и други технологии.....	62
5.4 Технология на изготвяне на течноокристалните дисплеи.....	63
5.5 Характеристики на широкоформатни LCD.....	68
5.6. Сензорни дисплеи, чувствителни на докосване (touchscreen – тъчскрийн).....	70
5.6.1 Резистивни сензорни дисплеи (Resistive Touchscreen).....	70
5.6.2 Капацитивни сензорни дисплеи (Capacitive Touchscreen).....	71
5.6.3 Проекционно-капацитивни сензорни дисплеи (Projected Capacitive Touchscreen).....	73
5.6.4 Сензорен дисплей с генериране на ултразвукови вълни (Surface acoustic wave display).....	73
5.6.5 Други типове сензорни дисплеи.....	74
5.6.6 "Мултитъч" технология (Multitouch).....	74
Глава 6 Електрохромни дисплеи (Electrochromic Displays – ECD)	75
6. 1 Въведение	75
6. 2 Физика на процеса електрохромизъм и основни параметри на ECD	75
6. 3 Структура на електрохромна дисплейна клетка и принцип на действие	77
6. 4 Технологичен ред на изготвяне и материали за електрохромни дисплеи ...	81
6. 5 Управление на електрохромните дисплеи.....	86

6.6 Приложения на електрохромните устройства.....	87
Глава 7 Електрофорезни дисплеи (Electrophoretic Displays – EPD)	89
7.1 Въведение.....	89
7.2 Принцип на действие и структура на електрофорезен дисплей.....	89
7.3 Технологичен ред на изготвяне на EPD.....	92
7.4 Технологични особености при получаването на отделните слоеве за EPD.....	93
7.5 Управление на електрофорезните дисплеи.....	95
7.6 Съвременно състояние на EPD технологията.....	95
Глава 8 Светодиодни дисплеи (Light Emitting Displays – LED).....	97
8.1 Въведение	97
8.2 Материали за изграждане на LED и технологични особености	98
8.3 Технологични процеси за изграждане на отделните слоеве в LED	101
8.4 Особености при проектирането на LED	105
8.5 Корпусиране.....	106
8.6 Приложения на LED.....	107
8.7 Управление на LED	108
Глава 9 Дисплеи с полева емисия (FED-field emission display)	111
9.1. Въведение	111
9.2. Технология за изготвяне и принцип на действие на дисплеи с полева емисия.....	111
9.3. Особености при изготвяне на катоди при FED дисплеи	116
9.4. Нисковолтови дисплеи с полева емисия	118
9.5. Високоволтови дисплеи с полева емисия	120
Списък на използваната литература	122

Списък на използваните съкращения

ВАХ - волтамперна характеристика
ВЯХ - волтъркостна характеристики
ЕДС - електродвижеща сила
ЕЛ – електролуминесценция, електролуминесцентен
ЕЛС – електролуминесцентна структура
ОУ - операционен усилвател
ПАВ - повърхностноактивни вещества
ЦАП - цифрово-аналогов преобразувател
AC PDP – Alternative Current Plasma Display Panels – променливотокови
плазмени дисплеи
CCFL - Cold Cathode Fluorescent Lamp – флуоресцентна лампа със студен катод
CNT - Carbone Nanotubes – въглеродни нанотъръбички
CRT – Cathode Ray Tube – катодно-лъчева тръба
CVD - Chemical Vapor Deposition - химическо отлагане от газова фаза
DC PDP – Direct Current Plasma Display Panels – постояннотокови плазмени
дисплеи
ECD - Electrochromic Display – електрохромен дисплей
ELD - Electroluminescent Displays – електролуминесцентни дисплеи
EML - Emission Layer – излъчващ слой
EPD - Electrophoretic Display – електрофорезен дисплей
ETL - Electron Transporting Layer – слой, провеждащ електрони
FED - Field Emission Display – дисплей с полева емисия
HDTV - High Definition Television – стандарт за високорезолюционни
телевизионни изображения
HOMO - Highest Occupied Molecular Orbital - най-висока заета молекулна
орбитала
HTL - Hole Transporting Layer – слой, провеждащ дупки
IP – ionization potential – йонизационен потенциал
ITO - Indium Tin Oxide – индиево-калаен оксид
LCD - Liquid Crystal Display – течнокристален дисплей
LEDD - Light Emitting Diode Displays - светодиодни дисплеи
LPE - Liquid Phase Epitaxy – течна epitаксия
LUMO - Lowest Unoccupied Molecular Orbital – най-ниска незаета молекулна
орбитала
LVFED – Low Voltage Field Emission Display - нисковолтови дисплеи с полева
емисия
MOCVD - metalorganic chemical vapor deposition - металоорганично химическо
отлагане от газова фаза
MVA - Multi-Domain Vertical Alignment – вертикално подреждане на групи от
течни
OLED - Organic Light Emitting Displays - органични светоизлъчващи
дисплеи
кристиали

PDP - Plasma Display Panels – плазмени дисплейни панели

PEDOT – polyethylenedioxythiophen – полиетилендиокситиофен

PFV – polyfluorenevinylene – полифлуоренвинилен

PLED - Polymer Light-Emitting Devices – полимерни светоизлъчващи устройства

PVK – polyvinylcarbazole – поливинилкарбазол

RGB – Red, Green, Blue – червен, зелен, син (за трите основни цвята на пикселите)

SDI - serial data input – сериен вход за данни

SDO - serial data output – сериен изход за данни

STN - Supertwisted nematic – свръхусукани нематични кристали

TCO – Transparent Conductive Oxides – прозрачни проводящи оксиди

TFT - Thin Film Transistor – тънкослоен транзистор

TN TFT - Twisted Nematic + Thin Film Transistor – усукани нематични кристали + тънкослойни транзистори

UV – ultraviolet – ултравиолетов

VGA - Video Graphic Array – видеографична матрица

VPE - vapor phase epitaxy - епитаксия от газова фаза

WF – work function – отделителна работа

Увод

Дисплеите са прибори, които се използват за изобразяване на различна буквено-цифрова и графична информация. Тази цел се осъществява с приложение на физични и химични явления и процеси.

Търсено на евтино производство, отличен контраст, бързо превключване, ниска консумирана мощност, висок коефициент на оптично отразяване, възможност за наблюдение от различни ъгли – това са най-важните изисквания към дисплеите, които стимулират нови открития.

В предlagания учебник са разгледани най-актуалните според авторите съвременни дисплейни устройства, а именно:

- плазмени газоразрядни;
- електролуминесцентни с неорганичен луминофор;
- органични електролуминесцентни;
- течноクリстални;
- електрохромни;
- електрофорезни.

Учебникът е предназначен за студентите от ОКС "Магистър" във ФЕТТ по дисциплината "Дисплеи". Съдържанието е свързано с учебната програма по тази дисциплина. Занятията се провеждат в лабораториите и от преподавателите на катедра "Микроелектроника".

Предлаганото от авторите учебно пособие може да се ползва с успех от инженери и докторанти, на които са необходими кратки и конкретни сведения в тази област.

Това направление в техниката интензивно се разраства и са възможни открития, които могат съществено да променят нашите представи и перспективни виждания за дисплеите.

Връщайки се в годините назад, бих искала да изкажа благодарност и признателност на чл. кор. проф. дтн Филип Филипов, който през осемдесетте години на двадесети век осигури възможността да се занимаваме с проектиране и технологична реализация на плоски газоразрядни дисплеи. Радостен е фактът, че младите членове на нашия творчески колектив в лицето на гл.ас. д-р Георги Добриков и ас. д-р Мария Александрова понастоящем също работят в областта на съвременните устройства за изобразяване на информация, а именно органични светоизлъчващи дисплеи.

Милка Ръсовска

Глава 1 Изисквания и параметри на дисплеите. Области на приложение. Светотехнически параметри.

1.1. Изълчвателни и неизълчвателни плоски дисплеи

В зависимост от това, дали генерират собствена светлина или модулират околната, дисплеите са съответно изълчвателни и неизълчвателни. Пример за изълчвателни дисплеи са плазмените дисплеи (Plasma Display Panels – PDP), светоизълчващите дисплеи на органична и неорганична основа (Light Emitting Displays – LED, Organic Light Emitting Displays – OLED), както и дисплеите с полева емисия (Field Emission Display – FED). Дисплеите със собствено изълчване се характеризират с широк ъгъл на наблюдение и с възможността да се използват както при силна, така и при слаба околнна осветеност. Когато пикселите им са изключени, те стават напълно тъмни, което прави контрастното съотношение много високо (виж подточка 1.2.3). Пример за неизълчвателен дисплей е течнокристалният (Liquid Crystal Display – LCD), при който молекулите на течния кристал се ориентират под действие на приложеното напрежение, така че да отразяват или пропускат външна светлина. Основните недостатъци на този тип дисплеи са малкият ъгъл на наблюдение и трудното различаване на изображението при слаба осветеност, както и при висока яркост на околната светлина.

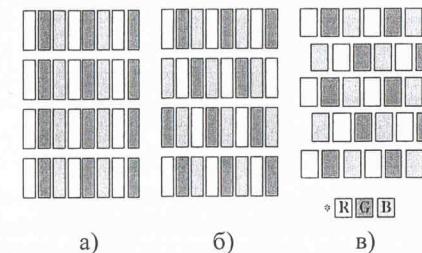
1.2. Основни параметри и характеристики на плоските дисплеи

В настоящия раздел ще бъдат въведени основните параметри и характеристики (електрически и оптични), по които се сравняват дисплеите и се оценяват техните предимства и недостатъци. Според предназначението си плоските дисплеи могат да бъдат с различни размери: 2-4 инча за мобилни телефони и дисплеи на цифрови фотоапарати и видеокамери, 7-9 инча за навигационни системи за автомобили, 8-18 инча за електронни бележници (Notebook Computers), 10-25 инча за монитори на персонални компютри, > 40 инча за телевизионни монитори. Яркостта, разделителната способност, цветовата гама, времето на живот и бързодействието са сред основните показатели, определящи качеството на дисплея.

1.2.1 Физически параметри

Основните физически параметри са размер на дисплея, формат на картина или съотношение ширина към дължина (aspect ratio) и разрешаваща способност (резолюция). Размерът на дисплея се определя от дължината на диагонала му, обикновено в инчове (1 инч = 2,54 сантиметра). В зависимост от съотношението ширина:дължина има три основни формата: хоризонтален (пейзажен), равностранен и вертикален (портретен), за които широчината е съответно по-голяма, равна или по-малка от височината. Типични стойности за

това съотношение са 4:3, 16:9 и 16:10. В плоските дисплеи изображенията са изградени от отделни точки (пиксели), чийто размер и гъстота определят разрешаващата способност. Стремежът е към получаване на изображение, състоящо се от по-голям брой точки с възможно най-малък размер. Например графичните матрици за видео изображения (Video Graphic Array – VGA) могат да имат резолюция 800x600, което означава 800 точки по широчина и 600 точки по дължина. Съществуват монитори с ултрависока резолюция 1600x1200. За получаване на цветно изображение са необходими трите основни цвята (червено, зелено и синьо – RGB), които да изградят един пиксел – така всеки пиксел се разделя на три субпиксела. В зависимост от подредбата на субпикселите има три основни конфигурации, показани на фиг. 1.1: ивична, мозаечна и «делта» конфигурация. Първият тип е лесен за получаване и не изиска сложна схема за управление на пикселите, но по отношение на смесване на цветовете отстъпва пред останалите две конфигурации. Дисплеите с мозаечна и «делта» подредба имат по-кратки времена за реакция при промяна на нивата на управляващите сигнали. Те се използват най-вече при малки по размер дисплеи, които изискват висока разделителна способност.



Фиг. 1. 1. Конфигурация на субпикселите при плоските дисплеи: а) ивична; б) мозаечна; в) «делта».

1.2.2 Яркост, цвет и спектрална чувствителност

Яркостта и цветът са две важни за дисплеите оптични характеристики. Яркостта е интензивност на изълчената светлина от единица площ в определено направление в пространството. Фотометричната мерна единица за яркост е кандела на квадратен метър според международната системата за единици SI, а според системата за мерни единици на Съединените Американски Щати е футламберт (fL), като $1 \text{ fL} = 3,426 \text{ cd/m}^2$. Наименованието футламберт идва от Ламбертовото изълчване от повърхността на плоските дисплеи, което означава, че светлината се разпространява равномерно във всички посоки (изотропно). Мониторите на компютрите имат типични стойности за яркостта $200-300 \text{ cd/m}^2$, докато широкоформатните телевизори имат яркост над 500 cd/m^2 . Особено важно е доколко цветът на изобразяваните обекти се доближава до този на реалните. Въвежда се понятието цветова гама, като идеята е степените на

светлината от тъмно до ярко за всеки от основните цветове да се разделят на 2, 4, 8 или повече части, които се наричат "сива скала" (gray scale). Ако всеки субпиксел се раздели по този начин на 8 степени, то плоският дисплей ще може да възпроизведе $2^8 \times 2^8 \times 2^8 \approx 16$ милиона цвята.

Цветът е свързан със спектралното разпределение на излъчената светлина или разпределението на интензитета на светлината във функция от дължината на вълната. Видимата светлина се намира в участъка от електромагнитния спектър между 390 и 750 nm. Възприятието на цвета е субективно, тъй като е свързано с взаимодействието на светлината със светлинните рецептори на окото, които имат определена спектрална чувствителност. Излъченият цвят зависи също така от материалите и техните физични свойства, като абсорбционен спектър, отражение и пречупване на светлината. Цветовете от спектъра на видимата светлина и съответната им дължина на вълната, респективно честота са представени в табл. 1.1.

Табл. 1.1. Спектрално разпределение на цветовете във видимата светлина

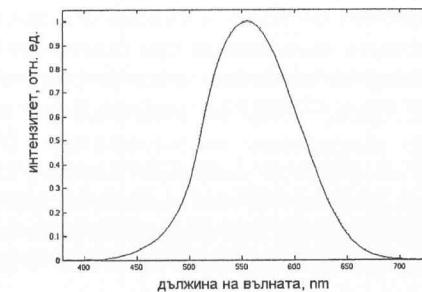
Цвят	Дължина на вълната	Честотен обхват
Червен	~ 700–635 nm	~ 430–480 THz
Оранжев	~ 635–590 nm	~ 480–510 THz
Жълт	~ 590–560 nm	~ 510–540 THz
Зелен	~ 560–490 nm	~ 540–610 THz
Син	~ 490–450 nm	~ 610–670 THz
Виолетов	~ 450–400 nm	~ 670–750 THz

Спектралната чувствителност на окото е способността му да различава цветове, която се дължи на различната чувствителност на отделните клетки от ретината към различните дължини на вълните на видимата светлина. Ретината съдържа три типа цветови рецепторни клетки. Едната е отговорна за възприемането на виолетовото и нюансите му, втората е най-чувствителна към жълто-оранжевата светлина, а третата – към зелената. Спектралната функция на чувствителността на окото, показана на фиг. 1. 2 е характеристика, представяща усреднената чувствителност на окото по отношение на светлината за различните дължини на вълната и участва в уравнение (1.1), което описва излъчения светлинен поток:

$$F = 683,002 \text{ lm/W} \cdot \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) J(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

където F е светлинен поток в лумени; $J(\lambda)$ е спектрално разпределение на мощността на излъчената светлина (мощност за дадена дължина на вълната) в единица W/m; $\bar{y}(\lambda)$ е стандартна луминесцентна функция, която е безразмерна величина; λ е дължината на вълната в метри. Стандартната луминесцентна функция е нормализирана спрямо максималната стойност на чувствителността на окото при 555 nm. Константата пред интеграла обиновено се закръгля на 683

lm/W. Стойността след десетичната запетая се получава заради разликата в дефиницията за лumen и максимума на луминесцентната (спектралната) функция на чувствителност. Луменът се дефинира като единица лъчиста енергия на 1/683 от един ват при честота 540 THz, което отговаря на дължина на вълната 555,016 nm, вместо на 555 nm, което въщност е максимумът на луминесцентната функция. Стойността на $\bar{y}(\lambda)$ е 0,999997 при 555,016 nm, така стойността на константата пред интеграла е $683/0,999997 = 683,002$. Числото 683 е свързано с дефиницията на канделата като фотометрична единица за интензитет на излъчването вместо като радиометрична.



Фиг. 1. 2 Спектрална (луминесцентна) функция на чувствителността на окото.

Спектралното разпределение на мощността представлява мощността на светлината, излъчена от единица площ за дадена дължина на вълната. Обикновено тази характеристика се нормализира спрямо стойността на спектралното разпределение на мощността за 555 или 560 nm, където е максимумът на луминесцентната функция на окото (Фиг. 1. 2).

Наситеността на цвета се определя от комбинацията между интензивността на светлината и това доколко е разпределен върху различни, но близки дължини на вълната. Най-истински ("най-чист") цвят се получава, ако излъчената светлина е само с една дължина на вълната и за нея интензивността е висока, както е при лазерите. Ако интензивността намалее, наситеността също намалява.

1.2.3. Контрастно съотношение

Контрастното съотношение CR на дисплейното устройство е оптичен параметър и се дефинира като отношение на интензитета на най-светлия цвят (бялото) L_w към интензитета на най-тъмния (черното) L_b

$$CR = \frac{L_w}{L_b} \quad (1.2)$$

По-високата стойност на CR означава по-голяма разлика между включено и изключено състояние на пиксела и следователно по-голяма цветова насыщеност. Когато CR е равно или по-малко от 1, човешкото око не може да различи включено и изключено състояние на пиксела за даден цвят, което е еквивалентно на загуба на информация. Заради ефекта на отражение от повърхността на дисплея на околната светлина уравнение (1.2) се модифицира във вида

$$A - CR = \frac{L_w + L_{ar}}{L_b + L_{ar}}, \quad (1.3)$$

където $A - CR$ е контрастното съотношение при осветеност от обкръжаващата среда L_{ar} . Този параметър се използва, за да се разграничи контрастното съотношение в реална среда, което се възприема от човешкото око от собственото контрастно съотношение на устройството. От уравнение (1.3) следва, че ако околната осветеност се увеличава (например слънчева светлина), $A - CR$ рязко намалява. За да се избегне този недостатък, трябва да са изпълнени следните две условия: (1) да е висок интензитетът на включените пиксели и (2) да се намали отражателната способност на повърхността на дисплея.

1.2.4 Пространствени и времеви характеристики

Равномерността на излъчване е свързана с промяната на яркостта или цвета по площта на дисплея. Човешкото око е чувствително към такива разлики – например 5% разлика в яркостта между съседни пиксели е забележима. Оптичните характеристики (яркост и цвят) са различни при различни ъгли на наблюдение.

За плазмените и FED дисплеите ъгълът на наблюдение е висок ($\sim 150^\circ$). При LED и OLED излъчвателният профил може да се подобри чрез подходящо структуриране на слоевете и корпусиране. При LCD дисплеите малкият ъгъл на наблюдение е един от основните му недостатъци, а причината е в течно-кристалите молекули, които заради кръстосано поляризиране са усукани по определен начин, но за наблюдение директно срещу повърхността, не и за кос ъгъл.

Времето за отговор (реакция) е важно при възпроизвеждане на картина с движещи се обекти. Ако то е малко, картина е размазана. При превключване на състоянието на пиксела от изключено във включено и обратно се определят времената, необходими за достигане на яркостта от 10 до 90% от максималната яркост и от 90 до 10% съответно. Така се определя бързодействието на дисплея. За LCD дисплеите тези времена са сравнително големи, тъй като превключването на пикселите е свързано с преориентация на молекули в субстанцията, от която се състои течно-кристалният материал. При OLED се наблюдава същият недостатък, но причината там е ниската подвижност на токоносителите в слабопроводящите органични материали.

Скоростта за реакция определя за какви приложения е подходящ дисплеят. Например, за плоскопанелен телевизионен еcran е необходима скорост от порядъка на 1 μs за последователна адресация на всяка клетка, но за други приложения е приемлива и скорост от 0,01 s (10 μs), тъй като човешкото око не може да различи изменения по-бързи от 0,01 s.

1.2.5 Ефективност и консумирана мощност

Консумацията е ключов електрически параметър особено за дисплеите в портативни устройства, тъй като от нея зависи времето на живот на батерията. По-ниската консумация предполага и по-малко генерирана топлина, която да трябва да се разсейва.

Ефективността се дефинира като отношение на изходната светлинна мощност към приложената входна електрическа мощност, а мерната единица е лumen на ват (lm/W).

За разработване на схемите за управление и захранване най-важната характеристика е мощността за управление. Трябва да се отчетат работното напрежение и ток, а също така дали те са постоянни или импулсни и ако са импулсни, дали са еднополярни или двуполярни.

1.2.6 Време на живот

След дълга експлоатация на дисплейните устройства се наблюдава спадане на максималната яркост за отделни пиксели или се появява така наречената неравномерност на изображението. Така времето на живот на пикселите е от съществена важност за качеството, особено на статичните изображения.

За да се контролира този параметър, е необходимо да се познават принципът на действие на дисплея; природата на дефектите; механизмите на образуването им в различните материали, от които е направен дисплеят; химическите или електрохимическите взаимодействия между материалите; фотохимичните ефекти; чувствителността на характеристиките на дисплея по отношение на температурата; околната влажност или електрическото поле.

1.2.7 Наличие на памет и възможност за съхранение на изображението

Паметта на дисплея се състои в способността му да съхранява изображението във включено състояние, без за това да се консумира енергия, което рязко повишава енергийната му ефективност. Това качество на някои от дисплеите (като електрохромните и електрофорезните например) води до опростяване на електронните схеми за управление на пикселите. В противен случай е необходима поредица от импулси с честота, съобразена със скоростта на избледняване на пиксела, за да се получи навременното му опресняване. При дисплеите с памет изображението може да се задържи без опресняване в продължение на десетки часове.

1.3. Характерни особености на различните видове плоски дисплеи

Тук накратко е описано предназначението на дисплеите от всяка технология, а в следващите глави подробно е изложен принципът им на действие и получаване.

1.3.1. Течноокристални дисплеи (*Liquid Crystal Displays – LCD*)

Въпреки че течноокристалните материали са открити още през минатия век, употребата им и използването на електрооптичните ефекти, които възникват в тях, започва през 1970 г. Първоначално LCD дисплеите с пасивни матрици за управление са се използвали в калкулатори и ръчни часовници. С разработването на технологията на активните матрици с тънкослойни транзистори (*Thin Film Transistors – TFT*) и цветните филтри [1] LCD навлизат на пазара като монитори на компютри и телевизори. В наши дни те са широко използвани още за мобилни телефони, навигационни системи и видео-проекторни панели. В малките високорезолюционни LCD дисплеи размерът на един пиксел е $\sim 40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$. За управлението на пикселите се използват полисилициеви (*p-Si*) TFT заради по-високата подвижност на електроните с около 2 порядъка спрямо тази в аморфния силиций (*a-Si*), което позволява управляващите транзистори да бъдат по-бързодействащи. Едно от последните постижения в LCD технологията е хибриденят TR-LCD монитор на LG, който поддържа високо качество на изображението и четливост на символите независимо от околната осветеност. Идеята тук е всеки пиксел да се разделя на два субпиксела: един за пропускане на светлината (*transmissive – T*) и един за отражението ѝ (*reflective – R*). В условията на тъмнина или слаба осветеност от околната среда заднозасветяващият панел (подсветката) е включен и дисплеят работи като пропускателен, докато при директно осветяване със слънчева светлина TR-LCD работи в отражателен режим.

1.3.2. Плазмени дисплеи (*Plasma Display Panels – PDP*)

Принципът на действие на плазмените дисплеи се основава на получаване на плазма от газов разряд при прилагане на напрежение между електродите, отложени върху стъклени пластини, които са монтирани на много близко разстояние една от друга. Пространството между пластините се изпълва с газова смес от неон и аргон, която се ионизира. Тези газове генерират емисия с дължина на вълната, която принадлежи към ултравиолетовата част на електромагнитния спектър и може да се разпространява само във вакуум, тъй като се абсорбира от въздуха. Основният недостатък на този тип дисплеи е наличието на разделители, които да поддържат фиксирано разстоянието между пластините, изпълнено с газ, и които не позволяват намаляване на дебелината на една плазмена клетка под определен размер. Освен това работното напрежение е високо ($>100 \text{ V}$), което изисква специализирани интегрални

схеми за управление, даващи високо изходно напрежение. За сметка на това плазмените дисплеи се характеризират с широк ъгъл на наблюдение, кратко време за отговор и много по-широк температурен интервал за експлоатация, в сравнение с LCD. Така плазмените дисплеи са подходящи за широкоформатни екрани за лична (телевизори) и публична (видео стени) употреба, изобразяващи, както статична, така и динамична (движеща се) картина, независимо от това дали околната температура е ниска или висока [2]. Едни от най-големите производители на плазмени дисплеи в момента са Panasonic Corporation, Samsung Electronics, Fujitsu и др. През 2008 г. Samsung пуска на пазара своя плазмен телевизор с размер 40 инча и свръхвисока резолюция (два miliona пиксела), която е в съответствие със стандарта HDTV (High Definition Television). Качеството на картина е много по-високо в сравнение със стандартните видео системи заради пет пъти по-голямия брой пиксли. На Panasonic принадлежи най-големият плазмен видео дисплей в света с размер 150 инча (381 cm), произведен през 2008г. Най-новото постижение в технологията на плазмените дисплеи е от началото на 2010 година, отново на Panasonic – 152 инча, 2160 пиксела, даващ триизмерно (3D) изображение.

1.3.3 Светодиодни дисплеи (*Light-Emitting Diode-Displays – LEDD*)

LED са дисплеи на базата на полупроводници, в които възниква електролуминесценция при прилагане на постоянно напрежение. При тях, за да се преобразува електрическата мощност в оптична, е необходимо да се инжектират токоносители през електродите в полупроводника, където те рекомбинират излъчвателно. Дължината на вълната (цветът) на светлинната емисия зависи от ширината на забранената зона на използвания светоизлъчващ полупроводник. Тъй като е трудно израстването на монокристал на голяма площ, то диаметърът на пластината за получаване на светодиодите е ограничен до 8 инча. След получаването им те се нарязват и корпусират. Размерите на единичен светодиод са няколко миллиметра, което означава голям размер на пикселите. Затова LED не могат да се използват за малки дисплеи, тъй като биха имали твърде ниска разрешаваща способност. Заради собственото си излъчване с висока яркост LED са подходящи за направата на реклами стени, информационни табели и други дисплеи на открито. Основните им предимства са невисоката консумация, механична здравина, дълъг живот и ниско захранващо напрежение. Освен за направата на дисплей, изобразяващ информация, светодиодите могат да се използват за изграждане на задно засветяващия панел на LCD. В последно време се произвеждат светодиоди за повърхностен монтаж за целите на LED, позволяващи намаляване на размерите на пикселите, но в същото време се намалява яркостта (от 1000 cd/m^2 до около 700 cd/m^2), което затруднява наблюдението при ярка околнна светлина. Помалките дисплеи на базата на точкови светодиодни матрици (*Dot Matrix LED*) се произвеждат от фирми, като TecnoVISION и National Semiconductor и служат за дисплеи на часовници аудио уредби за автомобили и др. Бум в усъвършенстването на LED дисплеите прави фирма Sansun Hi-Tech в началото

на 2009 г. чрез постигането на 36% по-ниска консумация, следвани от конкурентите си от Pioneer, които скоро след това пускат на пазара 12- инчов LED монитор за лаптоп.

1.3.4 Органични светоизлъчващи дисплеи (*Organic Light-Emitting Displays – OLED*)

OLED са електролуминесцентни устройства, работещи на принципа на LED (инжекционна луминесценция), с тази разлика, че светоизлъчващият материал е органичен тънък слой с аморфна структура. Аморфните органични материали имат много по-малка подвижност на токоносителите (около 5 порядъка) в сравнение с поликристалните (неорганичните) полупроводници, което води до малко по-високи стойности на захранващото напрежение от около 8-10 V. Все още времето на живот на OLED е с един порядък по-кратко от това на неорганичните LED, но заради аморфния характер на органичните материали има възможност те да се получават във вид на нанослоеве (около 100 nm), покриващи голяма площ (над 40 инча). Това намалява цената на този тип дисплеи, което заедно с по-високата разрешаваща способност ги прави предпочитани пред LED. OLED монитори с размери от 11 до 40 инча са вече вградени в комерсиални устройства на Sony, Samsung, Fujitsu и др. [3]. Към групата на органичните дисплеи спадат и полимерните светоизлъчващи структури – *Polymer Light-Emitting Devices (PLED)*. При тях електролуминесцентният слой е проводящ полимер, който се нанася като тънък слой от разтвор. Това прави производствения процес евтин, тъй като не се изисква сложно оборудване. Има възможност светоизлъчващата структура да се изгражда върху гъвкава подложка за бъдещо приложение в електронните вестници и други съвременни дисплеи. Все още обаче не са решени проблемите с ниската ефективност (под 5 lm/W) и краткото време на живот (под 6 000 часа), поради което тези дисплеи не са внедрени на пазара и са още в сферата на проучванията. Philips и Kodak са основните фирми, които се занимават най-усилено с изследвания в тази посока.

1.3.5 Дисплеи с полева емисия (*Field Emission Displays – FED*)

FED дисплеите използват електрони, генериирани от поле, които възбуджат луминофорни материали, за да се излъчи луминесценция. Има няколко начина за генериране на електронен поток – термийонна емисия, фотоемисия и полева емисия. При термийонната емисия електроните се възбуджат термично и преодоляват потенциалната енергийна бариера, като я прескачат. Аналогичен е случаят с възбудждането на фотогенериирани електрони, които прескачат потенциалната бариера заради енергията, получена от падащите фотони. При полевата емисия не се наблюдава прескачане, а тунелно преминаване на електроните през потенциалната бариера, която е “изтънена” под действието на силно електрическо поле. Еmitterите, излъчващи полето, са основните елементи във FED дисплея. Те са оформени като конуси, цилиндри

или тръбички, като особено актуални са въглеродните нанотръбички (Carbone Nanotubes – CNT) [4]. Еmitterите могат да се повредят от иони, генериирани при ионизацията на остатъчни газове, което намалява времето на живот на дисплея. Това означава, че трябва да се създава вакуум, за да се отстранят остатъчните газове. Основното предизвикателство пред FED дисплеите е постигането на равномерно поле, респективно електронна емисия. С изключение на това FED има предимството на праста структура, защото не е нужен заден засветяващ панел, цветни филтри, поляризатори или допълнителни оптични покрития, както това е необходимо за някои други видове дисплеи. В сравнение с LCD например FED имат по-висока ефективност на излъчване, по-кратко време за отговор, по-широк ъгъл на наблюдение и по-голям температурен работен обхват. Приложението им е широко и е свързано с изобразяване на статични и динамични картини както при ниски, така и при високи температури, за персонална и публична употреба. Въпреки че Sony е първият производител на телевизор с FED монитор през 1999 г., през 2003 г. фирмата Advance Nanotech завзема пазара с разработването на технология за получаване на легиран диамантен прах, чиито наночастици с остри върхове са много подходящи за еmitterи. Впоследствие технологията е продадена на Canon и Toshiba. През 2005 г. Motorola демонстрира дисплей с еmitterи от въглеродни нанотръбички. През 2009 г. Sony възстановява производствената си линия и представя 30-инчов телевизор с FED дисплей с разрешаваща способност 1280x960 пиксела, яркост 400 cd/m² и впечатляващо контрастно съотношение 20 000:1.

1.3.6 Електрохромни дисплеи (*Electrochromic Displays – ECD*)

Явлението, което е в основата на принципа на действие на електрохромните дисплеи, е електрохромизъм и се състои в промяна на цвета на определен клас материали след протичане на окислително-редукционен процес. Типичен представител на електрохромните неорганични материали е волфрамовият триоксид WO₃, а на органичните – полимерът poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT). Електрохромният дисплей трябва да съдържа не само електрохромен материал, а и електролит. Характерно за ECD е ниското захранващо напрежение (между 0,6 и 0,9 V). Превключването от обезцветено в цветно състояние отнема около 300 ms, но установеното състояние се съхранява в продължение на 30 мин. до 1 час. Така енергия е нужна само за опресняваща (или превключваща) цикъл, който е през големи интервали и затова тази енергия е много малка – под 1 mJ за площ на дисплея 10 cm². ECD спадат към групата на неизлъчвателните дисплеи. Атрактивно е приложението на електрохромната технология за направата на електронни вестници (e-papers). Разработени са багрилни вещества от класа на молекулните материали, които да се оцветяват в основните три цвята (червено, зелено и синьо) в зависимост от приложеното напрежение. Така отпада нуждата от използването на допълнителни цветни филтри, които намаляват яркостта на дисплея. Инженерите на Siemens създават през 2007 г. изключително тънък дисплей, който може да се изготви чрез принтиране на отделните слоеве, включително и

захранващия източник, върху хартия или фолио, което позволява получаване на продукция на много по-ниска производствена цена в сравнение с традиционната LCD технология. Принципът на действие на гъвкавите електрохромни дисплеи на органична основа се състои в изменение на цвета под действие на преместване на заряди в молекулите на оцветявящите се материали при прилагане на електрическо поле. Други водещи фирми в областта са Ntera и Acreo използвани като електрохромен слой нанопорести структури, които осигуряват дълго време на съхранение на заряда и следователно – пестене на енергия. Параметрите, които са постигнати до момента, са с над 6 пъти по-голям контраст в сравнение с LCD дисплеите, понико от 1 V захранващо напрежение и стабилност на работа в обхвата от -35 до 80 °C. Въпреки че за извеждането на първоначалното изображение се консумира повече енергия в сравнение с LCD дисплеите, веднъж постигнато то ще бъде видимо с продължение на часове, без да е необходима енергия за поддържането му. ECD са подходящи за информационни табла, часовници, измервателни уреди, електронни бележници.

1.3.7 Електрофорезни дисплеи (Electrophoretic Displays – EPD)

При електрофорезните дисплеи изображението се формира чрез пренареждане на заредени пигментни частици вследствие на приложено електрическо поле. В най-простиия вариант на такъв дисплей титаново-диоксидни частици са диспергирали в гелообразна субстанция на въглеводородна основа. Тъмнооцветено багрило също се добавя в субстанцията заедно с химически вещества – агенти, които зареждат частиците. Тази смес се намира между два електрода на разстояние един от друг около 10 μm. При прилагане на напрежение на електродите, частиците мигрират през средата към електрода със заряд, противоположен на този на частиците. Когато частиците се намират на предния панел (към наблюдателя), се вижда бяло, защото светлината се отразява обратно към наблюдателя от титановите частици. Когато частиците са в задната част на дисплея, се вижда черно, защото падащата светлина се погльща от тъмнооцветените багрилни частици. За протичането на описаните процеси е необходима малка енергия, затова тези дисплеи се характеризират с ниска консумация. Водещи компании в разработването на електрофорезни дисплеи са Sony, E Ink Corporation, Philips и Motorola. През 2005 г. Seiko пуска на пазара ръчен часовник с гъвкав EPD дисплей, а през март 2010 г. се появява и второ поколение от тези часовници, съдържащи така нареченото електронно мастило, като ъгълът на наблюдение не се влошава при докосване или огъване.

1.3.8 Електролуминесцентни дисплеи (Electroluminescent Displays – ELD)

Електролуминесцентните дисплеи съдържат неорганични излъчващи слоеве и комбинират в себе си тънкослойна и дебелослойна технология. Светлината се генерира под действие на електрическо поле, приложено върху

луминофорни материали. Разликата между ELD и LED дисплеите е в начина на възбуждане на атомите, в резултат от което се генерират фотоните. ELD се възбуджат с променливо напрежение с определена честота, докато светодиодните (LED) имат еднопосочна проводимост, получаваща се при прилагане на постоянно напрежение с определена полярност (отпушване на PN преход). Характерно за електролуминесцентните дисплеи е, че имат кратко време за отговор и стабилни електрически и оптични характеристики при големи вариации в условията на околната среда – най-вече широк температурен интервал от -80 °C до +80 °C. Това ги прави подходящи за използване като информационни табла и видеостени на открити места. Други приложения на ELD са различни видове индикатори, както и лампи за задно засветяване при течностекловидните дисплеи. Едни от най-големите производители на такива дисплеи са Planar Systems, iFire Technology Corporation и Pacer Advancing Technology.

В табл. 1. 2 са обобщени и сравнени основните параметри на различните видове дисплеи.

Параметър/ Тип дисплей	LCD – за монитор на лаптоп с размер 17 "	PDP – за ТВ екран с размер 42 "	LED – за ТВ екран с размер 42 "	OLED – прототип с размер 4 "	FED – прототип с размер 19 "	ELD – индика- торен с размер 4"	ECD – електо- рен четец с размер 6 "	EPD – електо- рен четец с размер 6 "
Яркост, cd/m ²	300 cd/m ²	1 300 cd/m ²	1 500 cd/m ²	300 cd/m ²	400 cd/m ²	100 cd/m ²	85 cd/m ²	70 cd/m ²
Работно напрежение, V	12 V	450 V	85-132 V	6-8 V	10 kV	120-180 V (4-7 kHz)	1 V	23 V
Консумация, W	35 W	650 W	100 W	67 mW	30 W	4,7 W	50 mW	30 mW
Време за отговор, ms	8 ms	10 ms	2 ms	8 ms	0,02 ms	1 ms	100 ms	5 ms
Време на живот, часа	6 000	100 000	30 000	600	30 000	50 000	100 000	15 000
Наличие на памет	не	не	не	не	не	не	да	да
Разрешаваща способност, бр.пиксели	1280x 1024	1920x 1080	1920 x 1080	160x234	1280x960	160x180	320 x 240	153x151
Ъгъл на наблюдение	105°	170°	170°	170°	160°	170°	160°	170°
Контрастно съотношение	400:1	10 000:1	30 000:1	250:1	20 000: 1	1000:1	20:1	6:1

Глава 2 Плазмени дисплеи (Plasma Display Panels - PDP)

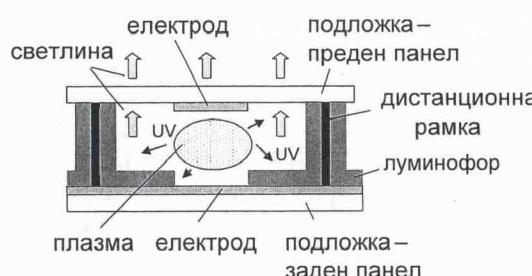
2.1 Въведение

Плазмените дисплеи намират приложение там, където е необходимо плоско изображение на буквено-цифрова и графична информация, като например големи модулни реклами, информационни табла на гари, аерогари, банки и др.

Въпреки че една плазмена клетка не може да бъде с твърде малки размери и работното ѝ напрежение е високо, PDP се характеризират с по-широк ъгъл на наблюдение, по-кратко време за отговор и по-широк работен температурен обхват от LCD дисплеите. Сравнително големият размер на клетките се дължи на дистанционните рамки. Високото работно напрежение е необходимо заради генерирането на плазмата и изисква високоволтови интегрални схеми за управление, което осъществява плазмените дисплеи, но производственият процес на самите панели е прост и евтин. PDP се използват за направата на широкоформатни монитори, както и други дисплеи (колективни или за лична употреба) за изобразяване на статична и динамична графична информация [5].

2.2 Постояннотокови (DC) и променливотокови (AC) PDP. Принцип на действие

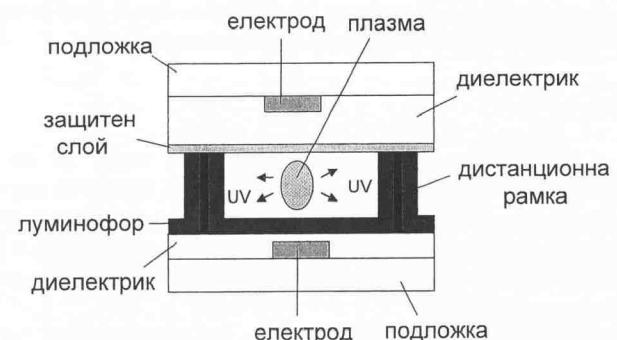
Предимството на DC PDP е простата структура, а на AC PDP – по-дългото време на живот. DC PDP използва два електрода, които са в директен контакт с газа (фиг. 2.1). За да се постигне това, част от луминофорното покритие при електродите липсва. Когато се генерира плазма, се генерира ултравиолетова емисия, възбуджаща луминофора, който всъщност свети. В този случай обаче плазмата бомбардира не само луминофора, но и непокритите електроди, което намалява времето на живот на дисплея. Затова впоследствие са създадени AC PDP.



Фиг. 2.1 Типична структура на DC PDP.

Тъй като AC PDP използват променлив ток, то в структурата е необходим диелектричен слой. Допълнително върху него се отлага защитен

слой, чието предназначение е да предпазва диелектрика от бомбардировка с ионизираните частици от плазмата. По този начин се удължава времето на живот на дисплейната структура. На фиг. 2.2 е показан напречен разрез на типична структура на променливотоков плазмен дисплей.



Фиг. 2.2 Типична структура на AC PDP.

Височината на дистанционната рамка и в двата случая е около 100 μm. Тънък слой от магнезиев оксид (MgO) се използва като защитен, тъй като има висок коефициент на излъчване на вторични електрони, необходими за поддържането на плазмата. Електродът на предния панел трябва да е с висока прозрачност за видимата светлина. Най-често използваният прозрачен проводящ материал е индиево-калаенският оксид (indium tin oxide – ITO). Тъй като проводимостта на ITO не е толкова висока, колкото тази на един метал, то за да се повиши проводимостта на електрода върху ITO, допълнително се нанасят тънки метални слоеве от хром (Cr) и мед (Cu). Предназначенето на хромния слой е да повиши адхезията на медния слой върху ITO. Задният електрод изпълнява функцията и на адресиращ. Често използван материал за него е среброто.

Четирите основни реакции при газовия разряд са възбудждане, метастабилна генерация, ионизация и ионизация на Пенинг. При прилагане на напрежение със стойност недостатъчна да се ионизират атомите в газа те се възбуджат и електроните им заемат по-високо енергийно ниво. Този процес се нарича възбудждане. За хелиев атом (He) например уравнението на възбудждане е



където He^* е хелиев атом във възбудено състояние. Междувременно този възбуден електрон може да заеме по-нискоенергийно състояние чрез излъчване на фотон с честота v (метастабилна генерация), което се описва с уравнение

(2.2). Този метастабилен атом е също възбуден атом, но с по-дълго време на живот от типичния възбуден атом (първоначалното възбудено състояние).



където He^m е метастабилно състояние на хелиевия атом. Ако се приложи по-високо напрежение, тогава газовите атоми се ионизират.

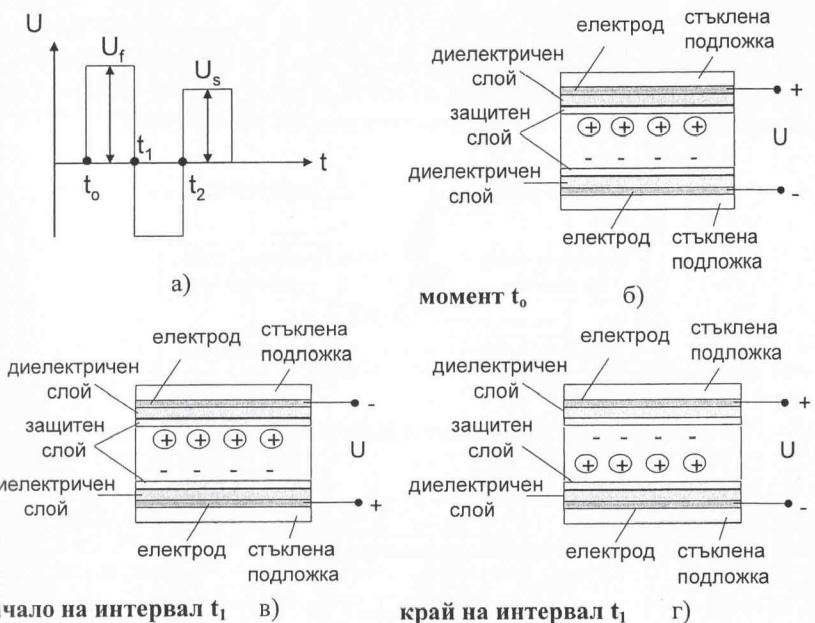


където He^+ е ионизирано състояние на хелиевия атом. За да се намали възбуждащото напрежение, се прави смес от газове, която се нарича смес на Пенинг, а ионизацията – съответно Пенинг ионизационен процес. Този механизъм използва енергийни частици за ускоряване на разряда и понижаване на напрежението на запалване на плазмата. За смес от хелий и ксенон Пенинг реакцията е, както следва:



където Xe^+ е ионизирано състояние на ксенонов атом.

На фиг. 2.3 а-г е илюстриран принципът на работа на плазмен дисплей на основата на една елементарна клетка от него. Елементарната клетка представлява подобна на кондензаторна структура. Формата на напрежението, подавано към електродите на дисплея, е показана на фиг. 2.3 а). След началния момент t_0 , когато напрежението достигне стойност достатъчна да ионизира газа (запалващо U_f), клетката се изобразява както на фиг. 2.3 б). Генерира се плазма, като положителните йони се насочват към катода, а електроните – към анода. Така върху защитния диелектрик се формира разнопосочен спрямо електрода пространствен заряд. В момент t_1 се сменя поляритетът на външното приложено напрежение, но пространственият заряд все още остава върху защитния слой (фиг. 2.3 в). Този заряд съвпада с полярността на напрежението върху съответните електроди, като така сумарната стойност на напрежението е по-голяма от необходимата за ионизиране на газа. Стойността на напрежението е по-малка от запалващото и се нарича поддържащо напрежение (U_s). Отново се генерира плазма, при което заредените частици отново се преразпределят към противоположните на техния заряд електроди (края на интервал t_1 – фиг. 2.3 г). В началото на интервал t_2 натрупаният пространствен заряд отново се сумира с приложеното напрежение до получаване на нов светлинен импулс и така процесът се повтаря.

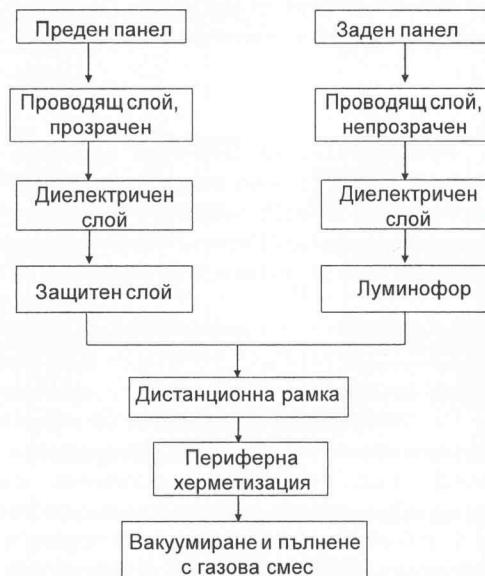


Фиг. 2.3 Принцип на действие на елементарна клетка от плазмен дисплей.

2.3 Технологичен ред на изготвяне на PDP

Основните съставни части на PDP са преден и заден панел. Фиг. 2.4 показва типичен технологичен ред за изготвяне на плазмен дисплей. Като панели за плазмените дисплеи се използват стъклени подложки, които трябва да имат следните свойства: гладкост, плоскопаралелност, минимална вълнистост, прозрачност за видимата светлина над 95%, висока механична якост, химическа устойчивост, ниска алкалност, висока топлопроводност и достъпна цена. Прозрачните проводящи слоеве от ITO могат да се получат чрез химични пиролитични методи, електронно-льчево реактивно изпарение или катодно реактивно разпращаване. При последните два метода изходният материал е смес между индий и калай в определено процентно съотношение (най-често 90:10 или 95:5 mol %), който се изпарява или разпращава в среда на кислород. Листовото съпротивление на слоя зависи от дебелината му и от количеството кислород, което се добавя по време на отлагането, и трябва да е от порядъка на 20-25 Ω/\square . Проводящите слоеве се структурират чрез фотолитография във вид на ивици – проводящи паралелни шини. На задния панел, където не е задължително електродите да са прозрачни, може да се използва дебелослойна технология (ситопечат – screen printing). Използват се проводящи пасти със специфични изисквания като по-ниска температура на

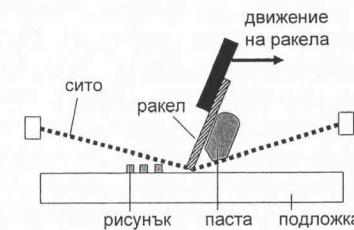
изпичане от температурата на размекване на стъклените подложки. Свързващото вещество при тези пасти е полимер, а проводящият материал е никел или мед. За получаване на слоеве от никел се използва и тънкослойна вакуумна технология. Материалите, от които се правят диелектричните слоеве, са обикновено SiO_2 и TiO_2 и се отлагат чрез катодно разпрашване.



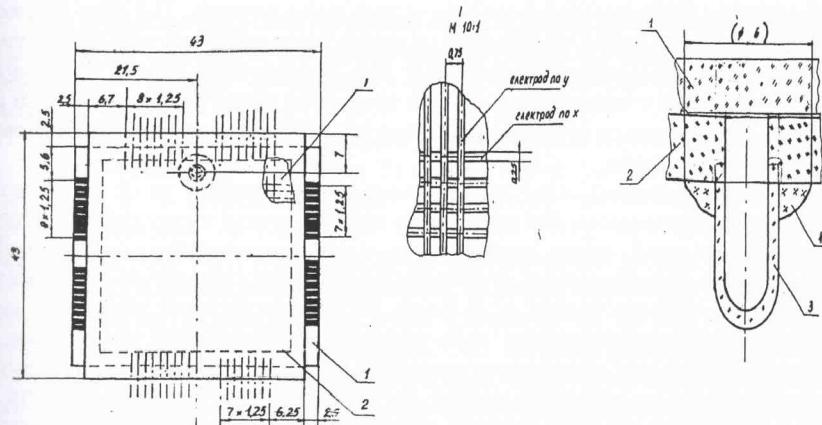
Фиг. 2.4 Технологичен ред за изготвяне на плазмен дисплей.

На фиг. 2.5 е илюстриран процесът ситопечат, който може да се приложи при получаването на задния електрод, луминофорните и диелектричните слоеве. Необходимо е пастата да преминава лесно през отворите на ситото при прилагане на натиск посредством ракела, но след получаването на отпечатъка върху подложката и премахване на натиска, пастата трябва да запази формата си, така че да се съхрани конфигурацията на рисунъка. След нанасяне на пастите следва сушение и/или изпичане. Сушенето се прилага, за да се отстранят разтворителите, при температури обикновено по-ниски от 150°C . От особена важност е равномерността на изсушаване от ръбовете към центъра на покритите с паста участъци. Изпичането се прилага за отстраняване на свързващото вещество от пастата и за нейното хомогенизиране, а температурата на процеса е над 300°C . При изпичането критичен момент е охлажддането на подложките след загряването им до висока температура, така че да не се предизвикат механични напрежения и деформации. За конфигуриране на електрода на предния панел се прилага процесът фотолитография, при който за пренасяне на изображението от шаблона се

използва фоторезист. След ецване се отстранява желаната част от материала, нанесен като електроден слой, а останалият покрит с фоторезист участък остава защитен. След получаването на необходимата конфигурация ненужният вече фоторезист също се отстранява.



Фиг. 2.5 Ситопечатна технология за нанасяне на слоеве.



Фиг. 2.6 Сборен чертеж на газоразряден плазмен индикатор. 1 – герметизиращ пръстен, нанасян чрез ситопечат; 2 – газова междина, изпълнена с газ; 3 – електрод с ширина $750 \mu\text{m}$; 4 – междина с ширина $500 \mu\text{m}$.

2.4 Технологични особености при получаването на отделните слоеве за PDP

Основната функция на предния панел е да извежда изобразяваната информация до околното пространство. Структурирането на електродите, направени от прозрачен проводящ материал върху стъклена подложка, е определящо за разрешаващата способност на дисплея. Времето на живот зависи основно от качествата на защитния слой. Дебелината на използваниите стъклени подложки е различна (до 6 mm), зависи от размерите на дисплея и се определя

от изискванията за механична здравина. Едно от основните изисквания към тях е да имат нисък коефициент на термично разширение, за да не се получи изкривяване на изображението при загряване.

Тъй като електродът на предния панел има за цел да осигури необходимата енергия за получаване на газов разряд и по този начин да го поддържа, затова той се нарича поддържащ електрод. Той трябва да е прозрачен и да пропуска светлината навън от структурата. Подходящи материали са ITO и калаенят оксид (SnO_2), като SnO_2 е по-устойчив на загряване от ITO, но пък трудно се еца. Поради тази причина по-широко използван е индиево-калаенят оксид, който има типични стойности на листовото съпротивление от около $20 \Omega/\square$ и на прозрачността за видимата светлина над 80% при дебелина на слоя около 150 μm . В някои от проектантските решения над този слой се отлага допълнителен метален слой, за да се повиши проводимостта на ITO. Този метален слой е под формата на ивица (както се структурира и ITO), но се проектира с широчина, по-малка от тази на ITO ивицата, за да не се влошава нейната пропускливост. Според проведените изследвания най-подходящ материал за тази цел е никелът. Тъй като адхезията на медния слой е слаба, то под него се отлага тъньк слой от хром. Широчината на една ивица ITO обикновено е 300 μm , разстоянието между две съседни ивици е 100 μm , а широчината на една двуслойна ивица Cr/Cu е също 100 μm . Всички тези слоеве се получават чрез вакуумно разпращване и се конфигурират чрез фотолитография.

Диелектричният слой на предния панел трябва да е с гладка и равномерна повърхност, без пори, за да израсне гладък и следващият защитен слой. Освен това слоят трябва да е с висока прозрачност и с високо изолационно съпротивление, за да може да се извежда ефективно генерираната светлина и утечните токове да са малки [6]. Диелектричният слой може да се получи по различни начини, като най-разпространеният е чрез ситопечат. Тогава се използват смеси от нискотопими стъклa с различен химичен състав. Температурата на изпечане трябва да бъде по-ниска от температурата на размякване на подложките и такава, че да не настъпват промени в проводящите шини. Диелектричната константа на тези стъклa е в интервала от 6 до 15, а дебелината на слоя – от 12 μm до 50 μm . Други методи за изготвяне на диелектричните слоеве са електроннольчевото изпарение и високочестотно катодно разпращване на различни материали като SiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 .

Задният слой на предния панел трябва да има висока механична якост и температурна и химическа устойчивост, тъй като е подложен на юнна бомбардировка от плазмената среда. Необходимо е слоят да има висок коефициент на вторична електронна емисия, за да се понижи напрежението на разряд. Отново е в сила изискването за висока прозрачност на слоя за видимата светлина. Подходящи материали са CeO_2 , La_2O_3 и MgO , но от тях MgO е най-често използван, защото е не само трудно топим, но и с голяма устойчивост на юнна бомбардировка. Типичната дебелина на този слой е 600 nm и се получава чрез вакуумно реактивно разпращване, електроннольчево изпарение или електрофорезно.

Дистанционните рамки служат не само за поддържане на фиксирано разстояние между предния и задния панел, а и за предотвратяване на паразитно прехвърляне на сигнали между отделни клетки. Качественото получаване на дистанционните рамки и луминофорното покритие е основният фактор, определящ високата оптична ефективност и дългото време на живот. Подложката, служеща като основа за задния панел, е аналогична на тази за предния, но трябва да има отвор, през който се изтегля въздухът от междината между двета панела и се извършва пълнене с газа, който се ионизира.

Задният електрод се нарича разряден електрод, тъй като осигурява енергия за ионизиране на газа. Често за направата му се използва сребърна паста с типична дебелина 10 μm , нанесена чрез ситопечатна технология. Тъй като разделителната способност на тази техника за отлагане е ограничена (широкина на ивицата не по-малка от 40 μm), то алтернативна възможност е нанасянето на фоточувствителна сребърна паста, която се структурира, като електрод чрез фотолитография. По този начин може да се постигне широчина на ивиците под 20 μm .

Към диелектричния слой на задния панел не се предявява изискването за прозрачност, но изолационното съпротивление трябва да е високо, за да бъдат малки утечните токове. Обикновено слоят се изготвя чрез ситопечат и е с дебелина 20 μm .

Стените на дистанционните рамки на двета панела служат като основа за нанасяне на луминофорно покритие. За да не е голяма разликата в налягането от външната и от вътрешната страна на панелите, налягането на газа във вътрешната междина не надвишава 1 atm (760 Torr), като обикновено се установява на 500 Torr. При това налягане височината на дистанционните рамки е около 150 μm за типична газова смес от неон и ксенон. Дистанционните рамки трябва да са колкото се може по-тънки, за да не се влошава разделителната способност на дисплея. Те се получават чрез няколко повтарящи се цикъла на нанасяне на материала чрез ситопечат до получаване на необходимата височина. Ролята на първия слой е да осигури необходимата адхезия с подложката, а последният нанесен слой трябва да е гладък, за да не се напука повърхността при слепване и герметизиране на двета панела.

Луминофорните покрития се използват за създаване на трите основни (R, G, B) цвята. Те се възбуджат от UV светлина с дължина на вълната 147 nm , излъчена от ксенона. Съединенията, от които се получава червеният, зеленият и синият цвят, са съответно $\text{Y}_{0,65}\text{Gd}_{0,35}\text{BO}_3:\text{Eu}$, $\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}$ и $\text{BaMgAl}_{14}\text{O}_{23}:\text{Eu}$. Някои от характеристиките на луминофорните материали изискват оптимизиране като например наситеността на цвета за червения, времето на живот на зеления и на синия луминофор. Ускореното стареене на луминофора се предизвиква заради окисление на европия по време на работа на плазмения дисплей. Спад в яркостта от всички луминофорни материали се получава от разпращащото действие на юните на плазмата. Освобождаване на примеси от дистанционните рамки и другите слоеве могат да замърсят луминофора и да ускорят неговото стареене. Луминофорните слоеве се получават чрез

ситопечат, а типичната им дебелина е около 30 μm . Формата на луминофорния слой трябва да осигурява голямо пространство за генериране на плазма, а самият слой трябва да е равномерно нанесен по стените на дистанционната рамка, затова процесът на нанасяне и изпичане на пастата е критичен.

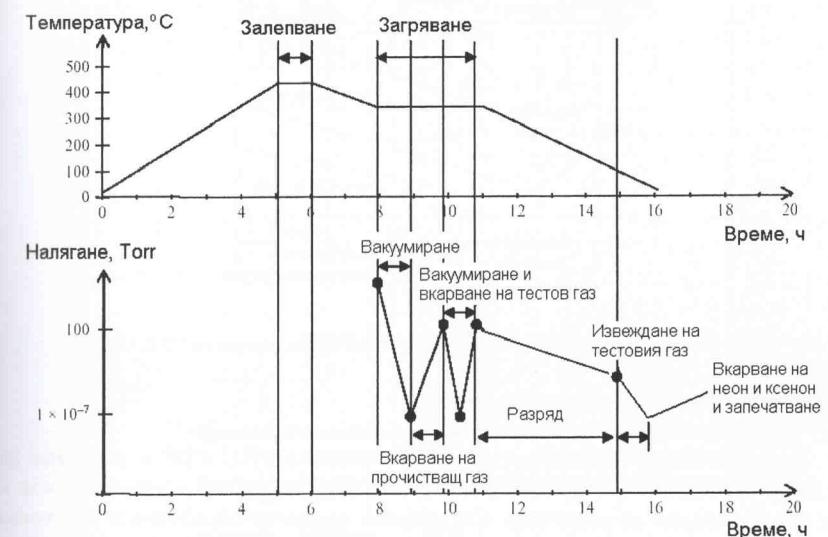
2.5 Асемблиране

Двата панела се изработват едновременно и се монтират на разстояние от около 200 μm , определено от височината на дистанционната рамка. Панелите трябва да са завъртани на 90° един спрямо друг, така че проводящите шини да са взаимноперпендикуляри. В пресечните точки на шините при прилагане на напрежение между тях се ионизира газовата смес, възбужда се луминофорният материал и се създават светещите точки (пикселите).

Асемблирането включва формиране на уплътняващ слепващ слой по периферията на панелите, герметизация и напълване с газ. Слепващият слой се прави от стъклен прах, който има по-ниска температура на топене от тази на размягкане на стъклото. Използването на материал на епоксидна основа, подобно на използваните в течнокристалните дисплеи, не е подходящо за PDP, тъй като се освобождават примеси след герметизирането. Примесите замърсяват слоевете на плазмените клетки и ускоряват тяхното стареене. Преди залепването на двата панела те трябва да бъдат добре подравнени един спрямо друг. Основното предизвикателство при съвместяването е разместяването на панелите по време на високотемпературния процес на залепване. За да не се получи такова отместване, двата панела се прихващат със специални скоби, които обаче не трябва да повреждат стъклените подложки. След като панелите са прихванати, допълнително се нанася слепваща паста около малкия отвор, направен на задния панел, където се присъединява стъклена тръбичка. На фиг. 2.7 са показани типичните процеси на запечатване на панелите, вакуумиране и очистване на примесите след първоначално тестване и запалване на плазма [7]. Залепването се извършва при високи температури от порядъка на 400-450 °C. Газът, който се отделя по време на този процес, замърсява повърхностите на слоевете в дисплея. Тъй като е необходима чиста среда в междината между панелите, то дисплеят се вакуумира и така се изхвърлят примеси като H₂, O₂, N₂, CO₂ и CO, отделени основно от луминофорните и защитните слоеве. Допълнително се вкарва прочистващ газ след първото вакуумиране, който по химичен път да почисти средата, като изпълнява ролята на гетер, абсорбиращ примесите.

Необходимо е създаване на вакуум около 10⁻⁷ Torr. След извеждането на прочистващ газ в дисплея се въвежда тестов газ. Той служи за първо запалване на плазмата, където се проявяват редица дефекти в слоевете вследствие на загряването на повърхностите, които са в контакт с плазмата. След като се изведе от системата тестващият газ, се въвежда работният газ – смес от неон и ксенон – и въвеждащата тръбичка окончателно се запечатва. Концентрацията на работния газ е от особено значение, тъй като определя интензивността на UV излъчването, напрежението на газов разряд и

ефективността на газов разряд. Процесът на затваряне на тръбичката трябва да бъде изпълнен много внимателно, за да не остане вътре в дисплея отделеният газ по време на запечатването й.



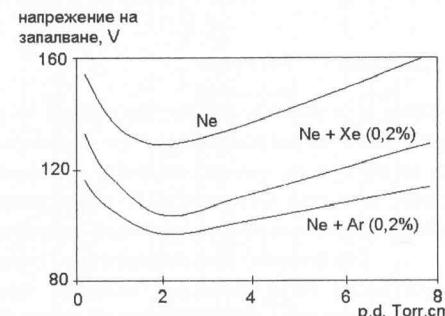
Фиг. 2.7 Процеси на запечатване на панелите, вакуумиране и очистване на примесите при първоначално тестване и запалване на плазма.

2.6 Криви на Пашен

Напрежението на запалване е свързано с произведението от налягането на газовата смес в междуелектродно пространство p и разстоянието между анода и катода d . На фиг. 2.8 са изобразени кривите на Пашен [8], от които може да се определи оптимално произведение $p.d$, за което напрежението на запалване да е минимално. В сила е уравнение (2.5), даващо връзка между запалващото напрежение U_f и конструктивно-технологичните параметри на дисплея. Допълнително това напрежение се понижава от ионизацията на Пенинг. Както се вижда от фиг. 2.8, неон с ниско процентно съдържание на ксенон или аргон има по-ниско запалващо напрежение в сравнение с чист неон.

$$U_f = \frac{A.p.d}{\lg \left[\frac{B.p.d}{\lg(1 + \frac{1}{\gamma})} \right]}, \quad (2.5)$$

където A и B са газови константи, свързани със състава на газовата смес, а γ е коефициент на вторична електронна емисия от повърхността на защитния слой.



Фиг. 2.8 Криви на Пашен.

2.7 Управление на плазмените дисплеи

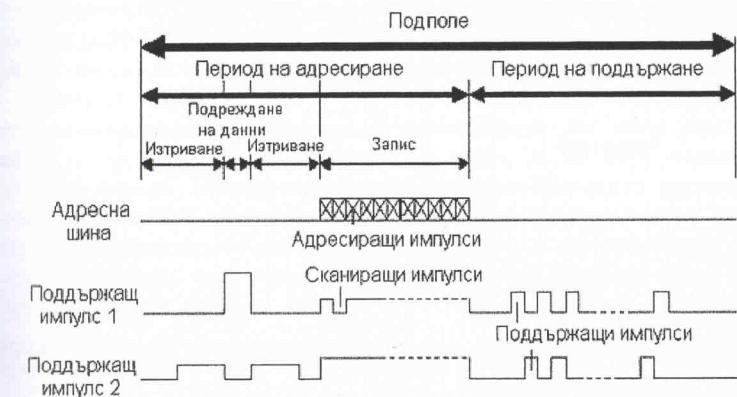
Блокова схема на системата за управление на AC PDP е показана на фиг. 2.9 и се състои от захранващ блок, сигнален процесор, драйверен блок и блок за съхранение на енергията. Сигналният процесор обработва и осигурява видеосигнала, който постъпва през драйверите към PDP. Тъй като плазмените дисплеи работят с десетки волтове напрежение, драйверният блок съдържа високоволтови интегрални схеми, които осигуряват нужното запалващо напрежение. Два от най-популярните методи за управление на дисплеи са с модулиране на сигнала по амплитуда и по време. Тъй като променливотоковите плазмени дисплеи имат памет, по-удачно е да се използва модулация по време.

Всяка адресна шина има подполета, които са толкова на брой, колкото са желаните степени на сивото, които трябва да се превключват. Управляващите сигнали се състоят от адресиращи импулси и поддържащи импулси, както е показано на фиг. 2.10. Периодът на адресиращите импулси за всички подполета е един и същ, докато периодът на поддържащите импулси е различен за различните подполета. Периодът на адресиращите импулси е разделен на четири подпериода – изтриване, подреждане на данните, изтриване, запис. Периодът на запис се определя от времето, необходимо за сканиране на една линия и от броя линии, които трябва да се сканират, за да се получи изображение. Типични стойности на времето за сканиране на една линия е няколко микросекунди, а броят линии за сканиране е 480 за VGA (Video Graphic Array) формат, който осигурява стандартна разрешаваща способност 640x480. Тъй като степените на сивото се определят от поддържащите импулси, то различните периоди за всяко подполе водят до формиране на различни нива на сивото. Съотношението на периодите на поддържащите импулси е 1:2:4:8:16:32:64:128 единици време. На фиг. 2.11 е показана типична времева

модулация на 8 подполета, водеща до получаване на 256 нива на сивото (8 бита).

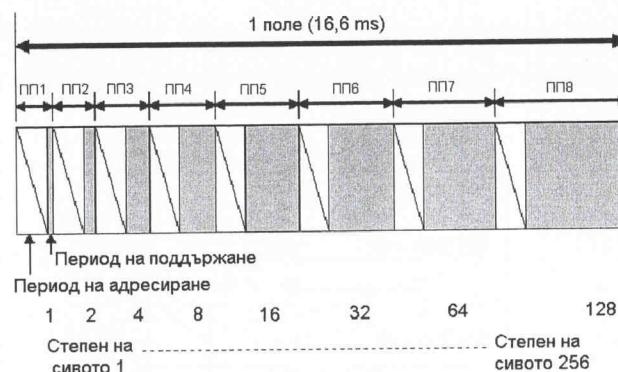


Фиг. 2.9 Блокова схема на системата за управление на AC PDP.

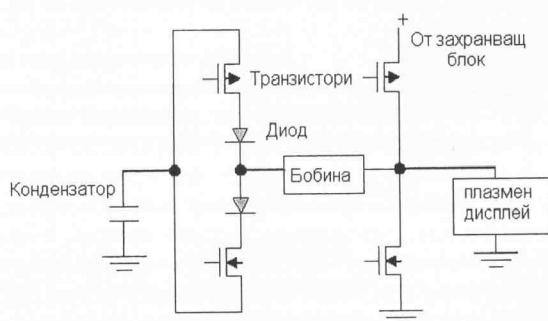


Фиг. 2.10 Типична форма на сигналите от изхода на драйверния блок.

На фиг. 2.12 е показана електрическа верига, използвана за съхраняване на енергията при AC PDP. В схемата основната роля се изпълнява от кондензатора, в който се натрупва енергия, докато се подава напрежение и към дисплея. Бобината служи като защитен елемент, предпазващ веригата от рязката смяна на поляритета на импулсното напрежение. Натрупаната и съхранена по този начин енергия може да бъде върната през драйверната верига обратно към дисплея и да бъде отново използвана. По този начин се повишава енергийната ефективност на плазмените дисплеи.



Фиг. 2.11 Типична модулация на сигнала с 256 степени на сивото; ПП – поддържано поле.



Фиг. 2.12 Електрическа верига, използвана за съхранение на енергията при AC PDP.

2.8 Плазмени дисплеи за телевизионно изображение

Телевизионното съдържание се състои основно от подвижни изображения. Статичната картина с висока резолюция изглежда брилянтно, но когато изображението е бързо движещо се, много от телевизорите предават картина „размазано“. Фирма „Panasonic“ например произвежда екран с бързодействие 1 μ s, при който горепосоченият недостатък не се избягва. Консумацията на енергия зависи от изображението на экрана. Черното се постига с изключване на пикселите и затова консумацията на енергия при тъмни сцени намалява значително. При наличие на фотосензор (работа в еко режим) се измерва околното осветление и яркостта на картина се настройва автоматично, като може да се стигне до 55% намаляване на енергията в стая с приглушеное осветление.

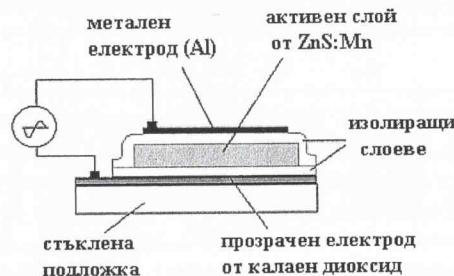
3.1 Въведение

Електролуминесцентните дисплеи намират приложение там, където е необходимо плоско изображение на буквено-цифрова и графична информация. Те могат да бъдат проектирани и изгответи с различни размери, като условно се разделят на два основни типа - широкоформатни и със сравнително малки размери на електролуминесцентната (ЕЛ) клетка [9]. В зависимост от конкретното приложение се избира големината на дисплея и технологиите за неговото изготвяне. Широкоформатните дисплеи намират приложение за големи модулни реклами, информационни табла на гари, аерогари, банки и др. Дисплеите с по-малки размери за системи с индивидуално ползване от типа на часовници, калкулатори и дисплеи на различни електро- и електронни уреди и машини от бита и производството.

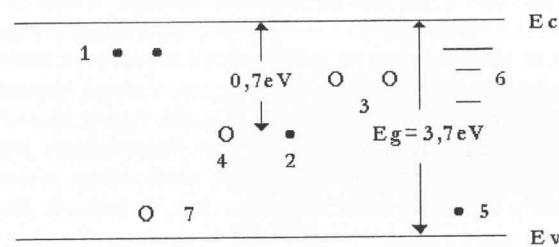
Системите за изображение на пълноцветна динамична информация имат много сложни схеми за управление. Оказва се, че цялото внимание трябва да бъде насочено за разработка на тези схеми, а също така и към материалите за тяхното изготвяне. Също така те работят при сравнително високо работно напрежение (120-180V) и честота от 1 до 4 kHz, необходимо за генерирането на светлинна емисия в неорганичните ZnS електролуминофори. Именно поради тези причини приложението на ЕЛ дисплеите с неорганични електролуминофори е ограничено до използването им като различни по големина и приложение информационни табла, а не като телевизори и компютърни екрани. Изключение правят половоемисионните дисплеи (FED-field emission display), които могат да се разглеждат като частен случай на електролуминесцентните. Като цяло ЕЛ дисплеите се характеризират с широк търгъл на наблюдение, кратко време за отговор, дълго време на живот и широк работен температурен обхват.

3.2 Променливотокови (AC) ELD. Принцип на действие

При съвременните ЕЛ дисплеи се използва възбудждането на предпробивна електролуминесценция с променливо напрежение. Структурата на тънкослоен електролуминесцентен елемент за възбудждане с променливо напрежение е показана на фиг. 3. 1. Слойт от ZnS луминофор (активен слой) е разположен между два изолиращи слоя, един от които е прозрачен и отделя активния слой от електрода. Електролуминесцентното излъчване има максимум при дължина на вълната 580nm. При превишаване на праговото напрежение интензитетът на луминесценцията рязко нараства и се стреми към насищане, примерно при 350 cd/m². Яркостта се поддържа стабилна в продължение на 2.10⁴ ч. непрекъсната работа. На фиг. 3. 2 е показана зонната диаграма на активиран (легиран с различни примеси) ZnS луминофор.



Фиг. 3. 1 Общ вид на ЕЛ структура, възбудждана с променливо напрежение.



Фиг. 3. 2 Зонна диаграмма на енергетичните състояния на електроните в активиран ZnS); E_c - зона на проводимост; E_v - валентна зона; E_g - забранена зона.

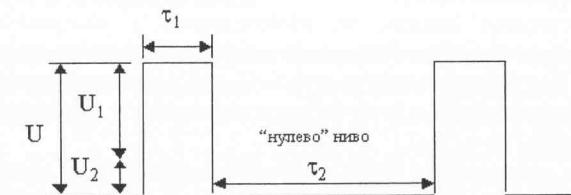
Изобразени са дискретните енергетични нива в забранената зона. Тези нива се образуват в нарушените места на кристалната решетка на ZnS и в значителна степен определят електричните и оптични свойства на ZnS кристалчета. В активираните луминофори, освен обикновените донорни нива (плитки 1 и дълбоки 2) и уловки за електрони (плитки 3 и дълбоки 4), се създават голям брой допълнителни локални нива, отговарящи на центровете на луминесценция. Тези нива могат да бъдат както единични, така и система от основно 5 и възбудени 6 състояния на луминесцентния център. В забранената зона се намират и акцепторните нива 7, създадени от медния примес. Специално при Mn примес в ZnS неговото основно ниво е разположено във валентната зона, а възбуденото – в забранената зона, достатъчно отдалечено от края на проводимата зона, което обуславя особеностите в поведението на електролуминофорите, легирани с Mn.

Възбудждането с променливо напрежение има тази особеност, че то не се нуждае от преминаващ ток, който да тече от единия край до другия, а следователно и от непосредствен контакт с електродите. Безконтактното възбудждане на предпробивна електролуминесценция е най-широко разпространено в днешно време. За наблюдение ефекта на Дестрио на

праховиден електролуминофор, диспергиран в определен диелектрик, се поставя в променливо електрическо поле между плочките на кондензатора, едната от които е прозрачна. Такъв вид кондензатор се нарича електролуминесцентна структура (ЕЛС). Може да се смята, че преминаващ ток, който да протича от единия край към другия, не съществува в ЕЛС. В действителност винаги има противоположен слаб ток. Интересното е, че той често протича предимно в една посока, така че ЕЛС притежава изправящи свойства. Този ефект се дължи на следното: зарядите отиваат в краищата на кристала през време на единия полупериод и се връщат в средата на кристала през време на другия. Този ефект води до това, че те могат да рекомбинират един с друг не само в областта на силното поле. Неуспелите да пререкомбинират, а също и новообразуваните свободни носители на заряд отново се разделят под действие на електрическото поле в краищата на кристала, за да могат в следващия полупериод отново да се срещнат един с друг. По този начин свободните носители се срещат два пъти един с друг за един период на променливото напрежение. В резултат на това луминофорът просветва два пъти за един период на напрежение.

В днешно време общоприет се явява двустадийният модел на светене, който може да бъде описан по следния начин.

Нека на ЕЛ структура, с формата на кондензатор, между плочите на която са разположени в диелектрик електролуминесциращите зърна (с диаметър 2 – 20 μm), се подава импулсно напрежение с амплитуда $U=U_1+U_2$, продължителност на импулса τ_1 и прекъсване между импулсите τ_2 (фиг. 3. 3).



Фиг. 3. 3 Форма на подаваното импулсно напрежение.

Приложеното напрежение се разпределя между кристалните зърна така, че на всяко зърно възниква различен потенциал. Обикновено параметрите на кристала на границата на зърното се отличават от параметрите на границата на зърното. Тази разлика е свързана с възникването на повърхностна бариера в зърната, на които се пада съществена част от приложеното напрежение. В тази бариерна област възниква ударна йонизация, предизвикана от електроните, които успяват да преодолеят бариерата и да създават поле от ниско ниво. Възникващият в процеса на йонизацията положителен заряд повишава височината на бариерата и така екранира частта от зърната, които са разположени на по-голяма дълбочина в областта. Снижаването на полето до предела на областта на "разрушаване" (областта на положителен заряд) води до

прекратяване на процеса на ионизация и така се слага край на формирането на обемния заряд.

Токът от прикатодната част на зърната в момента на подаване на импулса е максимален, а след това спада (например по експонента). Ако този импулс е първият от подаваните, то токът от прикатодната зона не предизвиква светене. Също така липсват центровете на рекомбинация, с които електроните биха могли да рекомбинират. След прекратяване действието на импулса U започва да действа вътрешно поле, създадено от обемния заряд на границата на зърната и в слоя на диелектрика (на фиг. 3. З това е напрежението U_2 с противоположна полярност). Това напрежение създава прикатодна зона на "разрушаване" в противоположния край на зърната.

Електроните, "отстранени" по-рано от старата зона на "разрушаване", и новите електрони, "отстранени" от формиращата се зона на "разрушаване", се преместват в старата зона на "разрушаване" и рекомбинират с ионизираните центрове на светене. Поради това, за разлика от действието на първия импулс, действието на втория импулс (крайта на първия) води до внезапно просветване. Подаването на следващ импулс с амплитуда $U_1=U-U_2$ отново изменя направлението на полето в зърната и води до появата на два процеса: ионизация в едната бариерна област и рекомбинация в другата.

По този начин светенето се формира за два стадия на процеса на възбудждане: образуване на област на ионизация в прикатодната част на зърната за времето на действие на напрежението U_1 и последваща рекомбинация на ионите в тази област с електроните, ионизирани в другата област, за времето на действие на напрежението U_2 .

От изложеното следва, че възбудждането с импулсно напрежение (пропорционално е то да е с несиметрична форма) може да се разглежда като възбудждане с два разнополярни импулса U_1 и U_2 , удовлетворяващи условието $U_1+U_2=U$. Продължителностите на положителния и отрицателния импулс съответно са равни на τ_1 и τ_2 .

Основно свойство на ZnS електролуминофорите е нелинейността на техните електрически свойства. Това налага тези нелинейни характеристики да се имат предвид при свързване на електрическите вериги, в които участват електролуминесцентните дисплеи. Електрическите свойства на луминофорите определят всички свободни носители на заряд, независимо от това дали участват или не в електролуминесценцията. Затова при разглеждане на механизма на електролуминесценцията се налагат да се отчитат не само процесите, водещи към възбудждане или ионизация на центровете на луминесценция, но и на други процеси, свързани с поглъщане на енергия и създаващи в луминофора свободни носители.

3. 3 Яркост на светене. Волтъркостни и честотни характеристики

Обикновено електролуминофорни частици се вграждат в диелектрик с подходящи оптични и диелектрични свойства. Електролуминесцентният слой е съвкупност от частици с различни размери, които дори при еднакво

напрежение, приложено върху тях, няма да притежават еднаква яркост на светене - основен параметър за даден електролуминофор и електролуминесцентен слой. Тъй като разпределението на приложеното напрежение между кристалчето и диелектричния биндер също зависи от неговия размер, характеристиките на излъчването на слоя се получават осреднени и зависимостта на яркостта на светене B от възбуджащото напрежение U се описва с експерименталната зависимост

$$B = B_o \cdot e^{-\frac{b_1}{\sqrt{U}}}, \quad (3.1)$$

където B_o зависи слабо от напрежението, а b_1 е константата при дадена температура и честота, но нараства с увеличаване на размера на частиците на електролуминофора, честотата и продължителността на работа на слоя. Експерименталните изследвания показват, че нарастването на яркостта на светене става по сложен закон. Тази зависимост може да се апроксимира за широк диапазон от честоти със степен на функция от вида

$$B \approx f^m, \quad (3.2)$$

където показателят $m \approx 0,7 \div 0,8$.

3.4 Енергетичен и светлинен добив

Една от най-важните характеристики на ЕЛ прибори е светлинният добив на излъчващата среда. За определянето на светлинния добив η се използват две основни зависимости:

$$\eta = \frac{\pi \cdot B \cdot S}{P} (\text{lm/W}) \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{P_l}{P} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

$$\eta = \frac{P_l}{P_{sum}} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

където B е яркостта на светене; S - излъчваща площ; $\pi \cdot B \cdot S$ - светлинен поток; P - мощност, изразходвана за възбудждане на излъчването; P_l - излъчена светлинна мощност; P_{sum} - общая мощност.

Светлинният добив не е единствената характеристика на дисплеите. Значително по-голяма и съществена роля играе енергетическият добив на

дисплеите, който се определя от отношението на излъчената светлинна мощност към сумарната мощност, изразходвана за формиране на изображението в дисплейния экран. За нея по аналогия с формули (3. 3)-(3. 5) може да се запише

$$G = \frac{\pi BS}{P_{sum}}, lm/W \quad (3.6)$$

Необходимостта за въвеждане на този параметър е свързана с голямата допълнителна загуба на мощност при възбуждане и управление на дисплеите. Отчитането на тези загуби води към многократно увеличение на реалната изразходвана мощност и в значителна степен изменя енергетическата оценка на дисплейните екранни. Така за различните типове плоски екранни съотношението между енергетическия и светлинния добив може да се различава до десетки пъти, доказващо единствено ограничено влияние на светлинния добив върху изразходваната енергия в дисплеите. В същото време светлинният добив определя разделянето на мощността и поради това може да оказва решаващо влияние върху конструкцията на дисплеите.

Зависимостта на светлинния добив от режима на възбуждане е важна характеристика на електролуминесцентните прибори, работещи с праховидни електролуминофори, при оптимизация на условията на работа. От експериментални данни за предпробивната електролуминесценция следва, че зависимостта на яркостта на електролуминесцентния слой от възбуждащото напрежение и честотата се определя от следната формула

$$B \approx \frac{B_\infty e^{-\frac{b}{\sqrt{U}}}}{\sqrt{1 + \omega^{-2} \cdot \tau_3^{-2}}}, \quad (3.7)$$

където B е яркост на светене; ω - ъглова честота на възбуждащото напрежение; b и τ_3 - параметри, определящи типа на електролуминофора и слоя ($b \approx 50 \div 80$; $\tau_3 \approx 50 \mu s$); U - ефективна стойност на възбуждащото напрежение; B_∞ - яркост на светене при ω и U , стремящи се към безкрайност.

Активният ток, протичащ през зърната на електролуминофора и създаващ светлинното излъчване, се определя от аналогичната зависимост

$$I \approx \frac{I_\infty e^{-\frac{b}{\sqrt{U}}}}{\sqrt{1 + \omega^{-2} \cdot \tau_3^{-2}}}, \quad (3.8)$$

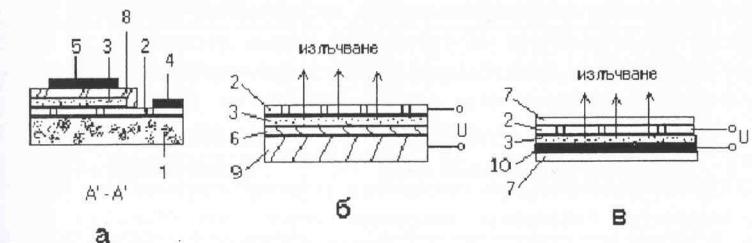
където I е токът, протичащ през всички зърна на ЕЛ слой, I_∞ - граничната стойност на тока.

Изразходваната в ЕЛ слой мощност по време на излъчването се изчислява на основата на последното уравнение:

$$P \approx \frac{U I_\infty e^{-\frac{b}{\sqrt{U}}}}{\sqrt{1 + \omega^{-2} \cdot \tau_3^{-2}}} \quad (3.9)$$

3.5 Технологичен ред на изготвяне на ЕЛД

На табл. 3.1 е показан основният технологичен ред за изготвянето на електролуминесцентни дисплейни структури [10]. Електролуминесцентните източници на светлина, разработени на основата на цинковосулфиден прахообразен електролуминофор, отложен върху стъклена подложка с прозрачни калаеноокисни или ITO слоеве, обикновено се изпълняват като плоски панели, равномерно светещи откъм страната на долния прозрачен електрод. Тези панели имат различни размери, форми и конфигурации.



Фиг. 3.4 Някои основни конструкции на електролуминесцентни панели: а – на прозрачна основа; б – на метална основа; в – гъвкава конструкция; 1 – стъклена подложка; 2 – прозрачен проводящ електрод; 3 – активен излъчващ електролуминесцентен слой от ZnS-електролуминофор; 4 – долнен метален електрод; 5 – горен алуминиев електрод; 6 – бял отразяващ слой; 7 – прозрачни пластмасови пластини; 8 – диелектричен защитен слой; 9- метална пластина; 10- метален електрод.

За практически цели се предлагат множество различни конструкции на такива панели, някои от които са показани на фиг. 3.4. В днешно време най-широко приложение има конструкцията, показана на фиг. 3.4 а. Повърхността на стъклената пластина 1 е покрита с тънък прозрачен и в същото време проводящ материал 2. За създаването на такова покритие обикновено се използват калаен диоксид или ITO (индиево-калаенооксидни) слоеве. За нанасяне на прозрачния електрод се използва високочестотно реактивно разпращаване или спрей пиролитичен метод.

Табл. 3.1 Основни технологични операции за изготвяне на електролуминесцентни дисплеи.

1 плоскопаралелна стъклена подложка	2 химическа обработка и освежаване на подложката
3 нанасяне на прозрачен проводящ SnO_2 слой	4 нанасяне на фоторезист
5 ецване на незашитените участъци на нанесения слой	6 отстраняване на фоторезиста
7 нанасяне на активния електролуминесцентен слой	8 нанасяне на защитния халкогениден слой
9 нанасяне на алюминиевите електроди	10 фиксиране на метални изводи с проводяща паста
11 запояване на електрически контакти	12 тестване на изготвения ЕЛ на модулен елемент

За ITO слоеве се използва първият метод, а за прозрачни електроди от калаен диоксид може да се използват и двата метода. За нанасяне на активния ЕЛ слой може да се използва тънкослойна вакуумна или технология на ситопечат. При първия случай слоевете се отлагат чрез електроннолъчево изпарение, като изходният материал е гранулиран ZnS в този случай защитният слой може да бъде от TiO_2 получен също чрез електроннолъчево изпарение или високочестотно реактивно разпращаване, за да може всички слоеве да бъдат получени чрез една и съща апаратура. Металните електроди също се получават чрез вакуумен метод, а именно вакуумтермично изпарение, който е

технологично и икономически най-удачен за тяхното получаване. Вследствие на наложилото се през годините приложение на ЕЛ дисплеи основно като информационни табла със средни и големи размери най-използваният метод за нанасяне на активния ЕЛ слой е чрез ситопечат, който ще разгледаме малко по-подробно в следващата точка.

3.6. Ситопечатна технология за нанасяне на ЕЛ слоеве

За изготвянето на електролуминесцентния слой се използват промишлени електролуминофори, диспергирани в биндер, при което се получава хетерогенна смес. Биндерът е единокомпонентен полиепоксиден олигомер с висока молекулна маса (4000 – 6000 мол. ед.), тип SILBER LACK, разтворен в етиленгликолов разтворител. Хетерогенната смес е изгответа в съотношение биндер към луминофор – 1:1,5. Вискозитетът на пастата и характерът на овлажняване на подложката и типът на полимерната тъкан на ситото определят количеството паста, което се отлага с определена дебелина върху стъклената подложка на ЕЛ дисплей. Необходимо е пастата да преминава лесно през отворите на ситото при прилагане на натиск посредством ракела, но след получаването на отпечатъка върху подложката и премахване на натиска, пастата трябва да запази формата си, така че да се съхранят конфигурацията на рисунъка. След нанасяне на пастите следва сушене и/или изпечане. В конкретния случай след нанасяне на слоя образецът престоява 24 часа на въздух с цел предварително изпаряване на разтворителя. За пълна полимеризация на биндера образците се изпичат при температура 120°C в продължение на 15-20 min, което осигурява оптимално вграждане на електролуминесцентните частици в биндера.

В Института по Физика на Твърдото Тяло - БАН е разработено специално вакуумно устройство за нанасяне на електролуминесцентни биндерни слоеве, показано на фиг. 3.5 [11].

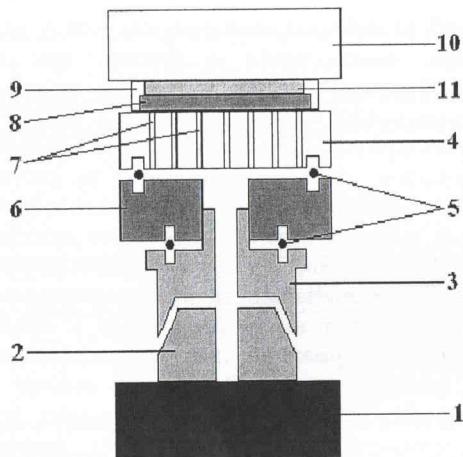
При използване на вакуумното устройство дебелината на слоя се регулира чрез калибрирани ограничители и е около 60 μm . Слойт се нанася чрез стъклен ракел със скосена под 45° полирана плоскост. Придвижването на ракела става при натоварване 2-3 kg/cm^2 . След нанасяне на слоя образецът престоява 24 часа на въздух с цел предварително изпаряване на разтворителя. За пълна полимеризация на биндера образците се изпичат при температура 120°C в продължение на 15-20 min, което осигурява оптимално вграждане на електролуминесцентните частици в биндера.

Факторите, влияещи върху ситопечатната технология, са:

- реология на пастите. Те да са с достатъчна подвижност.
- подложките да са подходящи (за случая на ЕЛ дисплеи да са плоскопаралелни, да са с точни размери и да са с добре почистена повърхност).
- площта на отвория участък на ситото намалява при увеличаване броя на отворите върху него.
- геометрията на маските, оформена върху ситопечатната тъкан.

- скоростта на връщане на ситото в изходното положение. За получаване на достатъчно точен печат е необходимо разстоянието между ситото и стъклена подложка да бъде около 25 μm .

- подбор на материала за ракел;
- формата на ракела;
- движението на ракела.



Фиг. 3.5 Вакуумно устройство за нанасяне на активен ЕЛ слой: 1-вакуумна помпа; 2-щуцер на вакуумната помпа; 3-щуцер на металната вакуумна плоча; 4-метална плоча; 5-вакуумни гумени уплътнители; 6-държач с висока степена гладкост; 7-отвори на държача в пространството на гumenите уплътнители; 8-подложка за нанасяне на слоя; 9-калибрирани плоски ограничители; 10-стъклена ракел; 11-нанесен ЕЛ биндерен слой.

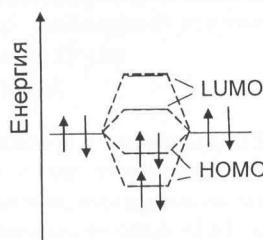
Електролуминесцентните дисплеи с неорганичен електролуминофор, въпреки че притежават редица предимства, имат и доста недостатъци, свързани с нелинейността на техните характеристики и схемите за управление. Поради това тяхното приложение е с по-тясна ориентация спрямо някои други плоски дисплеи.

4.1 Въведение

Интересът към OLED дисплеите е породен от това, че те имат редица предимства, свързани с приложението им в портативни устройства, като тенденцията е да се наложат на пазара като основен заместител на технологията за течноекристални дисплеи LCD. Едно от основните преимущества на OLED е, че имат собствено светене, поради което не е нужна подсветка. Това дава възможност те да бъдат още по-тънки и леки от LCD дисплеите, а консумацията им да е значително по-ниска (150 mW при OLED срещу 500 mW при LCD). Чрез модификация на химичната структура на органичните молекули може да се покрие цялата цветова гама и да се постигнат множество нюанси. При OLED има широк ъгъл на наблюдение, достигащ 160° , за разлика от LCD дисплеите, където не надхвърля 40° . Технологичният процес и оборудването за нанасяне на органичните материали (особено на полимерите) във вид на тънък слой е сравнително просто и евтино (центрофуга, пулверизатор, принтер), което води до ниска производствена цена. Технологията за изготвяне позволява получаване на светещата структура върху гъвкава основа, за разлика от плазмените и LCD дисплеите. При OLED, когато даден пиксел е изключен, няма остатъчно светене, както например при плазмените дисплеи, тъй като през органичния материал няма утечни токове (или те са по-малки от 10^{-12} A), когато преходите на структурата са запушени. Яркостта на генерираната светлинна емисия е доста висока – над 300 cd/m^2 – стойност, конкурентна на неорганичните светоизлъчващи (LED) дисплеи. Недостатък на OLED е краткото време на живот, което е от порядъка на няколко хиляди часа при яркост от около 300 cd/m^2 . За сравнение LCD дисплеите имат приблизително 60 000 часа живот. Друг недостатък е все още сравнително високото напрежение на отпушване на преходите (около 6-8 V), което заедно с ниската проводимост води до ниска ефективност на преобразуване от около няколко 1m/W . По отношение на скоростта на отпушване двата типа дисплеи са еквивалентни със сравнително малко време на отговор от около 30 μs .

4.2 Характерни особености на органичните материали, използвани в онтоелектрониката

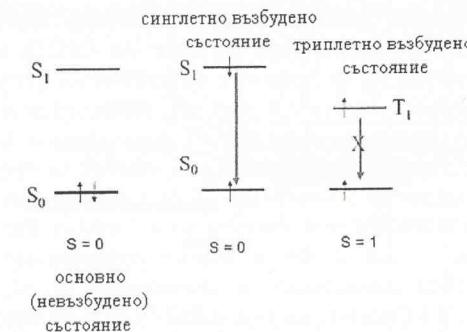
При проводящите (спрегнати) полимери се формират две енергийни нива – най-ниска незаета молекулна орбитала (Lowest Unoccupied Molecular Orbital – LUMO) и най-висока заета молекулна орбитала (Highest Occupied Molecular Orbital – HOMO). Енергийте на тези нива съответстват на енергийите на проводимата и на валентната зона на един неорганичен полупроводник. Веднъж формирана молекулата, електроните запълват орбиталите й от нискоенергийните към високоенергийните нива, както е показано на фиг. 4.1.



Фиг. 4.1 HOMO и LUMO нива в органичен полупроводник.

Междумолекулните връзки в органичния полупроводник са Вандерваалсови (с електростатичен характер) и са слаби. В резултат на това нито една молекула не усеща влиянието на съседните на нея молекули, затова енергийните нива не се разцепват и не се формират енергийни зони, както при неорганичните полупроводници. Поради тази причина електронните свойства на органичните полупроводници се определят от отделната молекула, затова те се наричат още молекулни, а ролята на слабите връзки в тях е да ги свързва във вид на твърдо тяло. За разлика от тях неорганичните кристални полупроводници имат ковалентни или ионни връзки, периодичност на кристалната решетка, запълнена валентна и свободна проводима зона. Характерна особеност на органичните полупроводници е движението на зарядите, което става чрез прескоков механизъм между орбиталите на съседните молекули.

След като зарядите се възбудят под действие на електрическото поле и преминат на по-високо енергийно ниво, следва релаксация или връщане на зарядите на по-ниско енергийно ниво, при което се освобождава енергия. Тя може да бъде под формата на излъчване или безизлъчвателно, ако енергийният преход не съответства на дължина на вълната от видимия спектър на светлината. В зависимост от взаимната ориентация на спиновите моменти S на електроните от възбудената молекула се различават синглетно и триплетно състояние на молекулата, показани на фиг. 4.2. При синглетно състояние спиновите моменти на възбудения ѝ електрон и електронът в основно състояние са насрещно ориентирани. Рекомбинацията от ниво S_1 към S_0 предизвиква излъчвателна емисия, известна като флуоресценция, която е продължителна във времето. При триплетното състояние спиновите моменти са единопосочни. Рекомбинацията на триплетни състояния поражда фосфоресценция, която е много кратка като излъчвателен процес. Триплетните състояния основно се разпадат неизлъчвателно, като по този начин намаляват ефективността на органичните светоизлъчващи структури. Формирането на тези състояния е вероятностен процес и не може да се контролира посредством технологични или конструктивни фактори.



Фиг. 4.2 Синглетно и триплетно състояние на възбудена молекула в органичния полупроводник.

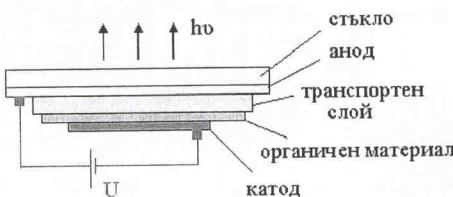
Инжекцията на токоносители в органичните електролуминесцентни устройства е слаба заради високите контактни бариери, които се формират на преходите с металните електроди и на преходите между отделните слоеве в структурата. Органичните слоеве са аморфни, без строго дефинирана структура и за тях зонната теория не е валидна. Вследствие на прескоковия механизъм на движение на токоносителите между съседните молекулни орбитали подвижността е пъти по-ниска от тази в неорганичните полупроводници (около 10^{-3} см²/V.s).

4.3 OLED структура и принцип на действие

В органичната оптоелектроника най-разпространени са структурите, състоящи се от няколко тънки слоя (фиг. 4.3). Това е предизвикателство свързано с формирането на слоевете и с физичните, химичните и електричните взаимодействия между тях. Много от материалите се избират първоначално според техните обемни свойства (проводимост, светоизлъчване и др.), но свойствата на преходите между различните материали също играят много важна роля за работата на устройството. При прилагане на постоянно електрическо напрежение U в органичния електролуминесцентен наноразмерен слой се инжектират токоносители от двата електрода, които рекомбинират и се излъчва фотон с енергия $h\nu$, съответстваща на енергията на забранената зона на полимера.

На фиг. 4.4 е илюстрирано действието на двуслойна OLED структура. Тъй като органичният слой е няколко десетки нанометри, то захранващото напрежение е под 10 V. Единият органичен слой е p-тип полупроводник и се използва за пренос на дупки (hole transporting layer – HTL), тъй като подвижността на дупките е голяма, а другият е n-тип полупроводник с голяма подвижност на електроните и се използва за пренос на електрони (electron

transporting layer – ETL). В повечето случаи ETL слоят е също и емисионен (emission layer – EML), тоест в него протича излъчвателната рекомбинация.



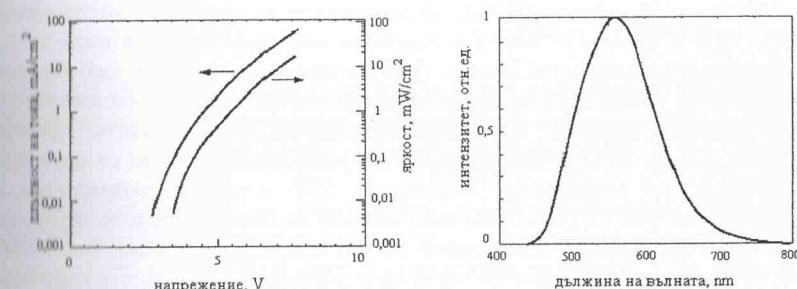
Фиг. 4.3 Общ вид на двусловна OLED структура.



Фиг. 4.4 вляво показва принципът на действие на двусловна OLED структура, а вдясно е енергийната диаграма на материали, формиращи анодния преход в OLED. IP е йонизация потенциал.

Инжекцията на токоносителите от електродите към органичните слоеве може да се подобри чрез изравняване на отделителната работа на анода с HOMO нивото и на отделителната работа на катода с LUMO нивото на органичните материали. За допълнително намаляване на напрежението, подобряване на баланса на двета типа инжециирани токоносители и повишаване на ефективността на OLED устройствата допълнително се вграждат инжециращи слоеве между електродите и органичните слоеве, които намаляват инжекционните бариери на преходите. Целта е да се получат омови контакти, през които да се предизвика силна инжекция на токоносители при ниско напрежение, което води до по-висока ефективност на устройствата. Енергийната диаграма на фиг. 4.4 вдясно показва йонизацияния потенциал (IP) на органичния материал, отделителната работа на анод от ITO и бариерата за инжекция на дупки, която обикновено е около 0,8-1 eV. Аналогична е ситуацията от страната на катода, където се формира бариера за инжекция на електроните, която има стойност приблизително същата като анодната. Наличието на енергийни бариери от такъв порядък понижават значително ефективността на OLED до няколко lm/W.

Към настоящия момент все още се полагат усилия за доближаване на ефективността на OLED до тази на неорганичните им аналоги, тъй като въпреки че яркостта на излъчване е голяма, тя се постига при два пъти по-високо приложено напрежение. На фиг. 4.5 вляво е показана обединена волт-амперна (ВАХ) и волтъркостна (ВЯХ) характеристика на двусловна OLED структура, при която се достига максимална стойност на плътността на тока от 100 mA/cm^2 при напрежение 8 V. За сравнение с традиционните LED дисплеи тази стойност е 200 mA/cm^2 и се постига при напрежение 4 V. При OLED дебелините на органичните слоеве е 60-75 nm – много по-тънък от epitаксиалния слой от неорганичен полупроводник, който е от порядъка на няколко микрометра.



Фиг. 4.5 Вляво е показвана обединена ВАХ и ВЯХ, а вдясно - електролуминесцентен спектър на двусловна OLED структура [12].

4.4 Материални и технологични особености при получаването на отделителните слоеве за OLED

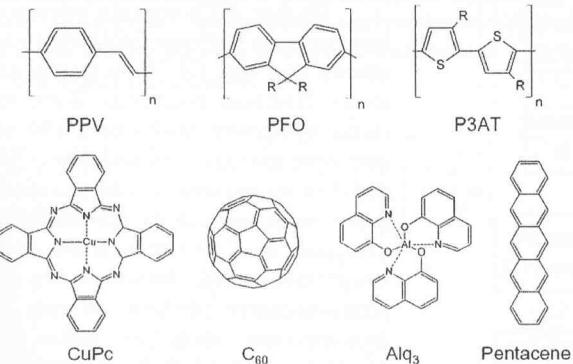
Както и при другите типове дисплеи, като анод се използва индиево-кислиният оксид (ITO), който, освен че е прозрачен за видимата светлина, има и голяма отделителна работа, което е благоприятно за изравняването с HOMO нивото на органичния полупроводник. Като катод се използват сплав магнезий/сръбло или алуминий поради сравнително ниската си отделителна работа, която спомага за доближаване до LUMO нивото на органичния слой.

Според молекулното тегло органичните полупроводници са два класа – нискомолекулни съединения (органични кристали) и високомолекулни съединения (проводящи или още спрегнати полимери). От разликата в молекулното тегло произтича и разликата в технологията за получаване на тези слоеве от тези материали. Нискомолекулните съединения се нанасят чрез вакуумно изпарение, докато дългите полимерни вериги трябва да се разтворят в подходящи органични разтворители и могат да се нанасят само от разтвор. Най-популярните методи за нанасяне на полимерни разтвори са

центрофужно отлагане, пулверизиране и струйно принтиране. Цветът на изльчената емисия се определя от структурата на органичния материал посредством дължината на полимерната верига и/или ширината на забранената зона. Чрез заместване на някои от страничните групи във веригата на електролуминесцентния полимер се получават негови производни, които изльчват в различни нюанси на основния му цвят. Някои от най-изследваните органични кристали и полимери, намиращи приложение в оптоелектронните устройства и в частност в дисплеите, са показани на фиг. 4.6.

Повечето от транспортните за дупки слоеве (HTL) са изградени от ароматни аминогрупи, които притежават висок йонизацияционен потенциал IP. N,N'-diphenyl-N,N'-bis(3-methylphenyl)-[1,1'-biphenyl]-4,4'-diamine (TPD) и други TPD аналоги като N,N'-bis(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-4,4'-diamine (NPB) се използват най-често като лесно провеждащи дупките органични кристални материали в многослойните OLED. Подвижността на основните токоносители в TPD и NPB е около $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V.s}$. Аморфен вакуумно отложен слой от 1,1-bis(di-4-tolylaminophenyl)cyclohexane (TAPC) проявява една от най-високите подвижности на дупки сред неподредените органични материали, а именно $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V.s}$. Основен проблем при изброените материали е ниската термична стабилност (около 70°C е температурата на разграждане). За да се преодолее този проблем, са синтезирани аналоги на TPD с висока температура на разграждане над 300°C . Това става чрез внасяне на dimethylfluorene групи, тъй като те също притежават относително голяма подвижност на токоносителите (около $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V.s}$). Появяват се материали на базата на карбазол (carbazole-based dihydrazones) с подвижност на дупките около $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ при електрическо поле $6.4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ при стайна температура.

За разлика от HTL при електронно транспортните материали (ETL) съществува проблемът с електронните уловки. Уловките са енергийно благоприятни центрове в органичния полупроводник, дължащи се на структурни несъвършенства или внесени примеси, които нежелано захващат полезните токоносители. Вследствие на това тези токоносители не могат да участват в процесите на проводимост и изльчвателната рекомбинация и се намалява ефективността. Тъй като кислородът, който е потенциална уловка за електроните, неминуемо присъства, редукционният потенциал на електронно-транспортния материал трябва да бъде по-нисък от този на кислорода. Това означава нисък електронен афинитет. Материалите, които обаче се характеризират с такъв електронен афинитет, като Ca, Ba и Li, са силно реактивни. Най-широко приложение тези материали са намерили в многослойните OLED между катода и изльчващия слой. Най-популярен и изучен е tris(8-quinolinato)aluminum (Alq₃), който провежда ефективно електрони и изльчва зелена светлина.



Фиг. 4.6 Молекулна структура на някои от най-използваните материали за органични дисплейни устройства – на първия ред са проводящите полимери, а на втория – органичните кристали.

При изготвянето на многослойни структури възниква проблемът за целостта на слоевете поради разтваряне на подслоевете от разтворителя на всеки следващ нанесен слой, когато се използват полимери. Това води не само до частично нарушаване на слоя, но и до промяна в свойствата на материала. Затова се налага разработването на нови техники на отлагане на полимерни слоеве, при които да се елиминира разграждащото влияние на разтворителя. Друг проблем са химичните реакции между съединенията и дифузията на частици в отделните слоеве. Такъв ефект може да се наблюдава на прехода между poly(3,4-ethylenedioxythiophene) – PEDOT, използван за HTL слой, и индиво-калаенният оксид, където киселинният разтвор на PEDOT:PSS може да разтвори ITO преди изсушаване или абсорбираната влага да предизвика хидролиза на полимера, която също има ефект върху ITO. Съществен проблем, който намалява ефективността на OLED структурите, е дисбалансът на инжектираните в електролуминесцентния слой два типа токоносители, което води до изместване на рекомбинационната зона в близост до преходите с електродите, където концентрацията на дефектите е максимална. Те играят ролята на центрове на гасене на изльчвателната рекомбинация. За да се избегне този ефект, е необходимо подвижността на дупките в материала, провеждащ дупки, и подвижността на електроните в материала, провеждащ електрони, да е близки по стойност, за да се «срещнат» в обема на изльчвателния слой. Тъй като подобна комбинация рядко е осъществима, то дебелините на слоевете от съответните материали също са от голямо значение за изравняване на разстоянията, които изминават двата типа токоносители.

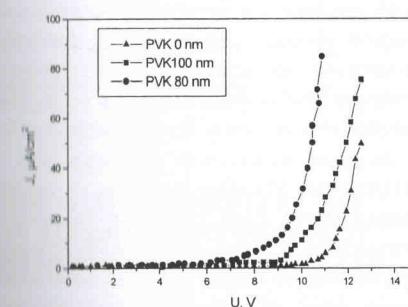
4.5 Технологичен ред на изготвяне на OLED



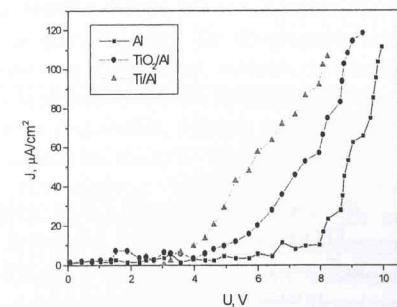
Фиг. 4.7 Технологичен ред за изготвяне на OLED

На фиг. 4.7 е показан технологичният ред за изготвяне на типичен органичен електролуминесцентен дисплей. OLED се изгражда слой по слой върху стъклена подложка. Като анод се нанася тънък прозрачен слой около 180 nm от ITO чрез вакуумно катодно разпращаване. Съпротивлението на ITO е по-голямо от това на алюминиевия катод, което води до пад на напрежението върху ITO електродите. Това предизвиква нееднородност на луминесценцията, закъснение и изкривяване на управляващите сигнали. За тази цел се изготвя спомагателен анод от хром или алюминий, намиращ се извън излъзвателната зона, който да подобри условията за протичане на ток. След това се нанасят слоевете от органичните материали, които служат за HTL, емисионен слой и ETL. Ако материалите са органични кристали, те се нанасят чрез вакуумно термично изпарение с ниска скорост от около 0,1 nm/s, при която температурата на изпарителя е по-ниска от 400-500°C. По този начин се избягват разкъсването на връзки в органичния материал, както и формирането на аморфни, неподредени слоеве върху подложката. Ако материалите са полимери, те се разтварят в подходящи органични разтворители като хлороформ, толуол, дихлорметан и ксиол. Най-разпространеният метод за нанасяне на полимерните разтвори е центрофужното отлагане. При него чрез регулиране на оборотите на въртене на центрофугата и на концентрацията на разтвора може да се контролира дебелината и равномерността на полимерните слоеве. Често HTL и емисионният слой са органични, а ETL е неорганичен материал или метал като например титан или титанов диоксид. Тези слоеве обикновено се нанасят чрез вакуумно разпращаване, при което има опасност от повреждане на подслоевете. Това налага последователността на отлагане на слоевете в този случай да става в обратен ред - в посока от катода към анода. Дебелините на органичните слоеве зависят от свойствата на избраните материали и най-вече от подвижността на основните токоносители, което спомага за баланса на двата типа токоносители, рекомбиниращи в излъзвателния слой. Типични стойности за слоя HTL са между 50 и 100 nm, за излъзвателния слой – около 150-200 nm, за ETL, ако е органичен – около 40-80 nm, а ако е неорганичен – 10-20 nm. Катодният слой най-често е алюминиев с дебелина около 200 nm и се нанася чрез термично изпарение. След получаването на последния слой структурата

трябва бързо да бъде герметизирана в инертна среда, по възможност без да се излага на околната атмосфера. Органичните материали са силно чувствителни към кислорода и влагата от въздуха и тяхното проникване в структурата води до ускоряване на процеса на стареене.



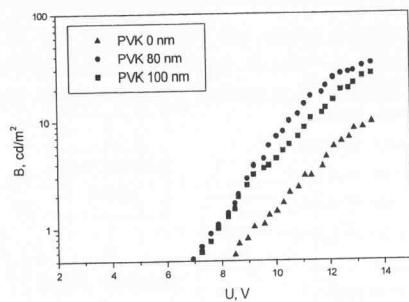
Фиг. 4.8 а) ВАХ на OLED от типа ITO/HTL/PFV/Al при различни дебелини на HTL, който в случая е поливинилкарбазол (PVK).



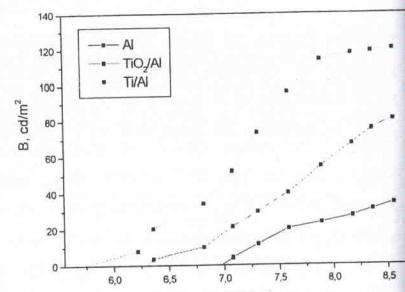
Фиг. 4.8 б) ВАХ на OLED от типа ITO/PVK/PFV/ETL/Al без ETL и с ETL от титан и титанов диоксид.

На фиг. 4.8 а) и б) са показани ВАХ на OLED структури, изгответи в катедра "Микроелектроника" [13], съответно при различни дебелини и различни видове на използваните транспортни слоеве. В тези структури като транспортер за дупките слой се използва полимерът поливинилкарбазол (PVK), като излъзвателен слой се използва полимер, произведен на полифлуоренилен (PFV), даващ жълто-оранжева емисия, а като транспортер за електроните слой се използват титан и титанов диоксид. На фиг. 4.9 а) и б) са показани съответните ВАХ.

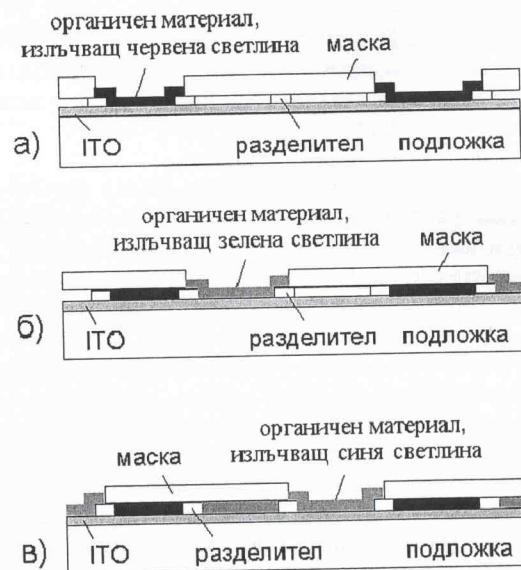
За получаването на цветен дисплей се изготвят червени, зелени и сини субпиксели по схемата, показана на фиг. 4.10. Тъй като конвенционалната фотолитография не може да се приложи при слоевете от органичните материали заради лесното им повреждане, то слоевете за различните цветове се нанасят през маска. По този начин слоят се отлага селективно само в определени области върху анода от индиево-калаен оксид.



Фиг. 4.9 а) ВЯХ на OLED от типа ITO/HTL/PFV/Al при различни дебелини на HTL, който в случая е поливинилкарбазол (PVK).



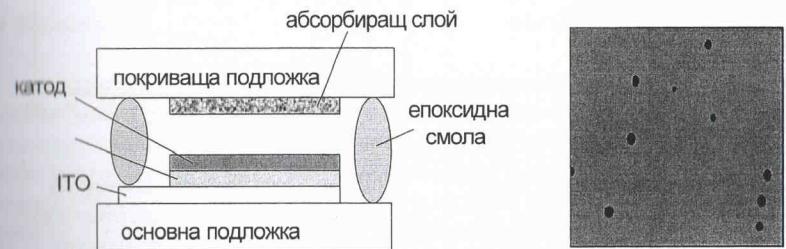
Фиг. 4.9 б) ВЯХ на OLED от типа ITO/PVK/PFV/ETL/Al без ETL и с ETL от титан и титанов диоксид [14].



Фиг. 4.10 Изграждане на цветен OLED дисплей [15].

4.6 Асемблиране и стареене на OLED

Повечето от органичните материали са чувствителни към кислород и влага. Оксидлението на металните електроди също може да влоши работата на OLED. Следователно за удължаване на времето на живот е необходима изолация от влиянието на тези два фактора. Най-често OLED се херметизира с помощта на подложка, както е показано на фиг. 4.11 а). Тя покрива цялата структура и се фиксира със специална смола на епоксидна основа, която се втвърдява при обльчване с ултравиолетова светлина. Особено критично място е интерфейсът между епоксидната смола и двете подложки, където има опасност от формиране на пролуки (канали) за проникване на въздух. Често наблюдаван дефект е освобождаването на остатъчен разтворител, останал в слоя при отлагането му, след като структурата е вече херметизирана. За тази цел се вгражда абсорбиращ слой, който погълща влагата и остатъчните разтворители. Възможно е покриващата подложка да се замени с пасивиращ слой с дебелина няколко микрометъра. По този начин дебелината на цялата структура се намалява значително и производственият процес се опростява. Тъй като повечето органични материали не издържат на висока температура, то за обработката на пасивиращия слой е необходимо температурите да са по-ниски от 200 °C. Слойят не трябва да съдържа пукнатини и пори. Целият процес на херметизация трябва да протича в среда на инертна атмосфера.



Фиг. 4.11 а) Херметизирана OLED структура.

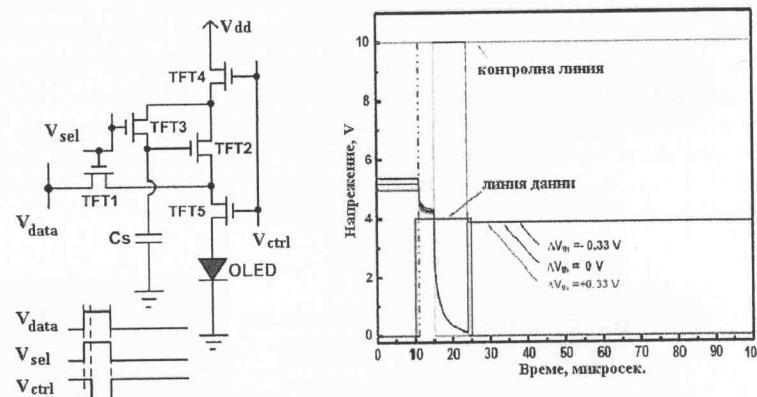
Фиг. 4.11 б) Черни петна в органичен слой.

Основната причина за влошаване на електрическите и оптичните характеристики на OLED дисплеите е тяхното стареене, което се изразява в появяване на черни петна (фиг. 4.11 б) в електролуминесцентните слоеве, които представляват неизлъчвателни области. Те се получават вследствие на електрохимична реакция на органичния материал с електрода или с проникнал въздух. Причините за появата на структурни дефекти в OLED са: 1) транспортният за електроните слой между катода и емисионния слой е порест, не осъществява контакт между катода и органичния слой и се получават локално неизлъчвателни зони; 2) пори в катода водят до проникване на въздух, окисляване на метала и възникване на химична реакция с органичния материал;

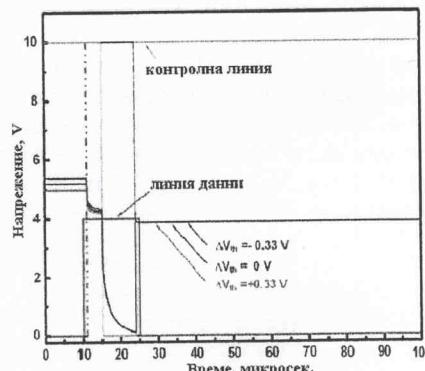
3) дифузия на атоми от ITO анода в органичния слой поради загряване на структурата от протичащия ток. Причина за отказ на OLED дисплейте може да бъде късъ съединение, предизвикано от дефект в морфологията на органичния слой, през който се дават накъсо анодът и катодът. Този морфологичен дефект се дължи на неравности в анодния слой под формата на иглообразни образувания, които "прокъсват" тънкия, наноразмерен органичен слой.

4.7 Управление на OLED

За управлението на OLED дисплейте се използва така нареченото активно матрично адресиране, което означава, че участва активен елемент – тънкослоен транзистор (thin film transistor – TFT), който да разпределя сигналите, изпращани към проводящите шини (електроди). Този начин на адресиране се използва и в течноекристалните дисплеи.



Фиг. 4. 12 а) Принципна схема на веригата за управление на OLED.



Фиг. 4. 12 б) Времедиаграми на сигналите за управление на пикселите. ΔV_{th} е изменение на праговото напрежение на TFT2.

Влияние върху сигналите оказва варирането на праговото напрежение на основния транзистор TFT1. То е в границите около $\pm 0,33$ V. На фиг. 4. 12а) е показан типичен пример на схема за управление на пикселите на OLED с TFT матрица, както и формата на управляващите сигнали [16]. TFT1, TFT3, TFT4 и TFT5 са превключватели, а TFT2 е драйверен (захранващ). По време на началния период на инициализация се извършва нулиране на сигналите и веднага след това напрежението V_{sel} преминава в ниво логическа единица (1), а V_{ctrl} запазва нивото си (също логическа единица). Всички TFT към пиксела са включени, а кондензаторът C_s се зарежда до определена стойност. В този момент към TFT1 постъпват и полезните данни. V_{ctrl} спада до логическа нула (0) и изключва транзисторите TFT4 и TFT5, като се запазва праговото напрежение на

драйверния транзистор TFT2, чийто гейт е свързан с дрейна на TFT3. Тъй като TFT2 действа като диод, то напрежението V_{gs} е въобще преговото напрежение V_{th_T2} и за съхраненото в кондензатора напрежение се получава $V_{data} + V_{th_T2}$. След прилагане на напрежението за необходимия период от време за установяване върху съответния пиксел V_{sel} минава в ниво 0, а V_{ctrl} – в ниво 1. Тогава TFT2 захранва OLED пиксела, а натрупаното напрежение на кондензатора поддържа нивото на сигнала в пиксела до следващия такт на инициализация сигнал и следващия пакет с данни. Токът през OLED клетката е

$$I_{OLED} = \frac{1}{2} k_2 (V_{gs_T2} - V_{th_T2})^2 = \frac{1}{2} k_2 (V_{data} + V_{th_T2} - V_{th_T2})^2 = \frac{1}{2} k_2 V_{data}^2. \quad (4.1)$$

Както се вижда при този начин на свързване на транзисторите, дрейновият ток на TFT2 е независим от преговото му напрежение и се влияе само от V_{data} , като така варирането на преговото напрежение на TFT2 от пиксел до пиксел се компенсира и се очаква да се получи равномерна картина с еднаква яркост по цялата площ на дисплея. На фиг. 4. 12б) са показани времедиаграмите на сигналите за управление на пикселите. Илюстрирано е, че анодните сигнали на OLED са пренебрежимо слабо чувствителни към изменения в преговото напрежение.

4.8 Заключение

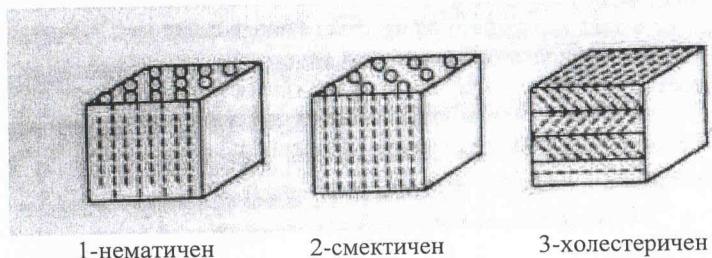
Малката маса и ниската консумация правят полимерните дисплеи много подходящи за портативни устройства – дисплеи на цифрови фотоапарати и камери, GSM – и, монитори на лаптопи и др. Тези устройства ще стават все по-малки за въвъдеще. Към настоящия момент ограничаващ фактор за размера е батерията. Такава структура може да се използва и за реализиране на обратния принцип – генериране на напрежение при облячване със светлина – така наречените органични фотоволтаични устройства или слънчеви клетки.

Глава 5 Течнокристални дисплеи (Liquid Crystal Displays – LCD)

5.1 Течни кристали и приложението им в дисплеи

В края на XIX век са открити вещества, чиито свойства на вътрешната структура в течно състояние са характерни както за течности, така и за твърди тела. Такова състояние е наречено мезоморфно, а веществата - течни кристали. Веществата в течно състояние притежават летливост и приемат формата на съда, в който се намират. В твърдите кристали молекулите са строго ориентирани и притежават т.нар. далечен порядък. Течните кристали са вещества, които при дадени температурни условия притежават свойствата и на течности, и на твърди тела.

Класификацията на течните кристали е предложена от Леман. Според тази класификация течните кристали се разделят на три типа: смектични, нематични и холестерични, показани на фиг. 5.1.



Фиг. 5.1 Класификация на течните кристали.

Te се различават по своите физични и преди всичко оптични свойства. Разликите се определят от структурата им. Смектичното мезоморфно състояние за първи път е наблюдавано в сапуните (оттук идва и наименованието, смегма от гръцки – сапун). В такива кристали изтеглените молекули с вретеновидна форма са разположени паралелно на дългите си оси и образуват слоеве с еднаква дебелина, близка до дължината на молекулите. Тези т.нар. смектични слоеве лежат един над друг на еднакво разстояние. Молекулните слоеве в типичните смектични течни кристали са подвижни и лесно се преместват паралелно един спрямо друг. Температурата на фазовия преход в мезоморфно състояние е достатъчно висока. Тя трябва да бъде такава, че да се наруши връзката между редовете, а молекулите, разположени на близко разстояние, да останат свързани. Ако връзката между молекулите в отделния слой е частично нарушена, то веществото в пределите на слоя се държи като двумерна течност. При понижаване на температурата подреждането в слоя се увеличава.

В някои течни кристали под микроскоп се наблюдава микроструктура във вид на нишки. Такива вещества се отнасят към групата на нематичните течни кристали. Осите на молекулите в тези кристали са паралелни, обаче те не

образуват отделни слоеве. Дългите оси на молекулите са паралелни на определено направление, а центровете им са хаотично разположени.

Третата група течни кристали, различаващи се със своите физични и преди всичко оптични свойства, са холестеричните. В тях молекулите са разположени в слоеве (както смектичните), обаче дългите оси на молекулите са паралелни на слоевите плоскости, а разположението им в пределите на слоя напомня нематичен кристал. Слоевете в холестеричните течни кристали са тънки, мономолекулярни. Всяка молекула има плоска конфигурация, а органичната метилова група CH_3 е разположена над или в плоскостта. При такава конфигурация на атомите в молекулите следва, че направлението на дългите им оси във всеки следващ слой е отклонено на около 15 ъглови градуса в сравнение с предишния слой. Тези отклонения се сумират по целия обем на веществото и това води до образуване на спирална молекулна структура в холестеричния течен кристал.

Общото свойство на всички типове течни кристали е двойното пречупване на светлината. Друго свойство е въртенето на плоскостта на поляризация.

Най-големият клас вещества, съществуващи в течнокристално състояние, са ароматните съединения, съдържащи бензолни ядра, по-рядко се срещат алфатични течнокристални вещества.

Наличието в течните кристали на далечен порядък в ориентацията на молекулите предизвиква анизотропия в електрическите и магнитните свойства, присъщи за твърдите кристали. Тук обаче, за разлика от твърдите тела силите на междумолекулно взаимодействие са значително по-слаби. Енергията на деформация на твърдите кристали е малка, затова тяхната молекуларна структура лесно може да се промени под действието на електрично и магнитно поле с неголяма мощност. За промяна на структурата са достатъчни също така температурни колебания или механични въздействия върху течните кристали. Структурните промени предизвикват изменение на оптичните свойства. Течнокристалните вторични ефекти от промяна в ориентацията на молекулите представляват изменение в степента на пропускане и отразяване на светлината и двойното пречупване на цвета.

Най-голямо приложение намират нематичните течни кристали. При прилагане на електрично поле възникналите в тях електрооптични ефекти се използват в дисплейната техника.

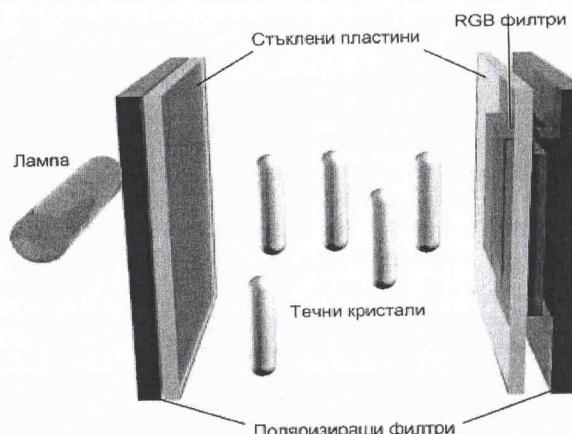
Освен традиционното приложение, като цифрови, буквени и матрични индикатори в електронните прибори, течнокристалните дисплеи намират приложение в много области:

- автомобилната промишленост. Създадени са индикатори, които работят при температури от -40°C и цялото арматурно табло на автомобила може да бъде заменено;
- широкоформатни дисплеи – за компютри, телевизори с плоски екрани, видеостени;

- дисплеи за преносими компютри, мобилни телефони и всякакви портативни потребителски устройства;
- оптични памети.

5.2 Принцип на работа на течнокристалните дисплеи

Течнокристалните дисплеи използват свойствата на течните кристали да променят пропускливостта си на светлина под въздействие на електрическо поле. LCD, по-точно матрицата му, за разлика от електронно-лъчевите, плазмените и LED дисплеите, не излъчва светлина, а само пропуска светлината, излъчвана най-често от неонова лампа със студен катод, монтирана зад нея. Количество светлина, преминаваща през матрицата, се регулира чрез поляризации филтри, ориентирани течните кристали под определен ъгъл един спрямо друг. Най-общо, принципът на действие на течнокристален дисплей е представен на фиг. 5.2.



Фиг. 5.2 Типична структура на LCD.

Светлината от лампата първо преминава през система от отражатели, след което през първия поляризиращ филтер, и попада в слоя от течни кристали, които са контролирани най-често от транзистор. Транзисторът създава електрическо поле, задавайки пространствена ориентация на течните кристали. Поляризацията на светлината, преминаваща през подредена по определен начин кристална структура, се променя и в зависимост от нея или ще бъде погълната от втория поляризиращ филтер на изхода, като в този случай ще се образува черен пиксел, или ще бъде погълната частично от RGB филтрите, образуващи различни цветове, включително бял.

§.3 Видове течнокристални дисплеи

Съществуват множество различни класификации на течнокристалните дисплеи – според използванятия вид течни кристали, вида на матрицата, предназначението и др. В този раздел са разгледани само някои по-често наздавани видове течнокристални дисплеи.

§.3.1 LCD с пасивна матрица

Първите LCD са произвеждани с пасивни матрици. При тях за директното управление на пикселите се използват не транзистори, а пасивни елементи. За пасивните матрици е характерно лошото изобразяване на цветовете, черният цвят не е черен, а сив, при бързото движение на курсора остава светеща "следа". Недостатък е и по-високата консумация в сравнение със съвременните матрици на базата на MOS технология. В момента такива матрици вече почти не се произвеждат и са заменени от активни матрици. Използват се само за дисплеи с малък брой сегменти и все още намират приложение в електронни калкулатори и часовници.

§.3.2 LCD с активна матрица. TFT (Thin Film Transistor) технология

В активните матрици се използват отделни усилвателни елементи за всеки пиксел, които позволяват да се намали времето за управление на прозрачността им. Обикновено за управлението на тези дисплеи се използва матрица от тънкослойни транзистори (Thin Film Transistors – TFT), поради което и тези дисплеи обикновено се наричат TFT LCD.

Технологията TFT е най-разпространената в момента технология при производството на течнокристалните дисплеи. TFT, чрез който се изгражда светещият пиксел, е наистина с микроскопичен размер и най-вече дебелина, а броят на такива транзистори в една матрица е много голям и зависи от разделителната способност (при 1280 x 1024 точки броят транзистори в матрицата е 3 932 160).

Активните матрици имат по-голяма яркост, по-широк ъгъл на видимост, времето на послесветене на пиксела отдавна вече е под 40 ms в сравнение с близо 300 ms при пасивните матрици.

§.3.3 TFT LCD с усукани нематични кристали (TN TFT)

Най-разпространеният тип течнокристални дисплеи се базира върху технология, съкратено означавана като TN TFT или TN+Film TFT (Twisted Nematic + Film TFT). Терминът *Film* в заглавието означава допълнително тънко външно покритие, позволяващо ъгъльт на видимост да бъде значително увеличен. TN LCD са представени и се развиват активно през 70-те години на

XX век, за да се стигне в днешни дни до широкото им приложение в компютърни монитори и плоски телевизори.

Принципът на работа на тези дисплеи е следният. Клетката на TN LCD, се състои от горен и долен слой, разделени от тясно пространство (около 5–10 микрона), запълнено със слой течен кристал. Основата е обикновено тънко стъкло, върху което са нанесени електропроводими покрития (електроди), направени от тънки слоеве прозрачен проводящ оксид (Transparent Conductive Oxide – TCO). Слоевете на електрода са покрити с тънък подравняващ слой на полимер, който спомага за подреждането на молекулите на течния кристал при контакт с тях. Течните кристали трябва да са ориентирани приблизително паралелно на повърхността. При повечето изпълнения в момента слоевете за изравняване се състоят от слой полимер, дебел няколко десетки нанометра. В асемблирането на клетката, слоевете са подредени така, че направленията на подредбата да са перпендикулярни един на друг. Всичко това е между два слоя поляризатори. При липса на каквото и да е напрежение течните кристали са хаотично разположени между двата слоя. Без определено състояние на поляризаторите на течния кристал светлината, попадаща в клетката, щеше да бъде погълната и клетката щеше да изглежда тъмна. В присъствието на слой от течни кристали клетката изглежда прозрачна, защото оптиката от изкривения течен кристал съчетава кръстосаното подреждане на поляризатори. Прилагането на напрежение от три до пет волта през течния кристал разрушава изкривеното състояние и кара молекулите да се ориентират перпендикулярно, което придава тъмен външен вид на клетката. Затова в простите дисплеи клетките на течния кристал се управляват на отразяващ принцип, с разсейяния рефлектор поставен зад дисплея, а активизираните части на модела на рефлектор се появяват като черни образи на сив фон, осигурен от разсейния рефлектор. Следвайки примера на електродите в сегментите, е възможно на течнокристалния дисплей да се изобразят буквено-цифрови символи с много ниска разделителна способност, каквито са образите в цифровите часовници и калкулатори. По-сложни изображения могат да се показват с помощта на адресиране с пасивна или активна матрица.

TN TFT LCD технологията наред с редицата си предиства също така е сравнително евтина, поради което в момента е най-разпространената за изработка на широкоформатни екрани за компютри и телевизори.

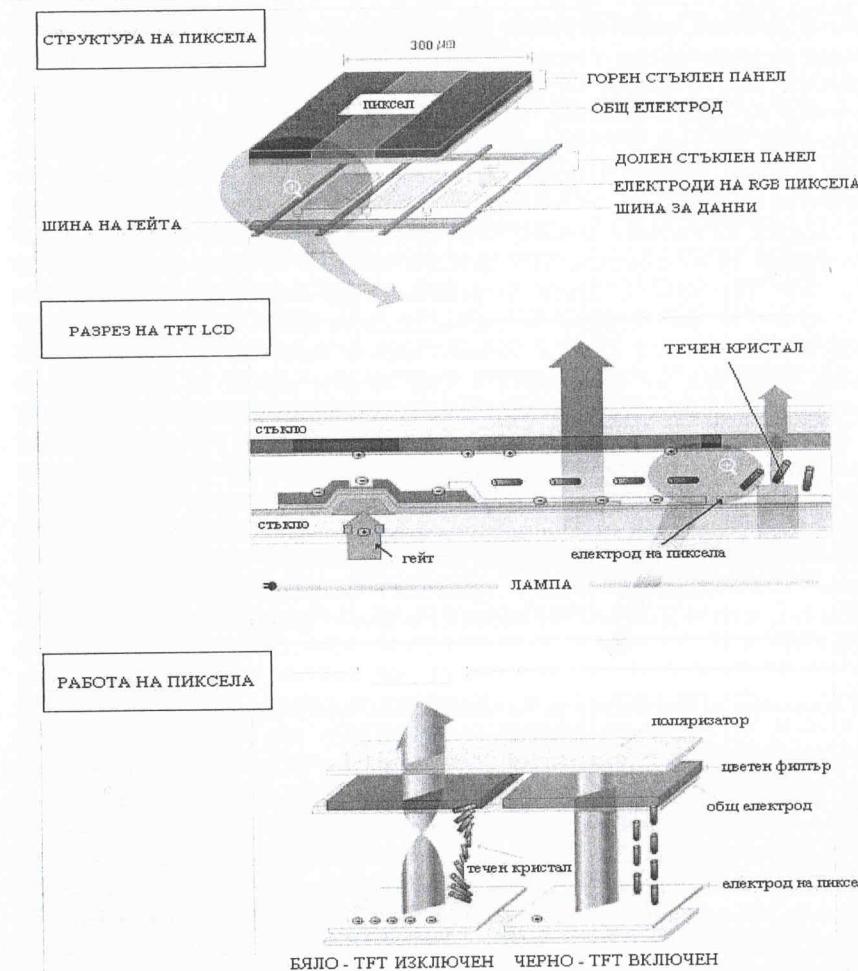
5.3.4 LCD със свръхусукани нематични кристали (STN LCD) и други технологии

Свръхусуканите нематични (Supertwisted nematic – STN) течни кристали са открити в началото на 80-те години, като те са увеличили ъгъла на изкривяване до 180–270° (240° са най-често използвани), което позволява използването на много по-голям брой пиксели на ред, а впоследствие и уголемяването на цялото изображение, което може да бъде показвано. Тези STN дисплеи постигат това с помощта на подобна конфигурация както TN LCD дисплеите, но с допълнителна оптичноактивна добавка, поставена в течния дисплей.

Кристал. Дисплеят може да работи чрез адресиране с пасивна матрица, чийто пиксели са разположени в колони и редове. Когато има напрежение на точно определен ред и колона, се активира пиксел, намиращ се на мястото на пресичане на реда с колоната. STN технологията е причина за по-голямата относителна промяна в оптическо отношение при приложеното напрежение, сравнено с 90° усукани клетки. Цветните STN дисплеи се произвеждаха за компютърни дисплеи, но в последните години са заменени от по-modерните TFT дисплеи, които имат по-добър ъгъл на виждане, по-добри цветове и бързо опресняване. Монохромните STN дисплеи все още се използват широко в мобилните телефони и други устройства, при които не е необходимо използването на цветът. Множество фирми по света правят постоянно опити да подобрят технологията и често успяват, поради което от година на година ставаме свидетели на еволюцията в тази област, довела до постепенното изместване на класическите дисплеи. NEC и Hitachi предложиха технологията IPS (In-Plane Switching), позволила ъгълът на видимост на дисплеите да бъде увеличен до 170 градуса, а управляващите електроди на транзисторите се намират върху една подложка. Технологията MVA (Multi-Domain Vertical Alignment), предложена от Fujitsu, позволява всеки един пиксел, формиращ изображението, да бъде разделен на няколко участъка, където се извършва локална ориентация на течните кристали. Матриците, използващи тази технология, имат широк ъгъл на видимост и кратко време за светване и гасене на пиксела.

5.4 Технология на изготвяне на течнокристалните дисплеи

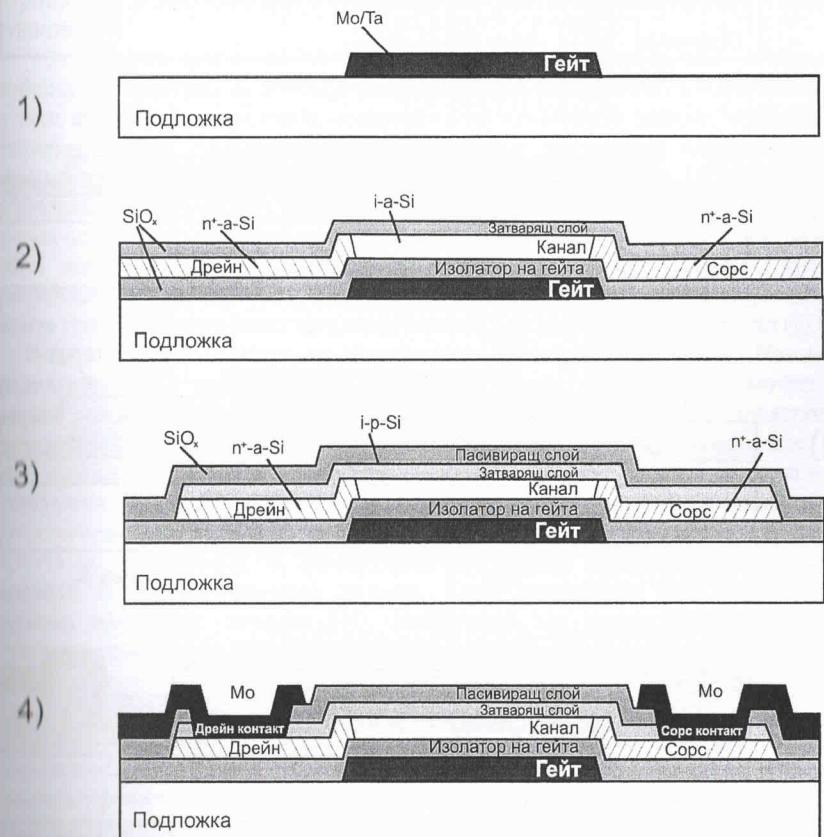
Изследванията, проведени с помощта на експериментални течнокристални клетки, показват, че начинът на изготвянето им е от решаващо значение и в редица случаи може да окаже отрицателно влияние върху крайния резултат. Ето защо тяхната технология трябва да бъде подчинена на един основен принцип – да осигурява оптимални и стабилни с времето условия за наблюдение. Като материал за дисплейните панели обикновено се използва алкално стъкло с висока степен на равнинност и гладкост. Изискванията към повърхността на панелите, с която контактува течният кристал, са да бъде без механични увреждания и да е химически чиста. Такава трябва да бъде тя и преди нанасянето на проводящите и ориентиращите слоеве. Има методика за почистването на стъклени панели от органични и механични замърсявания, соли и др. В съвременните течнокристални дисплеи най-често се използва активна матрица, направена по TFT технология. Матриците се изработват от силиций – аморфен (a-Si TFT) или поликристален (poly-Si TFT). В последно време се прилага главно poly-Si TFT технологията, защото позволява по-големи мощности при по-малки площи, цената й също е по-ниска от монокристалната. Структурата на един пиксел от TFT LCD дисплей е показана на фиг. 5.3.



Фиг. 5.3 Структура на пиксела при TFT LCD матрица.

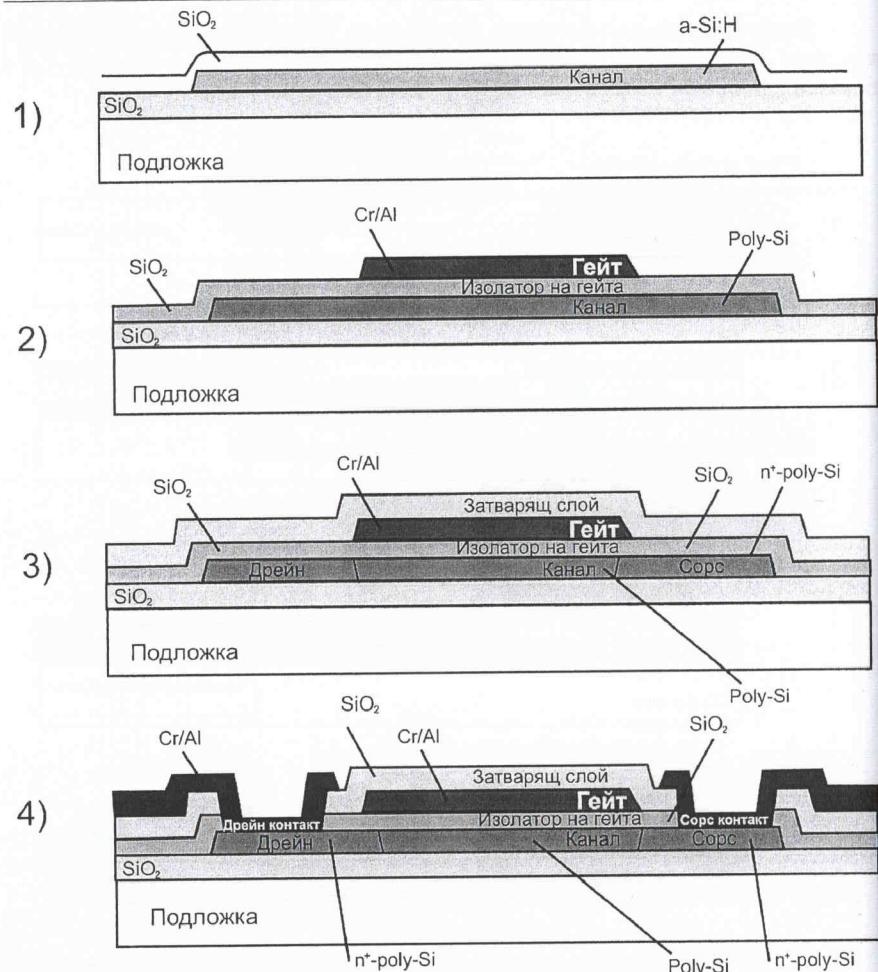
Всеки отделен пиксел съдържа цветен филтър (RGB) за трите основни цвята, които в съвременните дисплеи се контролират от отделни транзистори. При показаната TN TFT технология, когато транзисторът е изключен, светлината от лампата се пропуска изцяло и съответно яркостта за конкретния цвят от пиксела е 100%. Когато транзисторът е включен, светлината не се пропуска и съответният цвят отсъства от състава на пиксела. Ако и трите транзистора са включени, пикселят е черен.

Технологично транзисторите, изграждащи TFT матрицата, биват основно два типа – с долн гейт (bottom gate) и с горен гейт (top gate). На фиг. 5.4 е показан принципът на изготвяне на poly-Si TFT матрица с долн гейт.



Фиг. 5.4 Технология на изготвяне на Poly-Si TFT LCD матрица с долн гейт.

При тази технология първо се изготвя шината на гейта, който е от молибден, тантал или волфрам. След това се изготвя каналът на транзистора, който е от полисилиций. Метализацията за контактите на дрейна и сорса обикновено също е от молибден. На фиг. 5.5 е показана другата основна технология с горен гейт. Тази технология се използва по-често, тъй като при нея посилителите имат по-голяма подвижност, което определя по-голяма мощност при намаляване на площта и увеличаване на резолюцията.



Фиг. 5.5 Технология на изготвяне на Poly-Si TFT LCD матрица с горен гейт.

При технологията с горен гейт първо се изработка каналът на транзистора, а впоследствие гейтът. Използва се първоначално аморфен силиций, който се отгрява докато кристализира при високи температури от порядъка на 600°C. За да не се влошават параметрите на подложката, може да се използва и по-нискотемпературен процес, при който рекристализацията се постига с помощта на лазер при температура от 450°C. Високотемпературният процес изисква скъпи кварцови подложки и поради това напоследък се използва предимно нискотемпературният, при който се работи с подложки от обикновено алкално стъкло. Друго предимство на технологията с горен гейт е,

че високотемпературните процеси се осъществяват преди изготвянето на гейта, който има различно температурно разширение и високотемпературното му загряване води до напуквания, създавайки проблеми с надеждността на цялата матрица. Тук е показана друга алтернатива за контактна метализация с хром и алуминий.

За приложението на течните кристали в индикаторната техника е необходимо напречно на течнокристалния слой да се приложи електрично поле. За тази цел върху вътрешната повърхност на стъклените панели, образуващи течнокристалната дисплейна клетка, се нанася проводящо покритие. Така клетката представлява плосък кондензатор, чито електроди са прозорните проводящи слоеве върху двата панела, а диелектрикът е течният кристал. Прозорният проводящ слой трябва да отговаря на следните изисквания: да има добра адхезия към повърхността на стъклените панели, да е с висока прозрачност и проводимост, да е механически здрав и физически устойчив. Такива свойства притежават например слоевете от индиево-калаен оксид (ITO).

Друг важен елемент на клетката е ориентиращият слой. Неговото предназначение е при директен контакт с течния кристал в отсъствие на външно електрично или магнитно поле, да задава определена електродна ориентация на течнокристалните молекули. Методите за нанасяне на ориентиращи слоеве най-общо се делят на две категории: вакуумни и невакуумни. Вакуумните методи са подходящи и ефективни при нанасянето на ориентиращи слоеве върху малки площи, каквито са тези на клетките за портативни устройства, а невакуумните – върху по-големи площи като панелите за широкоформатни дисплеи. Като ориентиращ слой може да се използва наклонено изпарен SiO. Нанасянето му върху повърхността на стъклените панели се осъществява посредством вакуумни методи – наклонено и двойно изпарение. За оптимизиране на процеса на двойното изпарение е разработен ротационен модул, посредством който едновременно и без прекъсване може да се осъществи първото и второто изпарение на SiO. Нанесените с помощта на модула ориентиращи слоеве от SiO се характеризират с висока степен на еднородност по цялата си площ. Определен тип ориентация на течнокристалните молекули е постигната и чрез използването на повърхностноактивни вещества (ПАВ), лецитин (Lecithin) и HTAB (hexadecyl trimethylammonium bromide). Тяхното отлагане в тънък слой върху повърхността на стъклените панели се осъществява чрез следните невакуумни методи:

- запълването на клетките става с течен кристал, в който е разтворен в малки количества (около 0,1 тегл. %) Lecithin или HTAB. В процеса на запълване върху повърхността на стъклените панели се слага слой от ПАВ, който е физически адсорбиран и е в динамично равновесие с течния кристал;
- стъклените панели се потапят в спиртен разтвор на Lecithin или HTAB, след което този разтвор се нанася върху тяхната повърхност посредством центрифуга.

При монтажа на клетките между стъклените панели се поставят разделители (обикновено от тefлон) или микросфери. Панелите се залепват един към друг с лепило. Разделителите и лепилото трябва да са химически инертни спрямо течния кристал, да не отделят при температурната обработка вещества, които да влошават ориентацията на молекулите му, неговото време на живот, проводимостта на електродите и др. Освен това лепилото трябва да осигурява и херметичност на клетките за дълъг период от време. Разстоянието d между стъклените панели в дисплейните клетки се определя от спектралните им криви на пропускане с помощта на формулата

$$d = \frac{n}{2} \left[\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right], \quad (5.1)$$

където n е броят на максимумите между две стойности на дължината на светлинната вълна λ_1 и λ_2 .

Проведените изследвания на влиянието на разтворените в течния кристал примеси върху ориентацията на течнокристалните молекули, задавана от топографията на твърдокристалната повърхност, показват, че наличието на полярни примеси води до обръщане на предпочитаното направление на ориентация приблизително на 90° , а в случая на лецитин – и до намаляване на енергията на сцепление.

5.5 Характеристики на широкоформатни LCD

Една от най-важните характеристики е разделителната способност. Всеки един течнокристален дисплей има само една разделителна способност, наречена присъща (native), при която образът е най-добър. Тази особеност произтича от начина, по който се формира изображението върху екрана на дисплея – от отделни светещи пиксели. При това положение, ако например еcranът на един стандартен 17" дисплей е съставен от 1310 720 пиксела, той ще работи на присъща резолюция от 1280×1024 точки. А какво ще стане, ако решим да увеличим резолюцията? Мониторът няма да може да я поддържа, защото размерът на пикселите е един и същ, и няма откъде да се увеличи количеството им за по-високата резолюция. При промяна на резолюцията към по-ниска, което е възможно, управлението на монитора задейства алгоритмите, преизчисляващи картина. В този случай, ако например сложим резолюция 800×600 , логиката на устройството ще трябва да "обедини" някои съседни пиксели, за да симулира увеличаването на размерите им и да изчисли с какъв цвят да ги оцвети. В този случай почти винаги се забелязва някакво "размазване" на картина, освен в случаите, в които някои монитори не "разтягат" картина до краищата на монитора при намаляване на разрешаващата способност, а я пускат в прозорец с реалните му размери по средата на екрана.

Таблица 5.1. Предимства и недостатъци на LCD в сравнение с CRT монитори за компютри.

Параметри	LCD монитори с активна матрица	CRT монитори
Разрешаваща способност	Една с фиксиран размер, зависещ от броя пиксели в матрицата. Най-добре изображението се вижда само при тази резолюция, но в зависимост от поддържаните възможности е възможно използване на по-ниска резолюция, при която качеството се влошава.	Поддържат се различни резолюции, качеството на образа при преминаването от една към друга не се влошава и зависи донякъде само от честотата на опресняване.
Честоти на опресняване (refresh rate)	Оптималната честота за всички LCD е 60Hz, която е достатчна за да няма треперене на образа; повечето монитори поддържат стандартно и по-висока – 75, дори 85 Hz.	Само при опресняване (refresh) над 75Hz, че дори над 85Hz, липсва треперенето на образа.
Точност на изобразяване на цветовете	Поддържа се True Color и се емулира цветовата температура.	Поддържа се True Color, има множество комерсиални устройства за калиброване на цветовете, включително и няколко софтуерни подхода.
Изобразяване на динамични сцени (Motion Artifacts)	По-старите матрици с големи времена на реакция (послесветене) на пиксела имаха проблеми с възпроизвеждането на динамичните сцени (замазване). При по-новите матрици с време за реакция под 25ms този проблем вече не се наблюдава.	Времето за отклика (реакция) на този тип монитори е много малко, така че няма никакъв проблем с изобразяването на най-динамичните сцени.
Принцип на изобразяване на картината	Изображението се формира от отделни светещи пиксели, броят на които зависи от резолюцията на конкретния панел. Големината на пикселите зависи от самите тях, а не от разстоянието между тях. Всеки пиксел на изображението се управлява индивидуално, което осигурява перфектна яркост, контрастност и рязкот (sharpness) на картината. Картината изглежда по-живя и гладка.	Пикселите се формират от групи точки или линии. Стъпката на точката или линията зависи от разстоянието между точките или линиите с един и същ цвят. При това положение контрастта и резкостта на изображението зависи от размера на точката, разстоянието между тях, от качеството на самия кинескоп и електрониката на монитора.
Интерференция	LCD мониторите използват различен начин на формиране на изображението с автоматично проследяване и премахване на цифровия шум, така че моаре практиките е невъзможно да бъде забелязано.	Всички монитори с електронно-льчева тръба, дори и най-скъпите, имат моаре (Moiré). По-скъпите модели имат алгоритми за намаляването му чрез допълнително регулиране.
Ъгъл на видимост	Почти всички LCD дисплеи осигуряват ъгъл на видимост над 120° градуса, доста от тях имат ъгъл над 160° .	Изображението се вижда под всяка към ъгъл.
Контраст и острота на изображението (Sharpness)	Контрастът е перфектен, когато резолюцията е тип native за даден панел.	Картина на невинаги е много контрастна, като това зависи от няколко фактора – технология на кинескопа, размер на точката, качество на видеoadаптера, опресняване, фокусировка на монитора и др.
Изобразяване на черния цвят (Black-Level)	Все още е много трудно да се изобрази напълно черен цвят, понякога LCD дисплеите трудно изобразяват оттенците на сивото.	Перфектен черен цвят.

Лоши пиксели	В процеса на производство, понякога и в процеса на експлоатация, някои транзистори спират да работят правилно. Тогава върху экрана се появяват или светещи в различен цвет точки, или пиксели, които не светят.	Много рядко кинескопите имат една или две фосфорни точки, които много трудно се забелязат. Кинескопите с апертурна решетка (например Trinitron технологията на Sony) имат две тънки хоризонтални линии, понякога доста дразнещи окото.
Консумация на енергия и излъчвания	Практически нямат никакви опасни електромагнитни излъчвания. Консумацията на енергия е около 60-80% по-ниска в сравнение с монитори с кинескоп със същия диагонал.	Имат електромагнитни излъчвания, нивото на които би трябвало да съответства на международните стандарти за безопасност, т.е. да е в допустимите граници.
Интерфейс	Много от мониторите са оборудвани с цифров интерфейс, но за момента повечето имат и аналогов за осигуряване на съвместимост с по-старите модели видеоадаптери.	Аналогов интерфейс по правило.

Друга особеност на течнокристалните дисплеи в сравнение с електронно-лъчевите (CRT) е честотата на опресняване на экрана. Тъй като при LCD технологията, образно казано, пикселът свети толкова дълго, колкото е необходимо, за разлика от конвенционалния монитор с електронно-лъчева тръба, в който пикселът свети само един малък интервал от време, докато лъчът от електронната пушка попадне върху него (и затова се налага да се опреснява изображението), честотата на опресняване е без особено значение при LCD и са достатъчни и 60 Hz за стационарно (немигащо) изображение.

Третият основен показател на мониторите е яркостта. Тук ситуацията е нееднозначна, защото не съществува някакъв стандартизиран начин да се измери яркостта на един LCD. Освен това тя може да се различава в центъра и по краищата на экрана в зависимост от разположението на лампите и броя им. Друг параметър, който трябва да се отбележи, е контрастът. Контрастът на течнокристалните дисплеи се изчислява като съотношение между яркостта на най-тъмния и най-светлия цвет.

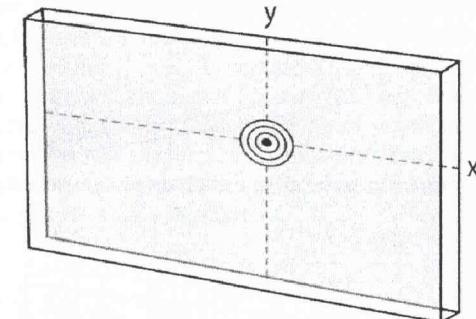
5.6. Сензорни дисплеи, чувствителни на докосване (touchscreen – тъчскрийн)

Сензорните дисплеи навлизат все по-широко, както в промишлената апаратура, така и в устройствата в бита. Те обикновено представляват комбинация от TFT LCD и допълнителен сензорен панел, който дава многобройни възможности за подобряване на функционалността и управлението на цялото устройство. Сензорният панел би могъл да бъде технологично независим от TFT LCD и да бъде допълнително прикрепен, но в последно време технологията на изработка се нагажда към производството на сензорните дисплеи в един неделим технологичен процес.

5.6.1 Резистивни сензорни дисплеи (Resistive Touchscreen)

Резистивните сензорни дисплеи са съставени от няколко слоя, като най-важните от тях са две тънки метални електрически проводими пластинки, които

са разделени от много малък процеп. Когато някакъв обект (пръст, писалка или каквото и да е друго) докосне дисплея, той се огъва и горната пластинка докосва долната, при което се създава електрическа връзка. За да се определи мястото на докосване, контролерът по двойки измерва напрежението между електродите, разположени в краищата на дисплея (фиг. 5.6).

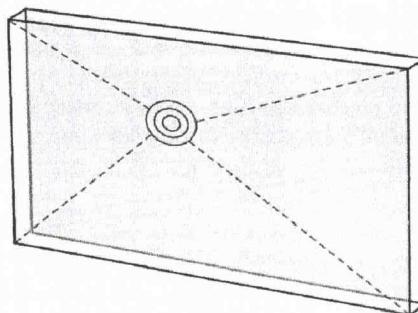


Фиг. 5.6 Принцип на работа на резистивен сензорен дисплей.

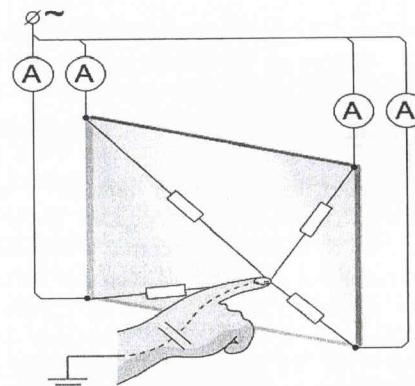
Главната особеност на този тип панели е нуждата от физическо натискане на дисплея. Положителните страни на резистивната технология включват по-ниска цена за изработка, както и устойчивост срещу зацепване и намокряне. Недостатък обаче е фактът, че този тип дисплеи се драскат много, а допирът им с остри предмети оказва много негативно влияние. Неприятно е също и малко по-ниското предаване на светлина – резистивната система пропуска до около 75% от яркостта на дисплея. Повечето портативни устройства използват именно резистивната технология. Има мнения, че резистивните сензорни дисплеи не могат да разпознат докосвания в няколко точки, т.нр. "мултитъч", но това не е така.

5.6.2 Капацитивни сензорни дисплеи (Capacitive Touchscreen)

Сензорният еcran, работещ на капацитивен принцип, реагира на докосване от електропроводящ предмет (фиг. 5.7). Капацитивните дисплеи са конструирани от изолатор като стъклото, покрит с тънък прозрачен проводник, най-често индиево-калаен оксид. В ъглите на панела са разположени четири електрода, към които се подава променлив ток. Тъй като човешкото тяло също е проводник, в момента когато потребителят докосне с пръст екрана, електрическият заряд от проводящия слой се насочва към кожата на човека и се получава изкривяване в електростатичното поле – част от заряда се пренася върху тялото и съответно заряда върху капацитивния слой намалява.



Фиг. 5.7 Принцип на работа на капацитивен сензорен дисплей.

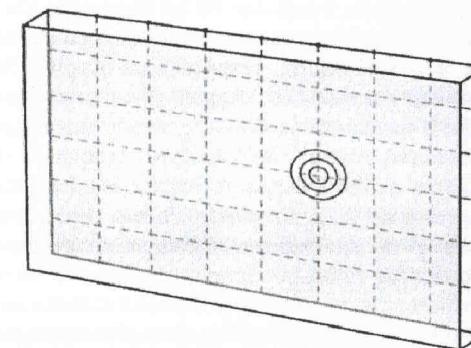


Фиг. 5.8 Определяне на местоположението на докосване при капацитивен сензорен дисплей.

Контролерът на дисплея измерва силата на тока в четирите електрода – тя е пропорционална на разстоянието от ъгъла на панела до точката на докосване. По този начин може да се определи чрез координатна система точното местоположение на поставения пръст – данните се предават към системата за управление, където те се пресмятат, а след това активният софтуер ги получава и взима решение какво събитие трябва да се случи (фиг. 5.8). Едно от предимствата на тази технология пред резистивната е това, че тя пропуска до 90% от светлината на дисплея – по този начин картинаста става по-чиста, а благодарение на по-добрата енергийна ефективност батерията на устройствата се пести повече. При по-ниски температури обаче с капацитивен дисплей се работи по-трудно, а чрез ръкавици или през друг непроводящ материал въобще не може да бъде управляван. Същият капацитивен принцип се използва освен при сензорни дисплеи, още и при тракпадовете на преносимите компютри.

5.6.3 Проекционно-капацитивни сензорни дисплеи (Projected Capacitive Touchscreen)

По-напредналата форма на капацитивните сензорни дисплеи са проекционно-капацитивните екрани. Върху долната страна на покритието им се намира мрежа от електроди. В мястото на докосване с ръка се променя електрическият капацитет, а контролерът определя в коя точка на пресичане на електродите се е случило това и определя координатите (Фиг. 5.9). Това позволява те да притежават много по-висока разрешаваща способност от резистивните системи, както и възможност да се управляват чрез „мултитъч“. По-високата резолюция пък разрешава оперирането без директен контакт, тоест проводящият слой може да бъде поставен под защитни слоеве – така системата става защитена от удари, прах или вода.



Фиг. 5.9 Принцип на работа на проекционно-капацитивен сензорен дисплей.

Едно от най-известните устройства, използващи този принцип, е телефонът iPhone. Проекционно-капацитивни екрани притежават още екраните на някои банкомати.

5.6.4 Сензорен дисплей с генериране на ултразвукови вълни (Surface acoustic wave display)

Интересна е технологията за реакция при допир, генерираща ултразвукови вълни, които преминават непосредствено върху дисплея. Когато панельтът бъде докоснат, част от вълните биват абсорбираны. По този начин се регистрира точното местонахождение на докосването. Недостатък на технологията е възможността за лесно нараняване на повърхността. Замърсяването също пречи много на прецизната работа. За сметка на тях обаче големият плюс е отсъствието на каквито и да е метални слоеве на экрана, което означава 100%-ва прозрачност, водеща до пълна яснота на изображението. Това прави системата перфектна за изобразяване на детайлни графики.

5.6.5 Други типове сензорни дисплеи

Съществуват и други сензорни технологии, които също така намират комерсиално приложение. Например използване на мрежа от инфрачервени лъчи и системи с използване на камери, проследявачи движението. Също така съществуват и технологии с използване на тензопокритие, деформацията на което променя електрическото съпротивление. Все по-често намират приложение методи, използвани оптични камери и някои други, но в комбинация с LCD се използват предимно първите три.

5.6.6 "Мултитъч" технология (Multitouch).

"Мултитъч" се нарича технологията, позволяваща да се разпознават натискания на сензорния еcran в няколко точки едновременно. Това естествено дава нови възможности за управление на устройствата. Пример за използване на тази технология е в мобилните телефони на Apple iPhone, а терминът "multitouch" е запазена марка на Apple. Технологията е комерсиално анонсирана от Apple в началото на 2007 година с представянето на първия iPhone. По-късно същата година Microsoft отговарят с анонсирането на "multitouch" маса. Тя се нарича Microsoft Surface и представлява компютър с огромен, 30-инчов, реагиращ на докосване дисплей. Интересна е технологията, която масата използва за да работи. Специален мултимедиен проектор, поставен в нея, прожектира картина върху повърхността на масата, а 4 малки камери записват отраженията от инфрачервени светлини на обектите и пръстите на хората, които я използват. Устройството поддържа жестове с до 52 докосвания в едно и също време.

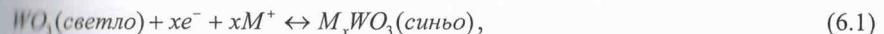
6. 1 Въведение

Електрохромизъмът представлява способността на материалите да променят цвета си при прилагане на напрежение или протичане на ток през тях. При промяна на поляритета на приложеното напрежение или смяна на посоката на тока промяната на цвета трябва да бъде обратима. Това явление се проявява както при неорганични, така и при органични материали. Типични представители на электрохромните материали са оксидите на преходните метали, които могат да се нанасят лесно във вид на тънък слой. Промяната на цвета е в диапазона от светло или прозрачно до цветно или пълно (непрозрачно). При органичните материали се наблюдава промяна от един цвят в друг.

6. 2 Физика на процеса електрохромизъм и основни параметри на ECD

Електрохромното поведение на металните оксиди се обяснява с тяхната конфигурация на електронната обвивка. Нека се разгледа случаят, в който нивото на Ферми на материала се намира около средата на забранената зона. Ако забранената зона е по-голяма от енергията на падащата околнна светлина, оксидът е прозрачен. Метален ион на такъв материал може да бъде редуциран чрез приемане на електрони (заедно с положителни иони), което води до изместване на нивото на Ферми към по-високите енергийни нива. Материалът започва да взаимодейства с попадашата върху него светлина и става абсорбиращ. Преминаването към абсорбиращо състояние чрез редукция се нарича катоден електрохромизъм. Ако това стане чрез окисление, процесът е аноден електрохромизъм.

За да се обясни механизъмът на оцветяване и обезцветяване, разглеждаме электрохромния ефект при wolframовия триоксид WO_3 като най-широко разпространеният и използван електрохромен материал. Този ефект може да се изрази със следната химическа формула:



Където M^+ е ион на метал или протон. Посоката на реакцията зависи от знака на приложеното напрежение. Характерно за электрохромните дисплеи е ниското захранващо напрежение от около 1,5 V. В посочения пример електрохромният ефект представлява окислително-редукционна реакция. По време на образуването на M_xWO_3 величината "x" нараства. M_xWO_3 е продължение на фазата на изходния материал. Синият цвят е свързан с образуването на аморфен M_xWO_3 . Трябва да се отбележи, че слоевете, получени по различни технологии и с иони на различни метали, са с един и същ цвят и имат еднаква област на оптично поглъщане. Цветът се определя от коефициентите на отражение и на

погълщане, като основно промяната на коефициента на отражение в зависимост от "x" дава явната промяна в цвета.

Електрохромният контраст е един от основните фактори за оценка на качествата на електрохромния материал. Тук контрастът се дефинира като промяна на оптичното пропускане в проценти за определена дължина на вълната, за която материалът променя оптичната си плътност.

Ефективността на оцветяване η , наречена още електрохромна ефективност, е свързана с входната мощност, необходима за промяната на оптичната плътност на електрохромния материал. Това въздействие е промяната на оптичната плътност ΔOD , генерирана вследствие на инжецираното (или отдадено) количество заряд Q_d .

$$\eta = \frac{\Delta OD}{Q_d} = \frac{\log \frac{T_b}{T_c}}{Q_d}, \quad (6.2)$$

където η е в (cm^2/C) и се отнася за дадена дължина на вълната λ , а T_b и T_c са съответно пропускателната способност на прозрачно (bleached) и оцветено (colored) състояние.

Скоростта на превключване се дефинира като времето, необходимо на електрохромния материал да премине от едно състояние в друго. Този параметър зависи от ионната проводимост на електролита, ионната дифузия в електроактивния слой, амплитуда на приложеното напрежение, дебелина и морфология на слоя. Съвременните електрохромни дисплеи имат субсекундно бързодействие.

Стабилността на електрохромните дисплеи се свързва с електрохимична стабилност на материала, тъй като деградацията на двата електрода, на които протичат окислението и редукцията, води до загуба на електрохромен контраст. Деградацията се свързва с необратимо окисление или редукция при много голямо приложено напрежение; загуби iR при протичане на ток i през електрода и електролита поради активното им съпротивление R ; отделянето на топлина при протичането на ток; странични реакции, получени заради вода или кислород, попаднали в електрохромната клетка. За една такава клетка е характерно време на живот от 10^6 цикъла на оцветяване-обезцветяване, което прави електрохромните дисплеи с по-ниска надеждност от тази на течно-крилатните. Удължаване на времето на живот се постига чрез технологии за нанасяне на тънки слоеве без дефекти, постигане на заряден баланс в клетката и надеждна херметизация при асемблиране, която не допуска кислород от околната среда да прониква във вътрешността на дисплея. Когато електрохромните устройства се ползват за различни от дисплеите приложения, като например „интелигентни стъкла” (smart windows), тогава от значение за стабилността са и параметрите на околната среда – температурен диапазон, скорост на нагряване/охлаждане, въздействие на ултравиолетови лъчи, влага, дъжд и др.

6.3 Структура на електрохромна дисплейна клетка и принцип на действие

На фиг. 6.1 е показана типична структура на електрохромна дисплейна клетка. Като основен функционален слой е разгледан WO_3 , който е нанесен между прозрачен проводящ електрод от индиево – калаен оксид и електролитен слой.



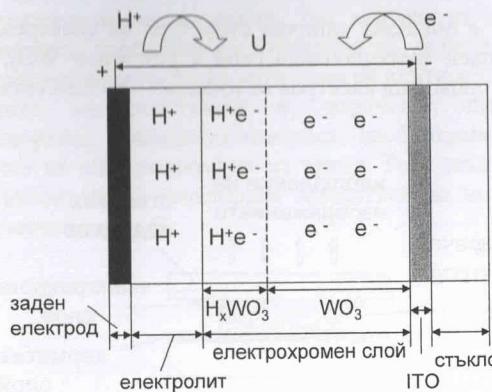
Фиг. 6.1 Примерна структура на електрохромна дисплейна клетка.

Когато потенциалът на електрода е отрицателен, той инжецира електрони в слоя от волфрамов триоксид, а от електролита се инжецират протони. Процесът продължава, докато WO_3 не се превърне в H_xWO_3 със син цвят. При отворена верига цветът на покритието се запазва за определено време. По този начин се получава дисплей с дълготрайна памет. При смяна на посоката на тока протича екстракция на електрони и протони, докато слоят изцяло се върне в изходното си неоцветено състояние.

Оцветяването и обезцветяването не са симетрични явления. Оцветяването се регулира главно от свойствата на контакта между WO_3 и слоя, инжециращ протони, докато обезцветяването се определя от преноса на протоните във WO_3 . Тъй като подвижността на електроните е пъти по-голяма от тази на протоните, то бързодействието на дисплея ще се определя от подвижността именно на протоните. За обяснение на принципа на действие на дисплейната клетка (фиг. 6. 1) се използва схемата от фиг. 6. 2.

Прозрачният електрод от ITO създава инжециращ контакт към WO_3 за електроните. Задният електрод може да бъде от въглерод, метал или композитен материал. Контактите са Омови и падът на напрежение върху тях е пренебрежим. Тъй като WO_3 и задният електрод са разнородни материали, между тях възниква електродвижеща сила (ЕДС), която е пропорционална на разликата на техните химични потенциали. Големината и посоката на ЕДС зависят от това дали покритието е оцветено или обезцветено, защото химическият му потенциал в двета случая е различен. При оцветяване WO_3 се

превръща в H_xWO_3 , което се оказва с по-положителен потенциал спрямо задния електрод и възникващата ЕДС е насочена срещу приложеното напрежение.



Фиг. 6. 2 Процес на електрооцветяване в дисплейна клетка с WO_3 .

Динамиката на оцветяването се усложнява от съществуването на различни механизми, които ограничават големината на оцветяващия ток. Тези механизми са пренос на електроните и протоните през обема на слоя от WO_3 ; инжекционна бариера на прехода, инжектиращ електрони; инжекционна бариера на прехода, инжектиращ протони; пренос на заряд в електролита. Инжекционната бариера за електроните на прехода ITO/ WO_3 е незначителна, тъй като се образува омов контакт. Посредством избор на подходящ електролит с ниско специфично съпротивление преносът на заряд в електролита може да се превърне в несъществен фактор. Оказва се, че бариерата на прехода, инжектиращ протони, е доминиращият механизъм, от който зависи работата на електрохромната клетка. Основният израз за оцветяващия ток J_c в зависимост от приложеното напрежение е

$$J_c \sim J_o \exp\left(\frac{U}{2RT}\right), \quad (6.3)$$

където J_o е обемният ток; U е приложеното напрежение; R е константа, свързана с плътността на протоните; T е абсолютната температура. За да се намери зависимостта на тока от времето и да се определи бързодействието на оцветяване се използва времето за дифузия на протоните в слоя τ_D :

$$\tau_D = \frac{d^2}{4D_p}, \quad (6.4)$$

където d е дебелината на слоя, а D_p е коефициентът на дифузия на протоните. Установено е, че в аморфните слоеве D_p се променя от $2,5 \cdot 10^{-7}$ до $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$. Тъй като типичните стойности се променят от 100 нм до 1 мкм, то τ_D се изменя в границите 10^{-4} до 10^{-2} с. На практика времето за оцветяване е по-дълго от времето за дифузия на протоните и се очаква да е от порядъка 0,1-1 с. Времевата зависимост на оцветяващия ток има следния вид:

$$J_c \sim J_o \exp\left(\frac{U}{4RT}\right) \sqrt{\frac{\tau_D}{t}}. \quad (6.5)$$

За малките в сравнение с τ_D времена дифузията в слоя ще бъде съществена за определянето на скоростта на оцветяване. Понеже повърхностната концентрация на протоните x_s също зависи от времето, съществува допълнителна времева зависимост. Полезно е да се намери времето, в течение на което повърхностната концентрация нараства до максимална стойност ($x_s \approx 0,5$). За малки времена $\tau_D < t < \tau_s$, x_s е константа и оцветяващият ток има вида

$$J_c = \frac{q \cdot \rho \cdot x_s D_p}{\pi t}, \quad (6.6)$$

където q е заряд на електрона, ρ е атомната плътност на волфрама (в случая). За малки времена, но и малки стойности на повърхностната концентрация на протоните ($x_s \ll 0,5$), се появява нова времева зависимост на тока:

$$J_c \sim \exp\left(\frac{U}{4RT}\right) \sqrt{J_o \cdot q \cdot \rho} \left(\frac{D_p}{\pi t}\right)^{1/4}. \quad (6.7)$$

Обезцветяването е свързано с екстракция на протоните от H_xWO_3 в електролита и екстракция на електроните в ИТО при смяна на поляритета на приложеното напрежение. За разлика от оцветяването, обезцветяването не се ограничава от инжекционните бариери на преходите. Причината за това е, че посоката на електродвижещата сила компенсира частично инжекционните бариери. Поради по-голямата подвижност на електроните спрямо тази на протоните, преходът WO_3/ITO не ограничава преминаването на обезцветяващия ток. Следователно протичането на тока на обезцветяване се определя от тока на протоните. Протонният ток J_B е равен на

$$J_B = \varepsilon_r \varepsilon_o \mu_p \frac{U^2}{d^3}, \quad (6.8)$$

където ε_r е относителната диелектрична проницаемост, ε_0 е диелектрична константа на вакуума, μ_p е подвижност на протоните, d е дебелина на участъка от WO_3 , в който се формира H_xWO_3 . Времето за обезцветяване на слоя t_B се дава с израза

$$t_B = \exp\left(\frac{d^4}{4\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_p U^2}\right). \quad (6.9)$$

Уравнение (6.8) показва силната зависимост на времето на обезцветяване от дебелината на електрохромния слой. Освен това по-голямата плътност на оцветяване също предизвиква увеличаване на времето за обезцветяване. На фиг. 6.3 е показана зависимостта на тока и на оптично поглъщане от времето за типична електрохромна дисплейна клетка с течен електролит.

Оцветявящият ток намалява по закона $t^{1/2}$ докато слоят изцяло се оцвети. След отстраниване на оцветявания импулс цветът на слоя се запазва, тоест електрохромните дисплеи имат памет. Зарядът, отстранен за времето на обезцветяване, е равен на заряда по време на оцветяването. Върху природата на оцветяване и обезцветяване могат да влияят фактори като свойствата на слоя WO_3 , състава и проводимостта на електролита, естеството на електродите и големината на приложеното напрежение.

Оптичното поглъщане на слоя е свързано с инжеектирания заряд чрез съотношението

$$\frac{I}{I_o} = e^{-kd} \sim e^{-\Delta Q}, \quad (6.10)$$

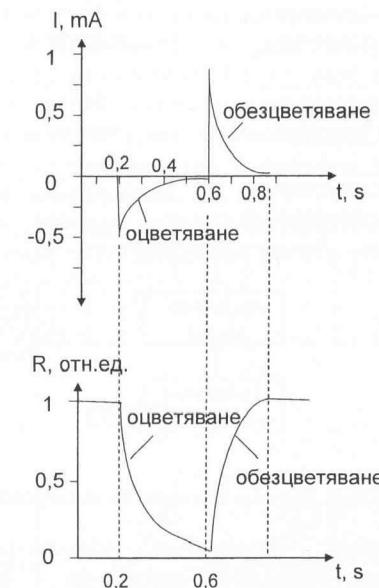
където I – интензивността на светлината, която преминава през слоя, I_o е интензивността на светлината, която проника в слоя, d – дебелина на електрохромния слой, k – коефициент на поглъщане, ΔQ – инжеектиран заряд. Контрастното съотношение на дисплейната клетка се определя като

$$CR = \frac{R_o}{R_x}, \quad (6.11)$$

R_o е интензивност на светлината, отразена в неоцветено състояние, R_x – интензивност на светлината, отразена в оцветено състояние.

Електрохромните дисплеи при работа изразходват по-голяма мощност в сравнение с течнокристалните и по-малка от светодиодните. Щом веднъж един сегмент от дисплея е бил оцветен, той остава такъв известно време. За дисплеите на основата на WO_3 и течен протонен електролит отслабване на цвета се получава след няколко десетки минути. За оценка на мощността, необходима за работата на електрохромния дисплей, нека се разгледа малък цифров сегмент (площ $S = 0,01 \text{ cm}^2$), предназначен за часовников дисплей. Ако

се допусне, че средно за 1 минута се променят 4 сегмента, то общата площ е $0,04 \text{ cm}^2$. За протичане на оцветяване или обезцветяване е нужно около $1,5 \text{ V}$, а за получаване на контраст 50:1 е нужно да се инжеектира заряд $\Delta Q = 4 \text{ mC/cm}^2$. Мощността е $UI = U \Delta Q \cdot S / 60 = 0,8 \cdot 4 \cdot 0,04 / 60 \sim 2 \mu\text{W}$ за импулс, или $4 \mu\text{W}$ за оцветяване и обезцветяване. За изобразяване на секундите е необходима мощност средно $\sim 200 \mu\text{W}$.



Фиг. 6.3 Ток и оптично поглъщане по време на цикъла оцветяване-обезцветяване за електрохромен дисплей на основата на WO_3 .

6.4 Технологичен ред на изготвяне и материали за електрохромни дисплеи

На фиг. 6.4 е показан технологичният ред за изготвяне на електрохромен дисплей.

Като панели за електрохромните дисплеи се използват стъклени подложки, които трябва да имат следните свойства: гладкост, плоскопаралелност, минимална вълнистост, прозрачност за видимата светлина над 95%, висока механична якост, химическа устойчивост, ниска алкалност, висока топлопроводност и достъпна цена. Като прозрачни електроди се използват проводящи слоеве от ITO , които могат да се получат чрез химични пиролитични методи, електроннольчево реактивно изпарение или катодно

реактивно разпрашване. Също така може да се използва слой ($10 \mu\text{m}$) от титанов диоксид (TiO_2), който се нанася чрез ситопечат. Така формирани електроди се изпичат при температура от около 350°C , за да се постигне хомогенизиране на слоя и отстраняване на остатъчните вещества от пастата. Недостатъкът при титановия диоксид е, че след структуриране на слоя под формата на токови писти, съпротивлението между съседните писти намалява от $200 \text{ M}\Omega$ до около $5 \text{ M}\Omega$ вследствие на изпичането при висока температура.



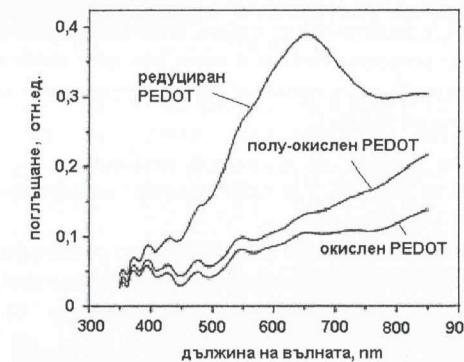
Фиг. 6.4 Технологичен ред за изготвяне на електрохромен дисплей.

Най-разпространеният неорганичен електрохромен материал е волфрамовият триоксид WO_3 , който може да е аморфен a-WO_3 или поликристален c-WO_3 . При аморфните покрития от молибденов триоксид MoO_3 също се проявява електрохромният ефект. В тези материали подвижността на ионите е голяма и инжекцията на електрони предизвиква силно оптично погълщане във видимата област на електромагнитния спектър. Йоните (протоните) се осигуряват от електролит или неорганичен тънък слой като например LiNbO_3 , LiBO_2 и TaO_5 .

WO_3 , използван в електрохромните прибори, е с дебелина в диапазона от 300 nm до 1 μm . Най-често слоевете се получават чрез вакуумно реактивно разпрашване, електроннолъчево изпарение, спрей-пиролиза или чрез химическо отлагане в газова фаза (Chemical Vapor Deposition – CVD). Ако трябва да се получат сегменти, оксидните слоеве (ITO и WO_3) се структурират чрез фотолитография. Ако електролитът е течен, оксидните слоеве трябва да са устойчиви на кисели среди. По-дебелите електрохромни слоеве водят до получаване на по-добър контраст, но времето за оцветяване и обезцветяване се увеличава. Течният електролит се състои от вода, сярна киселина (H_2SO_4), глицерин и бял пигментен прах. H_2SO_4 се явява източник на протони, които да

се инжектират във волфрам-триоксидния слой. Белият пигмент прави електролита непрозрачен и осигурява бял фон за оптимален контраст с оцветения пред него слой. В качеството на такъв пигмент може да се използват TiO_2 или ZnO_2 . Тъй като водата в електролита ускорява деградацията на електрохромния слой, стремежът е към намиране на подходящи непротонни електролити с Li^+ и Na^+ иони. Недостатъкът при тях е по-ниската подвижност на ионите, което увеличава времената за оцветяване и обезцветяване. Затова в последно време актуални за електрохромните прибори са твърдите електролити на основата на SiO_x и $\text{Na}_x\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$, но при тях трябва да се преодолява проблемът с по-високото напрежение (3-5 V), необходимо за проявяване на електрохромния ефект. Методите за получаване на електролитния слой са CVD, чрез центрофужно нанасяне или зол-гел технология. Задният електрод трябва да е неполяризируем. Обикновено той е направен от графит или Na_xWO_3 , нанесени върху неръждаема стомана.

Освен металните оксиди приложение като електрохромни материали намират някои органични полупроводници, както и така наречените виологени [21].



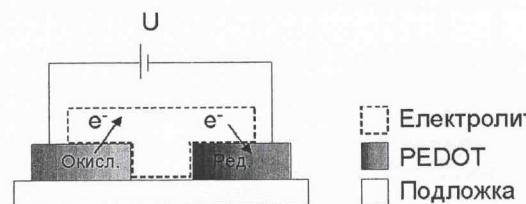
Фиг. 6.5 Оптично погълщане на PEDOT, което илюстрира електрохромните му свойства.

Виологените са производни на пиридина съединения, а пиридинът е ароматно органично съединение с химическа формула $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$. Структурно наподобява бензен, с една заместена с азотен атом CH група. Името на виологените идва от факта, че този клас съединения лесно се редуцират до радикали, които са силно оцветени в синьо. Органичният полупроводник политетилендиокситиофен (PEDOT) също принадлежи към групата на електрохромните материали, тъй като силно променя цвета си при окисление или редукция. Редукцията на PEDOT предизвиква отместване на спектъра му на погълщане от близката инфрачервена към видимата област с максимум около

640 nm, както е показано на фиг. 6.5. Тоест окислената форма на PEDOT е прозрачна, докато редуцираната е оцветена.

Конструкцията на дисплейна електрохромна клетка с органичен материал може да е тип “сандвичова” структура с вертикално подредени слоеве или латерална структура със слоеве, отложени един до друг върху подложката. По разпространени са латералните структури, при които има два съседни електрода от PEDOT с общ електролитен слой над тях. След прилагане на напрежение на електродите протича ток, чиято посока зависи от полярността на приложеното напрежение. Електрохимичната реакция, която протича след прилагане на напрежението предизвиква окисление на положителния електрод, докато на отрицателния протича редукция. Предимството на дисплейна конструкция с два електрода от един и същ материал (PEDOT в случая) е никошкото работно напрежение, което е необходимо да се приложи (под 2 V). На фиг. 6.6 е показан латерален електрохромен дисплей с електроди от PEDOT, както и миграцията на електрони и иони под действието на напрежение U. Процесът е обратим, така че състоянието на пикселния електрод може да се превключва между окислено прозрачно и редуцирано тъмносиньо. Ако напрежението е приложено прекалено дълго време, се получава необратимо оцветяване на пикселите и се поврежда електрохромната клетка [22].

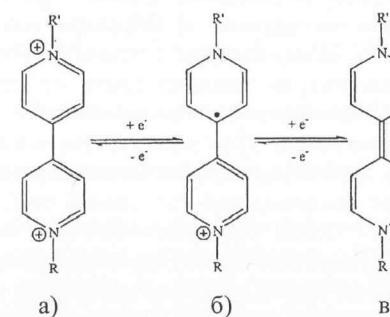
Предимството на тази структура, също както при неорганичните електрохромни клетки, е наличието на памет. Веднъж преминал в едно от двете състояния, пикселният електрод остава в него, без да е необходима енергия за поддържането му. Времето за съхранение на изображението може да достигне до 1 час при използване на PEDOT.



Фиг. 6.6 Латерален електрохромен дисплей с електроди от PEDOT.

В последно време големи надежди се възлагат на виологените като електрохромни материали. Подобно на спрегнатите полимери, те се състоят от верижно подредени, повтарящи се химични групи. Опитно е установено, че ефективността, свързана с отношението формиране/изтриване на изображението, е малка за виологени с къси вериги в електролити на вода основа. Тогава радикалите са лесноразтворими и оцветената форма бързо се размива, тъй като частиците, които я предизвикват, дифундират далеч от повърхността на електрода. Затова се използват виологени с голяма дължина на веригата, за които радикалите са нерастворими и с по-ниска подвижност. Най-разпространеното съединение, използвано в електрохромните устройства, е 1,1'-

dinheptyl-4,4'-бипиридилум (HV). Катионът HV^{2+} придава на състоянието жълт цвят, заради зарядния обмен с бромидния анион. Цветът на виологена може да се управлява чрез присъединяване на различни по химичен състав странични групи към основната верига. На фиг. 6.7 са показани трите основни стабилни състояния на виологена.



Фиг. 6.7 Трите основни състояния на виологена с две реакции на електронен пренос.

Двукатионната форма от фиг. 6.7 а) е най-устойчива, но е безцветна. При виологена могат да протекат последователно две реакции на обмен на електрони и от двукатионната форма да се получи радикал (фиг. 6.7 б), а впоследствие – неутрална частица (фиг. 6.7 в), като всяко състояние придава различен цвят.

Буквено-цифрени електрохромни дисплеи на основата на виологени се характеризират със следните параметри: време за реакция около 10 ms; време на живот около 10^5 цикъла оцветяване-обезцветяване; разрешаваща способност 64x64 пиксела на площ от един квадратен инч; 8 степени на сивото. Консумацията на устройството е около 2 mJ/cm² за оцветяване и около 0,3 mJ/cm² за обезцветяване.

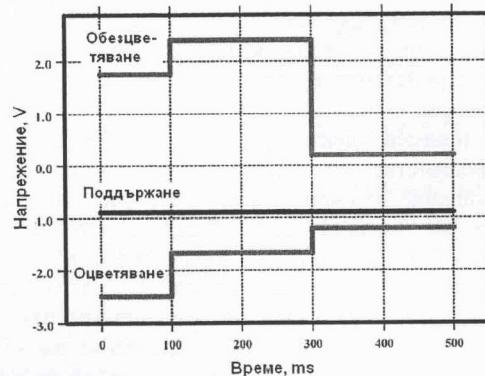
След като е нанесен електрохромният слой, следва герметизиране на двета панела. Предимство на електрохромните дисплеи са невисоките изисквания по отношение на съвместяването на панелите с електродите. Това опростява процеса на герметизиране. Разстоянието между двета панела обикновено е около 100 μ m, като за фиксирането му се използва термо-пластична смола, която изпълнява ролята и на дистанционна рамка. Допълнително се провежда изпечане на съединените панели в камера под налягане 0,2 bar и температура 100 °C в продължение на 45 min. За да не се получи нежелано огъване на подложките под действие на налягането и оттук нежелани контакти между електродите, при герметизацията в камерата се използва специална апаратура, чрез която налягане се прилага само в местата

на свързване на двета панела. Получената структура се вакуумира, за да се изведат влагата и примесите, след което се напълва с електролит през отвор в задния панел и електрод.

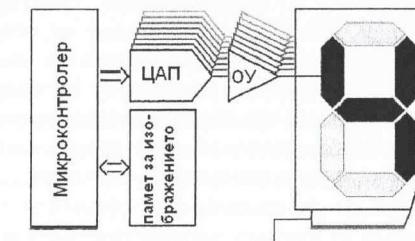
6.5 Управление на електрохромните дисплеи

Обикновено електродните слоеве след отлагане се структурират до независими сегменти, като се създават токови писти. За да се избегне паразитното прехвърляне на сигнала и нежелано оцветяване на съседни сегменти, съпротивлението между съседните сегменти трябва да надвишава $200\text{ M}\Omega$. Омовото съпротивление на токовите писти се прави обратнопропорционално на площта на сегментите, за да се получат еднакви времена на реакция и степени на оцветяване. Това улеснява управлението на сегментите, тъй като са необходими идентични сигнали. Изискванията към управляващите вериги са да осигуряват импулсен ток със средна стойност 1 mA/cm^2 при напрежение около 1 V . Освен това наличието на собствена памет при електрохромните дисплеи дава възможност веригите към сегментите да останат отворени за известно време. Трябва да се осигури защита от пренапрежение, за да не се достигне състоянието на необратимо оцветяване и да се осигурят бързи времена за превключване. Този проблем може да бъде решен също и чрез подходяща последователност от напрежителни сигнали – един за оцветяване, един за обезцветяване и един за поддържане на цвета – които са показани на фиг. 6.8 [23].

Всеки елемент от дисплея е присъединен към цифрово-аналогов преобразувател (ЦАП) и операционен усилвател (ОУ), който дава двуполярно напрежение в границите на $\pm 5\text{ V}$. Преносът на данни към ЦАП се управлява от микроконтролер. Функционалната схема на управляващата верига е показана на фиг. 6.9.



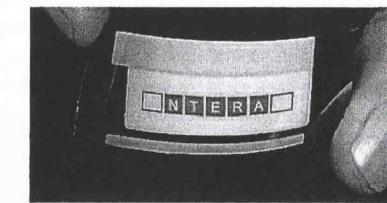
Фиг. 6.8 Управляващи импулси за седемсегментен електрохромен дисплей.



Фиг. 6.9 Функционалната схема на управляващата верига.

6.6 Приложения на електрохромните устройства

NTERA е водеща компания в разработването на електрохромни дисплеи и други приложения, свързани с превключваеми оптични покрития за смарт карти, прозорци и огледала за задно виждане. Фирмата предлага нова технология за нанасяне на електрохромните покрития чрез принтиране, което позволява нанасянето им и върху гъвкави подложки. Дисплеите са ултратънки, информацията, която изобразяват, се чете отлично на ярка осветеност и директно падаща слънчева светлина, а консумацията им е само няколко mW. Ъгълът на наблюдение на практика е неограничен. Тази технология е подходяща за прилагане и в дисплеите, където е необходима висока разделителна способност, като в приложенията за електронни книги например. Все още тази разработка не е внедрена на пазара и е обект на изследвания, но се предвижда първият такъв продукт да е монохромен, което е идеално за текст и прости графики.



Фиг. 6.10 Електрохромен гъвкав дисплей на фирмата NTERA, произведен през 2009 г.

Освен в дисплеите електрохромните покрития намират приложение още в огледалата за задно виждане на превозните средства и в така наречените интелигентни стъклца („smart windows“) [24]. Най-популярни са приложенията за интелигентните системи, които се саморегулират в зависимост от климатичните условия, стайната температура и осветеността, като по този

начин автоматично се регулира консумацията в сградата. Тъй като голяма част от лъчението във видимия и инфрачервения спектър преминава през прозорците на една сграда. Така те се превръщат от обикновена прозрачна повърхност във важен компонент за съхранението на енергията в сградата. Електрохромните стъкла променят оптичните си параметри (най-вече прозрачността си) под действие на приложеното напрежение и по този начин се контролира пропускането на светлина и топлина. Енергия е необходима само за превключването между различните състояния на стъклото, но не е необходима за поддържане на съответното състояние.

7.1 Въведение

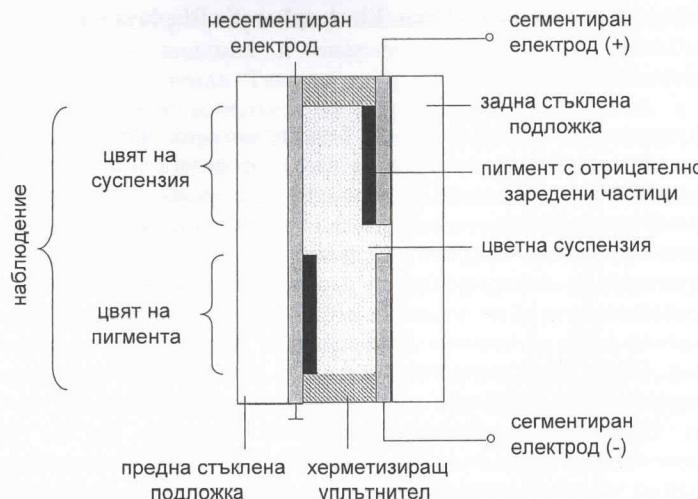
Електрофорезните дисплеи са безизлъчвателни дисплеи, при които принципът на действие се основава на електрофорезата. Това е пренасяне на заредени пигментни частици в колоидна суспензия под действието на електрическо поле. Дисплейте, използващи това явление се прилагат основно за изобразяване на буквено-цифрова информация.

Характерни за електрофорезните дисплеи са големият контраст, големият ъгъл на наблюдение и не на последно място добрият естетически вид, тъй като при определен избор на пигмент и оцветител се получава голямо разнообразие от цветове. Освен това пигментът остава до електрода след премахване на напрежението, тоест приборът притежава памет. За изготвяне на EPD се използват евтини, общодостъпни материали и могат да се формират електрофорезни структури на голяма площ. Те са конкурентноспособни, където е необходима плоскокоралелност на изображението за възпроизвеждане на текст и графична информация със сравнително висока разрешаваща способност, при различни степени на околнна осветеност. Тъй като използваните суспензии имат значително специфично съпротивление, то токовете са много малки (около $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), което води до ниски стойности на консумираната мощност. Недостатъците на този тип дисплей са сравнително голямото работно напрежение – около и над 25 V – и ниското бързодействие от няколко десетки милисекунди. Изследователски групи работят за отстраняване на проблема с неефикасния начин за пространствено стабилизиране на пигментните частици.

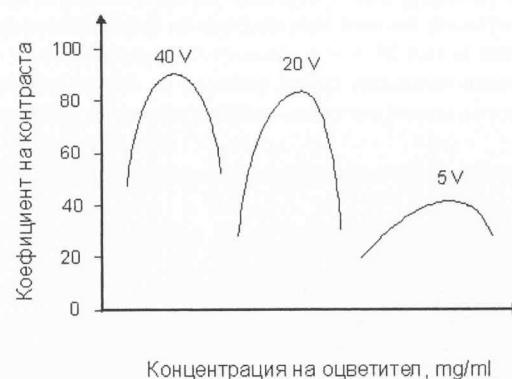
7.2 Принцип на действие и структура на електрофорезен дисплей

На фиг. 7.1 е показана структура на електрофорезен елемент, в който частиците са заредени отрицателно [25].

Изобразяването на информацията може да се осъществи само когато единият електрод (най-често задният) е сегментиран чрез фотолитография. Ако единият от сегментите е свързан с източник на постоянно напрежение с положителна полярност, то върху него се натрупва пространствен заряд, тъй като пигментът се състои от отрицателно заредени частици. Ако другият сегмент е свързан към отрицателния полюс на източника, то пигментите ще се преместят към противоположната страна на элемента (предния несегментиран електрод). В тази област от елемента, където пигментът запълва участъка пред близкия спрямо наблюдателя електрод, той вижда цвета на пигmenta. В тази област, в която пигментът се натрупва до задния сегментиран електрод, ще се вижда само цветът на суспензията.



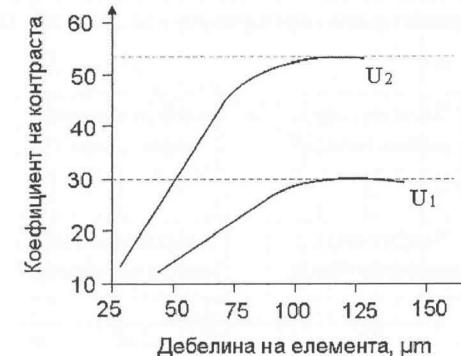
Фиг. 7.1 Структура на електрофорезен елемент.



Фиг. 7.2 Зависимост на контраста от концентрацията на оцветителя на електрофорезен прибор при различни напрежения.

Контрастът при електрофорезните дисплеи се определя от състава на супензиите, дебелината на елемента и приложеното напрежение. Супензиите е прозрачна течност с разпределен в нея пигмент, като за по-добър контраст към нея се добавя оцветител. Без него контраст няма да има. Когато в супензиите се добави оцветител, пигментът, който е до задния електрод, става незабележим и контрастът се увеличава. На фиг. 7.2 е показана зависимостта на контраста от концентрацията на оцветителя на електрофорезен прибор при

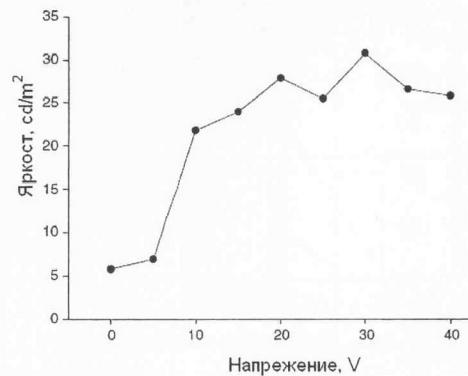
различни напрежения. При определено напрежение за дадена концентрация на оцветителя контрастът достига максимум, след което започва да намалява.

Фиг. 7.3 Зависимост на коефициента на контраст от дебелината на електрофорезната структура за различни стойности на приложеното напрежение, като $U_1 < U_2$.

Фиг. 7.4 Зависимост на коефициента на контраст от приложеното напрежение .

Вторият параметър, определящ контраста, е дебелината на елемента. Зависимостта на коефициента на контраст от дебелината на електрофорезната структура за различни стойности на приложеното напрежение е показана на фиг. 7.3. От нея се вижда, че за дадено приложено електрическо поле с увеличаване на дебелината на елемента контрастът отначало се увеличава линейно, след което се достига насищане. Тогава цялата светлина, влизаша в елемента и разсейвана от пигmenta при задния електрод, се погъща от слоя оцветена супензия. Чрез намаляване на концентрацията на оцветителя обаче и

по-нататъшно увеличаване на дебелината на елемента може да се получи голям контраст, тъй като се повишава яркостта на пигmenta до предния електрод.



Фиг. 7.5 Зависимост на яркостта от приложеното напрежение за електрофорезен дисплей с пигментни частици титанов диоксид [26].

7.3 Технологичен ред на изготвяне на EPD

За изготвянето на електрофорезните дисплеи се използват стандартни технологични процеси. Технологичният ред за изготвяне е показан на фиг. 7. 6. Електрофорезният елемент се състои от слой колоидна супензия с пигментни частици в нея. Тя е с дебелина около 50 μm и се намира между повърхностите на прозрачни електроди, нанесени върху две стъклени пластини. Предната стъклена пластина, откъдето гледа наблюдателят, е изцяло покрита с прозрачен проводящ материал (ITO), а върху задната чрез фотолитография са оформени сегментирани изобразявани символи (цифри или букви). В ъглите на задната пластина се правят отверстия, служещи за напълване на прибора със супензия. За да се получи цветен дисплей, не е препоръчително изграждането на субпиксели, тъй като тук разрешаващата способност би намаляла значително. Затова се нанасят три допълнителни слоя, изпълняващи ролята на филтри, които трябва да имат подходяща дебелина и прозрачност за видимата светлина, така че да не се влошава яркостта и четливостта на изображението. Стъклените пластини се монтират на разстояние около 50 μm една от друга. За периферната херметизация се използват уплътнители и епоксидна смола. Изискванията към херметизиращите уплътнители в електрофорезните елементи са висока устойчивост към разтворителите, влизащи в състава на супензиите, химическа инертност, добра електрическа изолация и ниска влагопроницаемост от околната среда. Напоследък усилено се изследват полимерни материали, използвани за херметизация, при които тънък слой от полимера осигурява едновременно както точно взаимно разположение и паралелност на двете стъклени пластини, така и отлична механична здравина и херметичност.

Полимерът се изрязва, като прозоречна рамка с размери, така че да обхваща пълтно периметъра на елемента. Самата херметизация се извършва чрез налягане при умерено нагряване в течение на няколко минути. Най-накрая става пълненето на дисплея със супензия през отверстието.



Фиг. 7.6 Технологичен ред за изготвяне на електрофорезен дисплей.

7.4 Технологични особености при получаването на отделните слоеве за EPD

Супензиите е неводна и цветна, като цветът ѝ е контрастен на този на пигментните частици. Пигментните частици са с еднополярен електрически заряд и наноразмерна големина. Съставът на супензиите определя както оптичните свойства, така и дълготрайността на дисплея. Тя се избира с добри диелектрични свойства за намаляване на паразитните токове, които водят до възникване на нежелани електрохимични реакции. Широко разпространена е супензиите на основата на метиленхлорид или циклохексан.

Пигментите трябва да са гравитационно устойчиви, тоест не трябва да се утаяват в супензиите, нито да изплуват на повърхността на течността. Освен това трябва да имат колоидна стабилност, тоест да не се слепват помежду си и да са химически съвместими със съставните части на супензиите. Най-често пигментните частици са титанов диоксид с размер 21 nm в диаметър, третирани с ултразвук за допълнително намаляване на размера им.

В същото време при избор на суспензия трябва да се съобрази, че е нужно да има голяма електрофорезна подвижност μ .

$$\mu = \frac{\epsilon \cdot \zeta}{6\pi\eta}, \quad (7.1)$$

където ϵ е диелектрична проницаемост на материала, ζ е нулев потенциал, а η е вискозитет. Изискванията към материала за суспензиите е отношението ζ/η да е с голяма стойност, за да бъде голяма подвижността на частиците, респективно да е голямо бързодействието на устройството. Времето t , необходимо за преразпределение на пигментните частици след смяна на полярността на приложеното напрежение, се определя от зависимостта

$$t = \frac{6\pi\eta d^2}{\epsilon\zeta E}, \quad (7.2)$$

където d е дебелината на елемента, а E е напрегнатостта на електрическото поле.

Пигментите и суспензиите трябва да са с ниска токсичност, химическа инертност и да са устойчиви при работа в широк температурен интервал. Те могат да бъдат както органични, така и неорганични. Общите изисквания, които се поставят при избора им, са: подходящи оптични характеристики, свързани с разсейваща способност, цвят и непрозрачност; неразтворимост в течности; незначително размекване; способност за легко и стабилно зареждане; химическа стабилност и специфично тегло, което трябва да се съгласува със съответната течна суспензия.

В електрофорезните суспензии се използват стабилизиращи агенти. Взаимодействието им с повърхността на пигментите е много сложно и все още остава не съвсем изяснено. Обикновено ефективните стабилизиращи материали за даден пигмент се определят емпирично, при което изборът е основан на химичната структура и предполагаемото химично взаимодействие между повърхността на пигmenta и стабилизатора. Получаването на гравитационна стабилност се състои в осигуряване на равенство на специфичното тегло на пигmenta и на течната суспензия. Това се постига, като суспензиите съставена от две течности, едната от които притежава сравнително високо, а другата сравнително ниско специфично тегло. Тези две течности се смесват, така че резултантното специфично тегло да бъде такова, каквото имат и самите частици. Алтернативен механизъм за постигане на колоидна стабилност е така нареченото пространствено отблъскване. При него произходът на потенциалната енергия на отблъскване е от взаимното проникване или свиването на полимерните вериги. Следователно възниква тогава, когато разстоянието между две частици се приближава към удвоената дължина на полимерната верига. Може да се съчетаят пространственият и електростатичният механизъм, за постигане на максимална колоидна стабилност.

Срокът на експлоатация на електрофорезния прибор е свързан с нееднородността на разпределение на пигmenta до прозрачния електрод. Най-важните фактори, водещи до отказ, са агломерация (формиране на кълстери), преразпределение на пигmenta спрямо електрода и електрохимични ефекти, като обезцветяване на суспензиите. Формирането на кълстери е свързано с хидродинамичната нестабилност на суспензиите. Този ефект може да се намали ако се намали нежеланият йонен ток в суспензиите. Преразпределението на пигmenta отначало изглежда като неголяма област от няколко милиметра с друг цвят поради локалното изменение на дебелината на слоя пигment. Ако елементът продължава да работи, то изменението на цвета става по-явно. Температурната зависимост на вискозитета на суспензиите също оказва влияние, както върху времето на живот, така и върху времето за отговор.

7.5 Управление на електрофорезните дисплеи

За осъществяване на електрическата адресация всеки сегмент от електрофорезния дисплей трябва да има собствен извод за управляващ сигнал. Електрофорезният механизъм за получаване на оптически отговор не изиска наличие на прагови напрежения. За поддържане на пигmenta при даден електрод не е необходимо непрекъснато да се подава напрежение, тоест пигментът запазва положението си при електрода след премахване на напрежението и обезпечава наличието на памет у дисплея. Продължителността на поддържане на изображението може да достигне няколко хиляди часа, като това силно зависи от електропроводимостта и състава на суспензиите, от конструкцията на прибора и от импеданса на електронната схема за управление.

Управляващата електроника за електрофорезните дисплеи се разделя на два основни класа. Най-разпространеният подход е управление на пасивна адресираща система, където предният и задният електрод се припокриват и в междината между припокриващата се област настъпват промени в суспензиите при подаване на напрежение. Отделните пиксели се формират от припокриващи се области на електроли. Всеки пиксел поотделно е свързан към изводите на микроконтролер, който подава напрежение на всеки извод поотделно, тоест адресирането е индивидуално за всяка линия [27]. Това обаче е приложимо за сегментни индикаторни дисплеи, като информационните табла, където броят на адресираните шини е малък и там, където изображението е статично. За всички останали електрофорезни дисплеи се използва активна матрица с тънкослойни транзистори, позволяваща поредово адресиране, което позволява контролирамо включване на отделни пиксели при кратко време за опресняване.

7.6 Съвременно състояние на EPD технологията

Най-същественото приложение на електрофорезните дисплеи се изразява в така нареченото „електронно мастило“, което намира приложение в

електронните книги и бележници с размери джобен формат, чието тегло е не повече от 200 грама. Основен разработчик на електронна хартия в световен мащаб е американската компания E Ink. Друга компания, която инвестира в тази технология, е Epson. Тя представя на международно изложение през 2008 г. електронна хартия, която може да възпроизвежда изображение със свръхвисока точност. Резолюцията на лист с формат A4 е 3104x4128 пиксела или 12 мегапиксела, като новият тип електронна хартия комбинира електрофорезното електронно мастило на E Ink и поликристален Si-TFT дисплей на Seiko. През 2008 г. Samsung представя разработка на 14-инчов електрофорезен дисплей с електроди от въглеродни нанотръбички. Те провеждат електричество по-добре от медта, имат здравина, превъзхождаща тази на стоманата, погълват топлина по-ефективно от диаманта и имат по-висока подвижност на токоносителите от тази при поликристалния силиций. Телефонната индустрия също решава да използва тази технология и Hitachi започва внедряване на електрофорезните дисплеи за мобилни телефони. По този начин дисплеят пести живот на батерията, тъй като се консумира енергия само при промяна на показанието върху экрана. Изписаното на екрана ще продължи да се показва дори ако батерията се изведи. Така основната област на приложение на електрофорезните дисплеи се очертават информационните технологии.

Глава 8 Светодиодни дисплеи (Light Emitting Displays – LED)

8.1 Въведение

Принципът на действие на светодиодните дисплеи (LED) се основава на инжекцията на електрони и дупки в полупроводников кристал, където те рекомбинират и се генерираят фотони. Дължината на излъчената вълна зависи от забранената зона на полупроводниковия материал, от начина на получаване на основния (излъчвателния) полупроводников слой и конструкцията на излъчващия панел.

През 1960 г. е реализиран светодиод, излъчващ червена светлина чрез използване на слой GaAsP върху подложка от GaAs. Един от основните проблеми в тази система е несъответствието в размерите на кристалните решетки на GaAsP и на GaAs, което води до дислокации (вид дефекти) в кристалната решетка на излъчвателния материал и засилва неизлъчвателната рекомбинация. Чрез вграждане на примеси в кристалната решетка, като например Zn:O в GaAsP, които формират допълнителни примесни нива в забранената зона на полупроводника, през 1970 г. е постигнато излъчване в оранжево-жълтия обхват на видимия спектър. Друг начин за управление на излъчвателните свойства е изграждането на хетероструктури с кристални решетки с близки параметри, което води до повишаване на ефективността поради по-малкото количество дефекти. През 1990 г. се разработва четворното съединение InGaAsP, при което съвпадение на решетките се постига чрез промяна на съотношението Al/Ga. GaN, InGaN и AlGaN са системи от материали, които покриват по-късовълновия обхват от видимия спектър – от ултравиолетовото, синьото до зеленото. Основните проблеми тук са липсата на материал с подходяща решетка за подложка и трудното легиране за получаване на р-тип проводимост.

Едно от основните изисквания за постигане на висока ефективност на LED е инжекцията на токоносителите през преходите между отделните слоеве да става без контактна бариера, тоест да е с ниски омични загуби. Високото съпротивление на полупроводника би довело до по-голям пад на напрежението и по-ниска ефективност. За формиране на ефективен инжектиращ, а не блокиращ контакт е нужно да се избегне образуването на Шотки бариера. Затова в основата на този тип дисплеи е залегната р-п-диодната структура, която има ниско съпротивление в отпущено състояние. Другото изискване за постигане на висока ефективност е генерираните фотони да бъдат изведени от структурата към околното пространство и наблюдателя, без да претърпяват абсорбция или разсейване от дефектите или преходите при разпространението си през отделните слоеве. Когато фотоните напускат полупроводниковия материал и се опитат да преминат през епоксидния герметизиращ слой, може да настъпи дори 100% вътрешно отражение заради разликата в коефициентите на пречупване на материалите n ($n \approx 3,5$ за полупроводниковия и $n \approx 1,5$ за епоксидния слой). Тези проблеми частично могат да бъдат решени чрез замяна на отразяващите метални електроди с прозрачни от индиево-калаен оксид (ITO)

и използване на прозрачна подложка, например от GaP за намаляване на поглъщането от подложката.

LED индикаторите намират приложение не само в дисплейната индустрия за изграждането на огромни видеостени с размери няколко стотин инча и за подсветяващи панели за LCD, но и за светофарни уредби и други светлинни сигнализации. Тенденцията е също така флуоресцентните лампи със студен катод, които съдържат живак, да бъдат заменени от LED светлинни източници. Предимствата на LED технологията са дълъг живот, стабилни характеристики по време на работа, широка цветова гама и ниско работно напрежение (около и под 5 V).

За LED има два важни показателя за качество. Първият е квантовият добив, който представлява отношение на количеството генериирани фотони към електроните, преминаващи през диода, тоест ефективността на преобразуване на прибора, независимо от зрителната реакция на окото. Вътрешната квантова ефективност η_{int} се оценява на р-п-прехода, а външната квантова ефективност η_{ext} - извън диода. η_{ext} е винаги по-малка от η_{int} поради оптическите загуби при извеждането от полупроводника. Характерните стойности за η_{ext} във видимия диапазон при стайна температура са между 0,1 и 7 %, докато при оптимални условия η_{int} може да бъде над 50 %.

Вторият показател за качеството на LED е яркостта. Тя е мярка за еmitираното от повърхността на диода излъчване. Яркостта (B) във фут.ламберти е пропорционална на външния квантов добив η_{ext} и чувствителността на окото.

$$B = 1150 \left(\frac{\eta_{ext} \cdot L \cdot J \cdot A_j}{\lambda \cdot A_s} \right) \quad (8.1)$$

λ – дължина на излъчената светлина, μm ;

L – светлинна чувствителност на окото, имаща максимум при $\lambda=555 \text{ nm}$;

J – плътност на тока през прехода, A/cm^2 ;

A_j и A_s – площ на р-п-прехода и наблюдаваната излъчваща повърхност;

$A_j/A_s = 1$ при най-прост случай на плосък безкорпусен LED, но при сферична форма на диода или с леща в корпуса това отношение е много по-малко от единица.

8.2 Материалы за изграждане на LED и технологични особености

Структурите с р-п-преходи се изготвят върху монокристални подложки чрез епитаксия и по-точно двете ѝ разновидности – течна и газова [28]. При газовата епитаксия слоят може да израства от органометален източник, като тогава епитаксиалното отлагане се нарича металоорганично химическо отлагане от газова фаза (metalorganic chemical vapor deposition – MOCVD). По време на епитаксиалния процес се определят концентрацията и разпределението на легиращите примеси, както и концентрацията и видът на дефектите. Корпусирането също е критичен момент, тъй като то осигурява не само

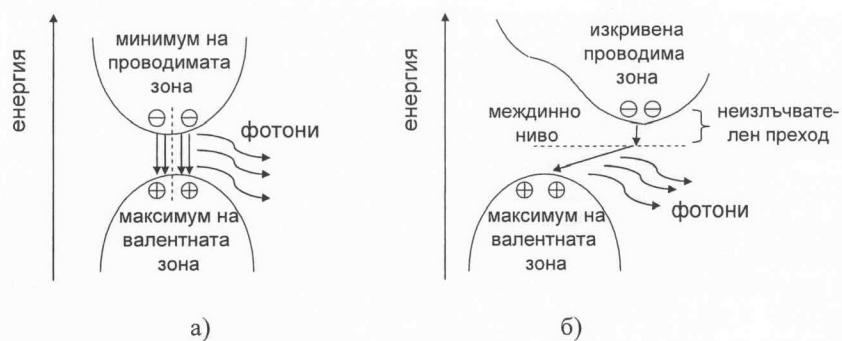
защитаване на LED от въздействието на околната среда и от механично повреждане, а осигурява и ефективното извеждане на светлинната емисия, както и топлинното разсейване за случаите на мощн прибори.

Полупроводниковият материал, който определя цвета на емисията и ефективността на излъчване, може да бъде двойно, тройно или дори четворно съединение. Полупроводниците от IV група, като германий, силиций и въглерод, са с индиректен преход, което ги прави неподходящи за LED приложения. Полупроводниковите съединения на основата на арсен и фосфор (GaP, GaAsP, AlGaAs, GaAs, InGaAsP) излъчват в червена, оранжева, жълта и дори зелена област на електромагнитния спектър. Разликата между константите на кристалните решетки на подложката и епитаксиалния слой трябва да се поддържа възможно най-малка (a/a_0 не трябва да надвиши 0,1%). В противен случай остатъчното механично напрежение води до деформиране на епитаксиалния слой, тъй като той е по-тънък от подложката.

Полупроводниците могат да се класифицират според прехода на токоносителите между валентна и проводима зона на такива с директен и с индиректен преход. За илюстриране на процесите при двата типа преходи е използвана фиг. 8.1. Полупроводник с директен преход означава, че минимумът на проводимата зона съвпада с максимума на валентната зона, тоест вълновите числа на двете зони да са еднакви. Излъчвателна рекомбинация се осъществява само между зони с директен преход, както е показано на зонната диаграма от фиг. 8.1a, където рекомбинацията протича по оста, свързваща зоните. При някои материали проводимата зона е изкривена и се казва, че преходът е непряк. Тогава оптичният преход е неизлъчвателен, тъй като не е изпълнено условието вълновите числа на двете зони да са равни. При такъв непряк преход, показан на фиг. 8.1b, електроните се натрупват в най-нискоенергетичната част на проводимата зона или в нейния минимум, който не съвпада с максимума на валентната зона. При него не може да се генерира веднага фотон, а се осъществява неизлъчвателен преход до междинно ниво, намиращо се в забранената зона. Впоследствие поради въздействието на фононите протича втори преход, който вече е излъчвателен. За да се въведе това междинно ниво в забранената зона, в полупроводника се внасят примеси. Тогава излъчваният цвят се определя от забранената зона, формирана между валентната зона и междинното ниво. Цветът може да се променя в зависимост от позицията на това междинно ниво, тоест в зависимост от типа на примесните атоми.

Съгласно тази класификация решетката на съединението (InGa)_{0.5}Al_{0.5}P съвпада с тази на GaAs, при което оптичният преход е директен, а генерираната светлинна емисия е червена. Това е примерна система материали, подходяща за изготвяне на LED, излъчващи в дълговълновата част на видимия спектър. Подложката от GaAs, която има силно поглъщане, може да се замени от епитаксиално получена прозрачна подложка от GaP за повишаване на квантовата ефективност. За излъчване в областта на синия цвят се използва съединението InGaN, като с увеличаване на концентрацията на индий се преминава от синя към зелена светлинна емисия. Въпреки високата квантова

ефективност на зеления LED с InGaN, вграждането на индий води до формиране на индиеви кълстери, които изпълняват ролята на дефекти, влошаващи излъчвателната рекомбинация. Предимството на неорганичните полупроводникови LED е, че може да се покрие целият видим спектър, включително и да се получи бяла светлина. Когато се формират субпикселят на дисплея чрез вграждане на червен, зелен и син LED, след определено време на експлоатация се получава отместване на спектъра поради различното време на живот на различните LED структури.



Фиг. 8.1 Зонни диаграмми на полупроводници с а) директен и б) индиректен оптичен преход.

Системите AlGaAs и AlGaInP се използват за изготвяне на червени и жълти светоизлъчващи структури. GaAs има решетка, съвпадаща с тази на AlAs, което означава, че съединението AlGaAs може да бъде епитаксиално получено върху подложка от GaAs с ниска концентрация на дефекти. Забранената зона на материала е 1,985 eV, което съответства на дължина на вълната 624 nm. Това ограничава използването на материала само за червената и инфрачервената област. За получаване на емисия в по-късовълновия обхват съединенията от типа III-P се заменят с такива от типа III-As. За съвместяване на кристалните решетки подложките от GaAs се заменят с такива от съединение $(Al_xGa_{1-x})_0.5In_0.5P$, като изменението на "x" води до промяна на забранената зона на материала и на ефективността. Тези съединения спадат към групата на полупроводниците с индиректен преход, което не позволява стойността на "x" да се увеличи над 0,65, (което отговаря на 560 nm - жълта емисия), тъй като тогава ефективността рязко спада поради натрупване на електрони в проводящата зона (фиг. 8.1 б).

За получаване на зелена, синя и ултравиолетова емисия се използват съединения на основата на GaN. В съединенията от трета и пета група (III-V) материалите от група V имат по-високо налягане на парите, отколкото материалите от група III при същата температура, което създава трудности при получаването на подложки от съединенията III-V. За разлика от арсена и

фосфора, които съществуват в твърда форма при стайна температура и налягане 1 атмосфера, азотът N е в газообразна форма при тези условия, което допълнително усложнява получаването на подложка на нитридна основа. Поради липсата на материал за подложка, чиято константа на решетката да съвпада с тази на съединенията от трета група (нитриди), се използва Al_2O_3 въпреки, че и тогава несъвместимостта с решетката на GaN е 16%. Чрез вграждане на буферен слой от AlN, отложен при ниска температура, може да се получи висококачествен нитриден епитаксиален слой, тъй като се формират зародишни центрове за епитаксиален растеж със същата кристалографска ориентация, което намалява плътността на дефектите. Чрез използване на $In_xGa_{1-x}N$ и вариране на стойността на «x» в границите от 0,15 до 0,45 може да се постигне емисия от ултравиолетовата до зелената част на спектъра. В нитридните LED индиевите атоми формират кълстери, което води до нехомогенност в състава и слаба нееднородност в емисията.

Едно от предимствата на LED технологията е възможността да се получи бяла светлина чрез смесване на трите основни цвята (RGB) с ефективност до 400 lm/W. Заради нелинейната зависимост на яркостта на излъчената светлина от тока за различните LED цветът на бялата емисия не е стабилен при различните степени на инжекция. Освен това при увеличаване на температурата интензитетът на LED намалява и възниква отместване на спектъра в посока към червения цвят, което води до смущения (отместване) в спектъра и на бялата светлина. След дълга експлоатация поради различното време на живот на различните LED също се наблюдава промяна в цвета. За по-голяма надеждност и стабилност напоследък се предпочита замяната на трите светоизлъчващи структури с една, излъчваща в ултравиолетовата област и възбуджаща луминофор. Този подход е по-евтин, по-прост и позволява да се постигнат по-малки размери на пиксела. Времето на живот на луминофорите е голямо, поради което стабилността на бялата емисия също е много голяма. Единственият недостатък в сравнение с метода на смесване на трите цвята е по-ниската ефективност (средно 20 %) заради загуба на енергия на фотоните, които се излъчват от LED и погльщат от луминофора [29]. Един от най-разпространените луминофори, използвани в LED технологията, е итриево-алуминиев гранат (yttrium aluminum garnet - YAG), легиран с цезиеви йони - $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$.

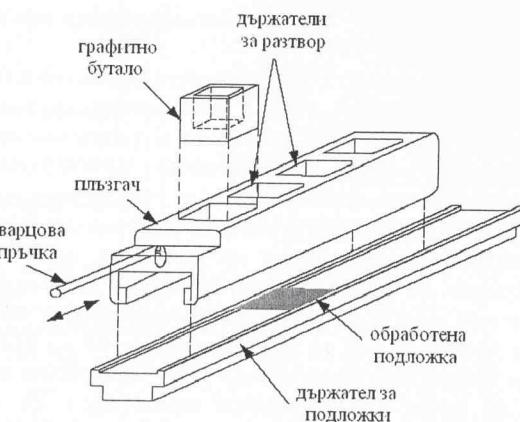
8.3 Технологични процеси за изграждане на отделните слоеве в LED

Изготвянето на LED започва с епитаксиалното израстване на подложка с кристална структура. Има няколко разновидности на епитаксията, които се използват – епитаксия от течна фаза (liquid phase epitaxy - LPE), епитаксия от газова фаза (vapor phase epitaxy - VPE) и металорганично химическо отлагане от газова фаза (MOCVD). Първата разновидност е най-простата и икономична техника за получаване на дебел епитаксиален слой, като дебелината се определя от времето, през което са в контакт разтворът на III-V съединението и

подложката. При епитаксията от газова фаза има възможност за по-голяма гъвкавост и прецизност при настройката на състава на съединенията. MOCVD е най-популярният в научните изследвания метод за получаване на сложни съединения с разнообразен състав и различни профили след легиране. След като е формиран епитаксиалният слой, следващата стъпка е получаване на PN преход, а след него се избират подходящи електроди за изготвяне на омов контакт. Електродите трябва да бъдат много внимателно подбрани и проектирани, тъй като металите, формиращи ниско контактно съпротивление с полупроводника, имат висока отражателна способност и може да блокират извеждането на светлината. Коефициентът на пречупване на епоксидния слой, използван при херметизацията, е колкото се може по-голям, за увеличаване на критичния ъгъл на границата полупроводник/епоксиден слой и повишаване на ефективността на екстракция на светлината. Корпусирането е важен момент в технологичния ред за изготвяне на LED, тъй като корпусът изпълнява ролята не само на механична защита, но и осигурява ефективно извеждане на светлината и добро топлинно разсейване, което е особено важно при мощни LED. За масово производство на LED се използва течнофазовата епитаксия не само заради простотата на оборудването и на процеса, но и заради високата скорост на израстване на епитаксиалния слой ($\sim 2 \mu\text{m}/\text{min}$).

Принципът на течната епитаксия се състои в отлагане на материал от охлаждан разтвор върху подложка. Разтворът и подложката в апаратурата за израстване са разделени и разтворът се насища с материал дотогава, докато не се достигне желаната температура на растеж. След това повърхността на подложката контактува с разтвора и се охлажда с необходимата за израстване скорост. Ако подложката е монокристална и решетъчната константа на отлагания материал е еднаква или близка до тази на подложката, полученият слой е епитаксиален.

Принципът на получаване на слой чрез течна епитаксия за нуждите на LED е илюстриран на фиг. 8.2 [30]. Различни разтвори, съдържащи Ga, As, Al и др., се поставят в различни държатели. Подложка от GaAs се поставя на друг държател, който може да контактува с различните стопилки за получаване на съединения с различен състав и профил на легиране чрез придвижване на държателя през различните разтвори с кварцова пръчка. Когато източникът със стопилката влезе в контакт с подложката, температурата намалява и атомите от стопилката в течна фаза се подреждат върху подложката, която е в твърдо състояние. Температурата на епитаксиално израстване е между 700 и 900 °C и времето за преминаване на подложката през отделните стопилки трябва да е кратко, за да се избегнат окислителни реакции, индуциращи дефекти в слоя. Чрез тази техника не могат да се получат слоеве от съединения III–N, тъй като нитридите са в газова фаза, а не течна, но успешно се получават червени LED от системата AlGaAs.



Фиг. 8.2 Инсталация за получаване на слоеве чрез течна епитаксия.

При газовата епитаксия като източници се използват газове вместо стопилки. Така по-лесно се контролира дебелината на слоя и профилът на легиране и по-лесно се получават многослойни структури. Растежът в този случай протича при по-ниски температури от около 600 °C, в сравнение с течната епитаксия. Принципът на формиране на слоя е следният: хлоридите на материалите от V група реагират с H₂, за да се получат молекули на елемент от V група и да се отдели HCl като газ.

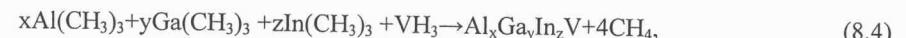


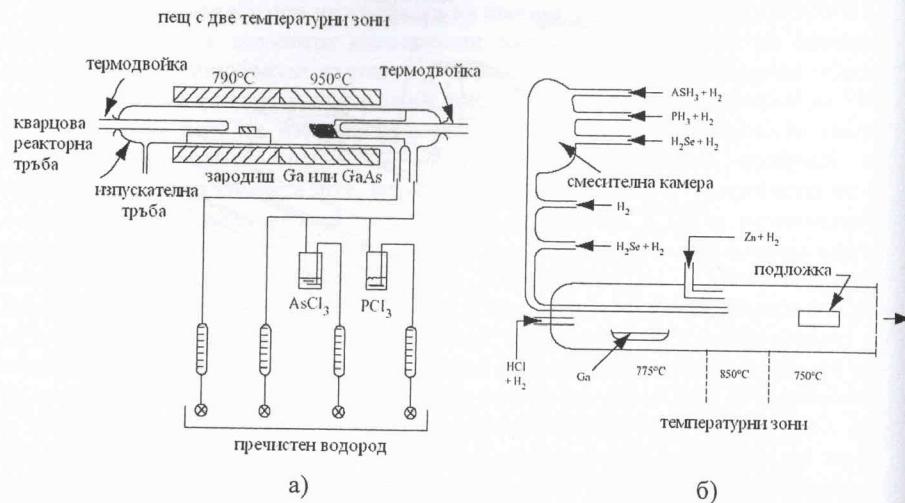
където V означава материал от пета група (As, P, N). Полученият HCl реагира с бинарно (двойно) съединение, за да се получи хлорид на материал от трета група III (каквито са In и Ga например).



Реакциите са обратими, затова при високи температури протича дясната половина от реакцията, а при понижаване на температурата реакцията протича отдясно наляво, при което се формира епитаксиален слой върху подложката. На фиг. 8.3 е показана инсталация за газова епитаксия [31].

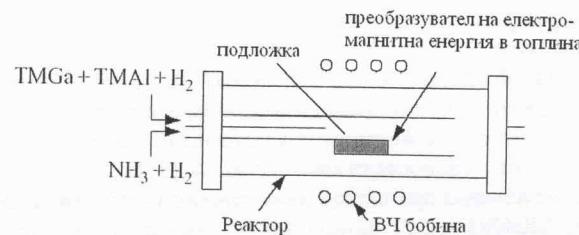
На фиг. 8.4 е показан принципът на металоорганично химическо нанасяне от газова фаза (MOCVD) [32]. Използват се носещи газове H₂ и N₂, които преминават през материал от III група и получените източници във вид на пари се прехвърлят в камерата за израстване на слоя. Типични източници на елементи от III група са триметилалуминий - Al(CH₃)₃ (TMAI); триметилгалий - Ga(CH₃)₃ (TMGa) и триметилиндий In(CH₃)₃. Реакцията, която протича, е необратима и е от типа





Фиг. 8.3 Схематично представяне на а) хлоридна и б) хидридна инсталация за газова епитаксия.

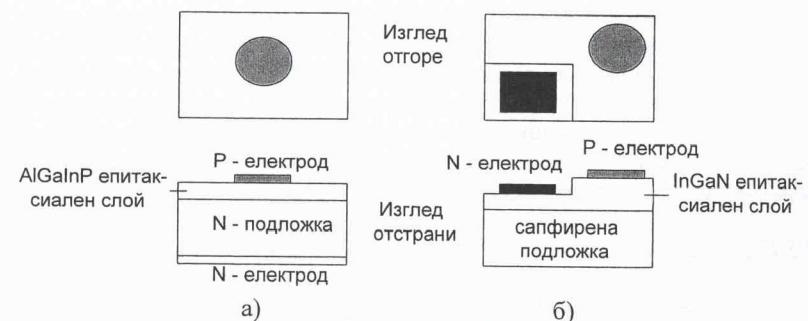
Предимството на тази техника на отлагане е възможността да се получават резки преходи и тънки епитаксиални слоеве, както и голяма гъвкавост при получаване на сложни съединения с разнообразен състав. Недостатъкът е необходимостта от по-прецизен контрол на скоростта на израстване в сравнение с другите два метода за епитаксиално израстване, за да се избегне формирането на дефекти. Това води до намаляване на скоростта на израстване до $\sim 5 \mu\text{m}/\text{час}$.



Фиг. 8.4 Схематично представяне на реактор за метало-органично химическо отлагане от газова фаза (MOCVD).

8.4 Особености при проектирането на LED

Фиг. 8.5 а) и б) показват типични LED структури, изградени съответно от полупроводникови съединения III-P и III-N. Генерираните фотони се изльзват от горната страна на структурата за III-P LED и от двете страни на структурата за III-N LED. Няколко са условията, които трябва да бъдат изпълнени при проектирането на електродите, за да се постигне висока ефективност. Първото изискване е да се формира омов контакт между електродите и р- или н-слоя, за да се осигури силна инжекция на токоносители. Обикновено се налага допълнителна термична обработка след отлагане на електродите, за да се постигне по-добра проводимост. Съпротивлението на р- или н-слоевете трябва да е възможно най-ниско и еднородно, за да протича токът през структурата равномерно през целия слой. Чрез внимателно проектиране на топологията и разположението на електродите токоносителите могат да се разпределят равномерно. Едновременно с това площта на електрода трябва да бъде сведена до възможния минимум, за да не възпрепятства екстракцията на светлината. Тъй като за нитридните LED се използва изолационна сапфирена подложка, то електродите са от едната страна на структурата (не във вид на "сандвичова" структура). За оформянето на втория електрод се извършва ецване, но тъй като нитридите са полупроводници с голяма твърдост, то е необходим силен ецващ разтвор. На една подложка едновременно се получават голям брой светозърнителни структури, затова следващата стъпка е подложката да се раздели на отделни по-малки части за следващата технологична операция – корпусиране.



Фиг. 8.5 Типични LED структури а) от III-P и б) от III-N полупроводници.

Теоретично контактът между метал и полупроводник е Шотки контакт, а не омов. Контактната бариера, формирана поради разликата между отделителната работа на метала и транспортната зона на полупроводника (валентна или проводима в зависимост дали се инжецират съответно дупки или електрони), ограничава инжекцията. За да се преодолее този недостатък, се

вграждат допълнителни буферни слоеве между електрода и полупроводника, които намаляват тази разлика между енергийните нива. Понякога се използват метални сплави за направата на електроди. За системите AlInGaP и AlGaAs се използват електроди от Au–Ge, Au–Zn и Au–Be, като концентрацията на Ge, Zn или Be варира от 1% до 15%. При LED на основа на нитридни съединения за намаляване на височината на Шотки бариерата се използва двуслоен катод Ti/Al за контакт с п-тип полупроводник или Ni/Au за контакт с р-тип полупроводник. Титанът взаимодейства с нитрида и се образува ултратънък проводящ буферен слой от TiN.

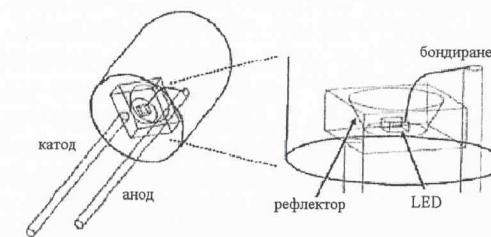
Голяма част от дупките, инжектирани от анода, рекомбинират с електроните под непрозрачния метален участък, което намалява ефективността на екстракция на светлината. Размерите на LED чипа са по-големи от дебелината на р-слоя, което води до неравномерно съотношение между дупките и електроните и също води до понижаване на ефективността. Една от възможностите да се преодолее този проблем е да се увеличи дебелината на р-слоя и да се увеличи латералният ток, но това увеличава и серийното съпротивление на структурата. Друго по-подходящо решение е да се структурира електродът под формата на гребен за подобряване на разпределението на тока. Необходимо е площта, заемана от непрозрачните електроди, да бъде минимална, за да не се възпрепятства излъчването на светлината в околното пространство. Тъй като при LED на основа на нитридни съединения се използва изолационна подложка, анодът и катодът са от една и съща страна на структурата, което води до допълнителна неравномерност в разпределението на токоносителите. Използват се прозрачни и полупрозрачни електроди от ITO, както и тънки метални слоеве от Ni/Au и Pt.

Ефективността на екстракция на LED се ограничава от вътрешните отражения на светлината от отделните планарни слоеве на структурата. Освен това при структури, изгответи от съединения III–P, част от фотоните се погълват от подложката от GaAs. Първият проблем може да се преодолее чрез изграждане на LED структура, която има непланарна форма. Вторият проблем частично може да се реши чрез израстване на прозрачен AlGaAs слой между луминесцентния слой и абсорбиращата GaAs подложка, след което чрез ездане да се отстрани основата от GaAs.

8.5 Корпусиране

Корпусирането на LED има за цел да осигури защита на структурата от механични въздействия и от влиянието на околната среда, да подобри оптичната екстракция на светлината, както и да осигури ефективно разсейване на топлината, особено при мощните LED. На фиг. 8.6 е показан корпусиран LED с размери няколкостотин микрона, монтиран на рефлектор с определена форма, който да пренасочва светлината към върха на структурата. За връзка между чипа и външните електроди (тези от корпуса) се използва бондираща жица. Слой от епоксидна смола запечатва корпуса, като слоят трябва да бъде с голям коефициент на пречупване (1,5–1,8) и с нисък коефициент на поглъщане,

за да се постигне голям коефициент на екстракция на светлината. За повишаване на квантовата ефективност е необходимо протичане на по-голям ток през структурата, което от своя страна води до загряване. Затова за мощните приложения при проектирането на корпуса трябва да се предвиди и термичното съпротивление. Често LED чипът се монтира на радиатор, който отвежда топлината от дъното на структурата (откъм подложката) и вместо епоксидна смола се използва термоконтактна паста на силиконова основа заради по-добра температурна стабилност.



Фиг. 8.6 Корпусиран LED.

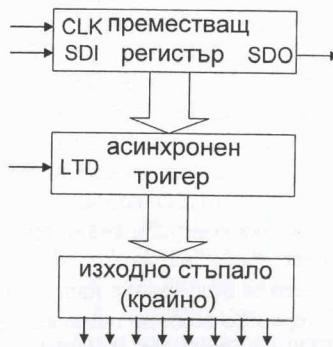
8.6 Приложения на LED

През 80-те години LED са намирали приложение в буквено-цифрови индикатори и прости точкови матрични дисплеи. Също така цветовете на емисията са били ограничени до червено и съседните на него поради липса на подходящи полупроводникови материали. В последните години поради развитието на технологиите за синтезиране на материали и нанасянето им като тънък слой чрез епитаксия се изготвят различни LED дисплеи с най-разнообразни приложения. Тъй като те осигуряват много добра видимост, почти независима от околната осветеност и тъгла на наблюдение LED, се използват за светофарни уредби, електронна сигнализация и дисплеи с огромна площ, каквито са видеостените. Друго важно приложение е употребата като подсветяващ панел в LCD; предимствата тук са липса на живак (за разлика от типичните люминесцентни лампи със студен катод), дълъг живот и голямо бързодействие. При изграждането на светофарни уредби LED заменят лампите с нажежаема жичка, които имат предимство като малка консумирана мощност и дълъг живот. Лампите с нажежаема жичка имат време на живот около 2–3 години и квантова ефективност около 14 lm/W, като за получаване например на червен цвят, е необходимо специално филтриране, което води до намаляване на ефективността наполовина. Един червен LED, получен от AlInGaP, има квантова ефективност 30 lm/W и време на живот около 10 години. Недостатъците при използването на LED за светофарни светлини са леко изменение в спектъра на излъчване в зависимост от околната температура и сложност на схемите за управление. За осигуряване на постоянен интензитет на

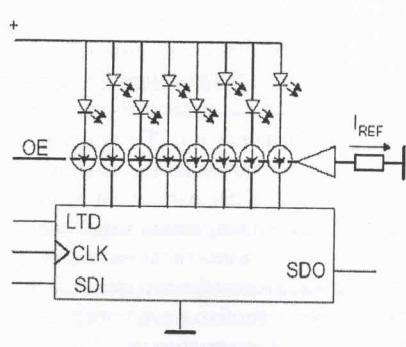
излъчване е необходимо да се осигури регулатор на напрежение, ограничаващ резистор или източник на постоянен ток в управляващата верига. Когато LED се използват в LCD дисплеите, основното предимство пред флуоресцентните лампи със студен катод (cold cathode fluorescent lamp – CCFL) е никото захранващо напрежение (до 5 V, за разлика от CCFL, които изискват няколкостотин волта). Това ги прави по-удобни за дисплеи на портативни устройства като лаптопи и мобилни телефони. Другото предимство е липсата на живак. Заради сравнително голямото бързодействие на LED много лесно се превключват пикселите от включено в изключено състояние или обратното. Също така при динамична картина не се получава замъгливане на изображението при преместване на обектите. Основните изисквания към подсветващите LED панели са тясна спектрална характеристика и равномерност на емисията по цялата площ на панела. За разлика от CCFL, червените, зелените и сините LED могат да се управляват независимо един от друг с отделни електрически вериги, което води до отпадане на цветовите филтри за всеки цвят в структурата на LCD. Това опростява технологията процес, намалява цената на дисплея и води до по-голяма квантова ефективност, тъй като филтърният слой погълща над една трета от светлинната емисия.

8.7 Управление на LED

Обикновено управлението на LED се осъществява чрез широчинно-импулсна модулация. Когато те са свързани последователно чрез управляващите вериги, могат да се постигнат повече степени на сивото и по-високи честоти на опресняване на пикселите [33]. Управляващите сигнали се подават от контролер по сериен канал, което води до намаляване на свързващите писти към изводите на всеки един LED поотделно. В най-общия случай принципът на управление, е като показаният на фиг. 8.7.



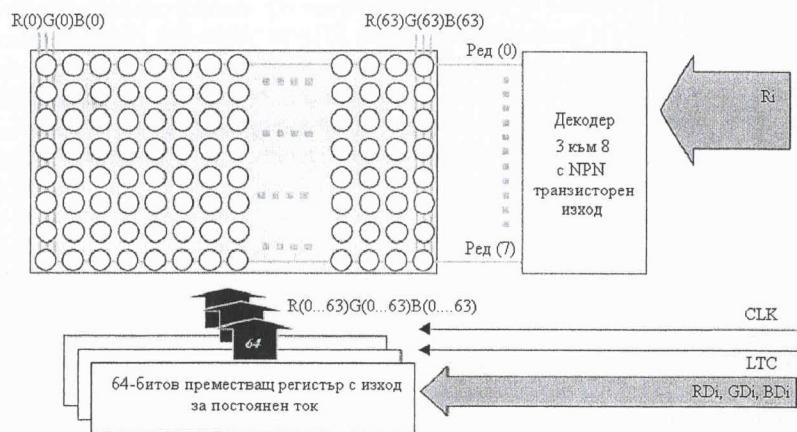
Фиг. 8.7 Блокова схема за управление на LED.



Фиг. 8.8. Схема за управление на LED с постоянно ток.

Този подход се използва както при управление на динамични, така и при статични изображения. Процесът на преместване на данните и постъпване на нови данни в преместващия регистър не трябва да е видим по отношение на изображението, затова управляващата система съдържа две нива памет. Първото е в самия преместващ регистър, който съдържа сериен вход за данни (serial data input – SDI), сериен изход за данни (serial data output – SDO) и вход за подаване на тактова честота CLK. Второто ниво памет е асинхронният тригер (latch), който задържа данните в зависимост от нивото на тактовата, управляваща за него шина LTD. Изходното стъпало, което е източник на постоянно ток, формира импулси с определен коефициент на запълване и ги разпределя към отделните редове или стълбове с LED, както е показано на фиг. 8.8. В изходното стъпало има регулатор на ток за поддържане на постоянно ниво на сигнала, като по този начин се предотвратяват флуктуации в интензитета. Един външен за изходното крайно стъпало резистор определя мощността на импулсите. Тактовата честота (CLK) се ограничава от технологичните възможности и към настоящия момент е около 2,5 MHz.

Много от LED дисплеите използват матрична точкова конфигурация 8x8. За управление на такава матрица може да се използва и мултиплексорна схема за управление, както е показано на фиг. 8.9 [34]. Трите субпикселни елемента са с общ катод, свързан към даден ред. Към всяка колона на LED постъпват три входни управляващи сигнала – за червен (R_{C_x}), зелен (G_{C_x}) и син цвят (B_{C_x}).



Фиг. 8.9. Управление на цветни LED дисплеи с матрична точкова конфигурация.

Сигналите се генерират от три 64-битови преместващи регистри с крайни стъпала за постоянно ток. За опростяване на схемата не са показвани задаващите резистори. Така се гарантира, че към всяка колона на LED се подават сигнали с

необходимите нива. Чрез използване на преместващ регистър се намалява броят на връзките между контролера и платката на дисплея, като се свеждат до 5 - трите шини за трите цвята и две за тактовите сигнали на регистъра. Така се опростява платката и не възникват смущения между съседните токови шини, особено когато управляваните пиксели са много на брой, както в дисплейте с голяма площ. Недостатъкът на тази схема за управление е по-сложният софтуер.

Глава 9 Дисплеи с полева емисия (FED-field emission display)

9.1. Въведение

Съществуват различни класове от продукти и системи, които използват плоски дисплеи, от това се определя и големият брой различни технологии за реализацията на плоските дисплеи. Освен това, за всяка технология съществуват различни модификации и оптимизации, разработени с цел подобряване на качеството и експлоатационните параметри на изготвения продукт. Най-общо плоските дисплеи се разделят на дисплеи за непосредствено наблюдение (излъчвателни и безизлъчвателни) и проекционни дисплеи. FED дисплейте спадат към плоските дисплеи със собствено излъчване на светлинна емисия и представляват отделен клас, въпреки, че в частност могат да бъдат отъждествени като последно поколение на катоднолъчевите дисплеи или пък като отделен вид електролуминесцентни дисплеи.

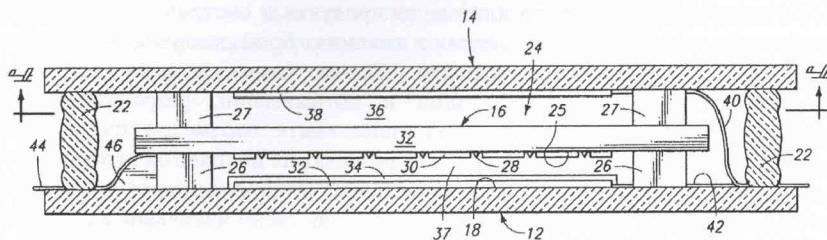
9.2. Технология за изготвяне и принцип на действие на дисплеи с полева емисия

На фиг. от 9.1 до 9.3 са показани напречни разрези на съставните компоненти на дисплей с полева емисия. Този вид дисплеи са съставени от лицев панел 12, заден панел 14 и катодна плоча 16, позиционирана между лицевия и задния панел. Лицевият панел е направен от устойчиво плоскопаралелено стъкло. От вътрешната страна на панела се нанася прозрачен проводящ слой, най-често от ITO, използван като анод и втори луминесцентен слой, чрез които се осигурява излъчената светлинна емисия. Задният панел е направен също от стъкло. Разстоянието между лицевия и задния панел се поддържа от т. нар. пространствени разделители 22, които служат и за упътнители. Лицевият и задният панел заедно с разделителите определят вакуумното пространство 24, в което е разположена катодната плоча.

Плочата на катода е монтирана върху лицевия панел на известно разстояние от луминофорния слой. Тази страна на катодната плоча, която е срещу луминофорния слой, се нарича излъчваща повърхност 25. Желаното разстояние между луминофорния слой и излъчващата страна на катодната плоча се постига чрез един или няколко разделител [35]. Тези разделители се формират от вътрешната страна на лицевия панел. Катодът е изграден от силиций. Катодният излъчвател на електрони се състои от множество микроелектроди (микроигли), формирани на повърхността 25 на силициевия слой. Всеки микроелектрод е малка излъчваща електронни игла 28 - катод, заобиколен от гейт структура. Гейт структурата 30 контролира електронната емисия на иглата чрез външни управляващи сигнали. Гейтът и електродите са формирани чрез тънкослойна технология на отлагане.

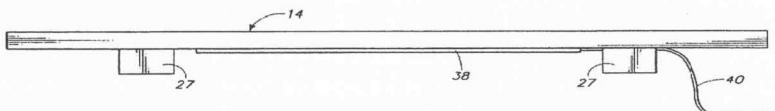
Електродите в матрицата на катода са насочени към луминесцентния слой. Катодолуминесцентната област е покрита с луминесцентен материал - луминофор 32. Слой от алюминий 34 се нанася върху луминофора. Катодолуминесцентната област е разположена срещу излъчващата матрица на катода.

Електродите, излъчващи електрони, и алуминиевият экран имат различни потенциали и отделителни работи.

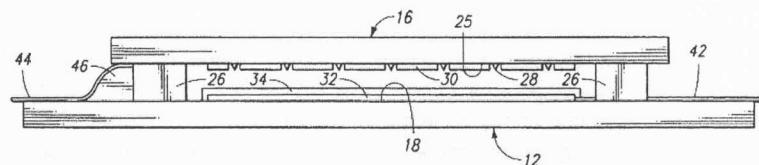


Фиг. 9.1 Напречен разрез на съставните компоненти на дисплей с полева емисия.

Задният панел е отделен от катода чрез периферния разделител. Един или няколко позициониращи разделители 27 са поставени между катода и задния панел. Позициониращите панели, разположени между луминисцентния слой и катода 26 и между задния панел и катода 27, позиционират правилно катодната плоча.



Фиг. 9.2 Напречен разрез на съставните компоненти на дисплей с полева емисия.



Фиг. 9.3 Напречен разрез на съставните компоненти на дисплей с полева емисия.

Стъпките за изработване на цялостния дисплей започват с формиране на лицевия панел и подложката за катода. От вътрешната страна на лицевия панел се поставят позициониращите разделители. Разделителите се правят по шаблон и се отпечатват върху вътрешната повърхност чрез многослойна технология. За изработката на тези разделители се използва стъклена фрита. Стъклена фрита представлява ситно смляно стъкло, което се залепва към вътрешната страна на лицевия панел при стайна температура. При по-висока температура стъклена фрита се втвърдява. В шаблона стъклена фрита може да бъде нанесена под-

формата на паста. Пастата се прави, като фритата се смеси с разтворител от боров терпентин. След като се нанесе пастата, лицевият панел се загрява до стапяне на фритата. По този начин се изработват стъклените разделители в желаната форма и дебелина, независимо кой метод е избран. Дебелината на разделителите се избира така, че да се осигури пространство между лицевия панел и катодната плоча.

Захранващите проводници 42, които управляват луминофорния экран, са свързани със задната страна на лицевия панел. Множество захранващи трасета или изводи са приложени към лицевия панел. Един от позициониращите разделители, разположен по-напред, се свързва със съответните проводници на катодната плоча. Захранващите проводници се поставят над позициониращите разделители при формирането им, преди да свържат катодната подложка с разделителите. Захранващите проводници могат да се формират по няколко начина чрез ситопечат, тънкослойни технологии и вакуумно изпарение.

След нанасяне на луминфора върху лицевия панел катодът се прикрепя за разделителите чрез подходящо лепило. Захранващите проводници, разположени над разделителите, заемат допълнителна част от активната повърхност на катода за формиране на захранващи пътечки за емитерните игли. Катодната плоча се прикрепя към лицевия панел, като се притискат двата компонента един към друг по време на загряването на лицевия панел.

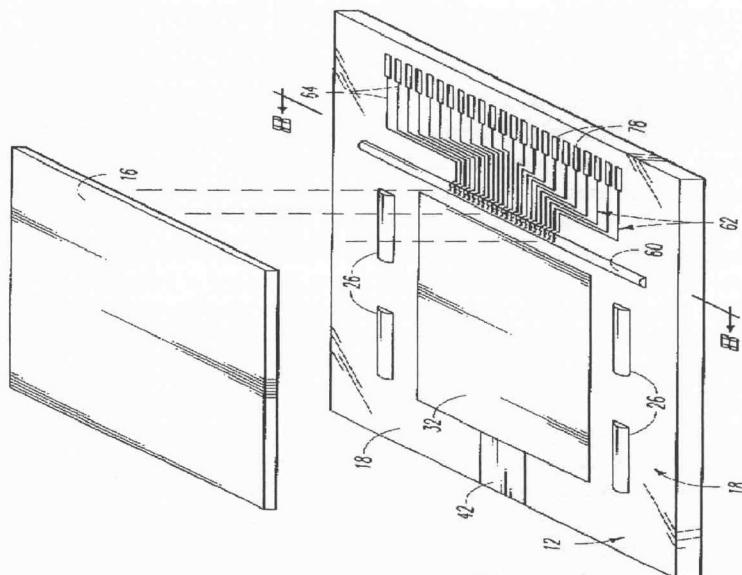
От вътрешната страна на задния панел се формират периферни разделителни по подобен начин на разделителите, формирани между катода и лицевия панел. Разделителите 26 и 27 могат да бъдат с различни размери и да бъдат на различни места върху двете площи, в зависимост от структурните изисквания на съответният дисплей.

Разделителите, които поддържат лицевия и задния панел, се прикрепят към вътрешната страна на задния панел чрез паста от стъклена фрита. Фритата, използвана за формирана на разделителите, трябва да се превръща в непрекъснат слой при висока температура и коефициентът й на разширение да бъде подходящ за стъклото на лицевия и задния панел. За прикрепяне на двете площи пътно към разделителите се използва налягане, което се подава при загряване на стъклото. Чрез приложеното налягане се създава вакуум в тези дисплеи. Гейтът се активира от топлината, излъчена от захранващите проводници след сглобяване на цялото съединение или чрез високочестотна енергия. Чрез високочестотния метод се създават локализирани зони с висока температура в материала с помощта на високочестотно електрическо поле. Термалният ефект на високочестотната енергия зависи от електрическите свойства на съединението. Чрез създаване на електрическо поле в диелектричния материал ионите бързо сменят полярността си многократно и по този начин се създава загрята област.

Загрятата фрита в разделителите не поврежда формираните връзки в края на лицевия панел. Между периферните разделителни и задната страна на катодната плоча няма захранващи връзки, защото целта на разделителите е да осигуряват разстояние между лицевия панел и задния панел на дисплея.

На фиг. от 9.4 до 9. 6 са показани специфични детайли относно техниката за формиране на метални и електрически конектори между катодната плоча и предния панел.

На фиг. 9.4 е представено как се позиционира катодната плоча над прозрачния лицев панел. Върху прозрачния панел е нанесен луминофор и се разполагат захранващите проводници и множество периферни разделители. Повдигнатият свързващ мост 60 и множеството свързващи проводници са разположени от вътрешната страна на лицевия панел. Свързващият мост е удължена платформа, формирана чрез стандартен тънкослоен шаблон от диелектричен материал. Мостът се формира едновременно с формирането на позициониращите разделители. Разделителите са с по-голяма дебелина от свързващия мост. Обикновено разделителите са с дебелина 8 mil 1 mil = 0.001 инча, а свързващият мост е дебел 7 mil.



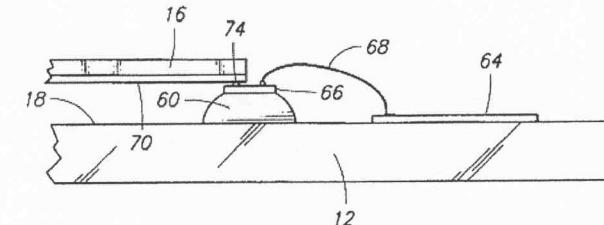
Фиг. 9.4 Позициониране на катодната плоча над прозрачния лицев панел.

Терминалните конектори на лицевия панел са метални проводящи пътечки (жици), които обхващат свързващия мост. Конекторите имат базова част 64 и конекторна част 66 (фиг. 9. 5). Базовата част се позиционира директно върху вътрешната страна на лицевия панел, докато конекторните части покриват свързващия мост. Терминалните конектори се формират чрез ситопечат, използвайки тънкослойна технология. Съществува празнина между базовата част и конекторната част, необходима при ситопечата. Базовите и конекторните части на всеки конектор са свързани с множество електрически

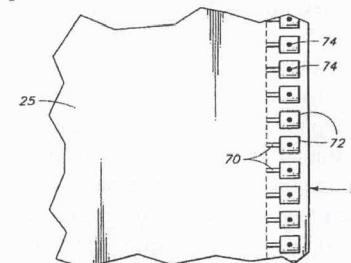
проводници. За монтирането се използва клиновидно или челно бондиране. Видовете бондиране подобряват проводимостта между различните нива на многослойната технология. Това предимство се използва при монтирането на „повдигнатите“ проводници към проводниците на по-ниски нива.

Върху катодната плоча има множество проводници 70. Тези микропроводници са свързани към електродите на катодната плоча. Всеки проводник се монтира към съединителна подложка 72 (фиг. 9. 6) или към другия край на катодната повърхност. Съединителните подложки са изравнени с конекторните части 66.

Множество метални връзки се формират чрез деформиране на метални издатини, които се поставят между лицевия панел и катодната плоча. Металните издатини формират електрически връзки между лицевия панел и катодната плоча. За монтирането на металните издатини между терминалните конектори и съединителните подложки се използват методите за конвенционален монтаж. Когато катодната плоча се притисне към лицевата подложка, металната връзка се смачка и се образуват проводящи връзки. По този начин се формират и физически бондове. Този процес се нарича флип-чип технология и се използва за други приложения в полупроводниковата индустрия. Проводящите и физическите връзки, описани по-горе, са известни и като проводящи флип-чип връзки. За прилагане на флип-чип технологията е необходимо прецизно изравнена подложка, върху която в права линия се поставят съединителните подложки с терминалните конектори.

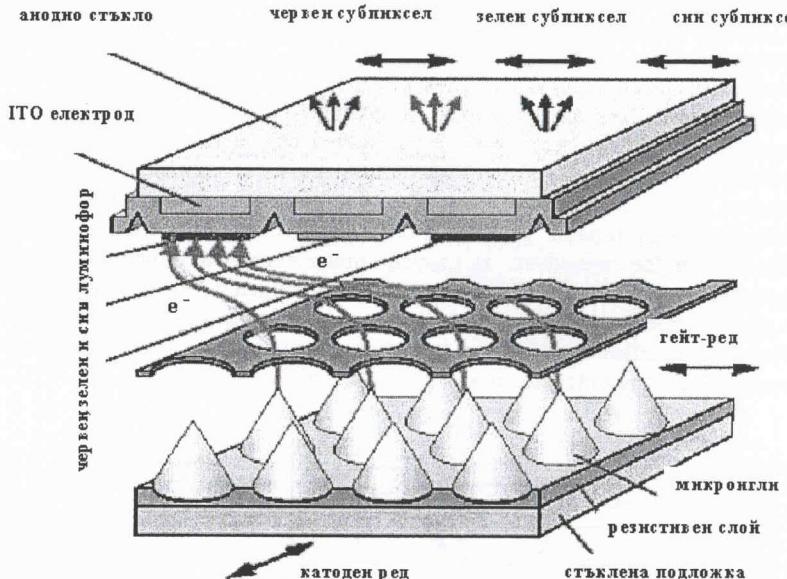


Фиг. 9.5 Терминални конектори на лицевия панел.



Фиг. 9.6 Проводници, монтирани към съединителната подложка.

Следващата стъпка е формирането на позициониращите разделители и един или няколко свързващи моста от вътрешната страна на лицевия панел. Чрез ситопечат се монтират проводящите трасета, които обхващат свързващия мост. Терминалните конектори имат основна и свързваща част и се свързват чрез жично бондирание. Всяка основна част чрез проводящо трасе се свързва към съответната свързваща част. На фиг. 9. 7 за допълнителна яснота е показан разрез на отделен пиксел и съставните му компоненти.



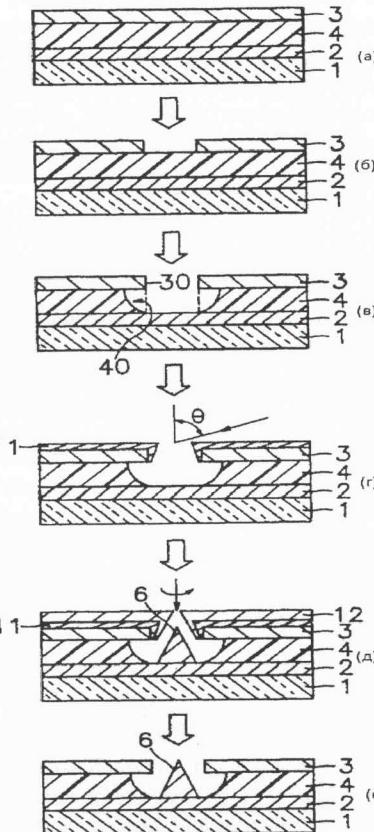
Фиг. 9. 7 Разрез на отделен пиксел и съставните му компоненти.

9.3. Особености при изготвяне на катоди при FED дисплеи

В дисплейте с емисионно поле изработването на катода е от голямо значение. Основното внимание трябва да бъде насочено към металните конуси в структурата на емитера на електрони, известни като Спинт игли. Много други структури за полева емисия са представени през последните години, но Спинт технологията остава водеща в производството на дисплеи с полева емисия. В този процес металните конуси с радиус на върха по-малък от 300 \AA (ангстрьом) или 30 nm ($10 \text{ \AA} = 1\text{nm}$), се отлагат чрез електроннольчево изпарение върху стената на емитера. По време на процеса металните конуси се изравняват самостоятелно и за разлика от други производствени схеми на масиви с полева емисия при този процес не се изисква употребата на силиций. Освен това

заостреният връх, формата и материалът за отлагане на металните конуси позволяват да се използва същата техника на отлагане.

Процесът на формиране на микроигли е представен на фиг. 9. 8 а-е [36]. На фиг. 9.8а са изобразени гейтът, изолиращите покрития и анодът от вътрешната страна на лицевия панел.



Фиг. 9. 8 Процеси за формиране на микроигли;
1-подложка; 2; катодна област; 3-гейт; 4-изолиращ слой; 11-слой от никел; 12-молибденов слой.

Определена част от гейта се еква чрез сухо ецване, за да се оформят дупки с диаметър $1.4 \mu\text{m}$ (фиг. 9.8б). Изолиращото покритие се еква с анхидрид на силициева киселина 40 под отвора. При завъртане на стъклото електронните лъчи се насочват под ъгъл 5° - 25° за формиране на слой от никел 11 (фиг. 9.8г), използван като маска за последващото ецване. Във

вътрешната повърхност на кухината, формирана в изолираща защитен слой 4 се отлага молибден (фиг. 9. 8д) чрез електроннольчево или високочестотно разпрашване необходим за формирането на микроиглите (микроконуси). Ъгълът на отлагане се променя и модулира чрез завъртане и промяна на тъгъла на подложката, като по този начин се формират и зострените върхове на микроиглите. Последната стъпка в този процес на формиране на микроиглите е елането на никеловия слой 11 и отложилият се върху него молибденов слой. Основното за работата на полевоемисионните дисплеи и изльчването на електрони от върха на микроиглите, които са насочени към съответните пиксели от луминофорния слой. Най-често срещаните проблеми са прегарянето на върховете на молибденовите микроигли вследствие много високия интензитет на електрическото поле, създадено именно във върха. Също така чрез представената технология получените микроконуси (микроигли) не са с абсолютно еднакво формирани върхове, вследствие на което се получава различно поле на върха на иглата, а оттам и изльчване на електрони с различна енергия, водещо до изльчване на светлинна емисия с различна яркост в отделните пиксели от луминофорния, най-често цинковосулфиден слой. Поради тази причина усилията на учените, изследователите и технолозите през последните 2-3 години са насочени към използването на въглеродни нанотърбички вместо молибденови микроигли поради много по-високата устойчивост на въглерода към силните електрически полета и възможност за строг и прецизен контрол за формиране на физическата структура на въглерода.

9.4. Нисковолтови дисплеи с полева емисия

В тази точка е представено развитието на дисплейте с полева емисия, които са проектирани да работят при ниски напрежения, >100 волта. Нисковолтовите дисплеи с емисионно поле се произвеждат по-лесно от висковолтовите дисплеи, защото не се изисква допълнително поддържане на високо напрежение на катода, включващо промяна на дисплайната структура, специални покрития и специализирани схеми за управление. Първите прототипи на LVFED (нисковолтови дисплеи с полева емисия) са показани на различни изложения, а фирмите Futaba и Pixtech започват масово производство на този вид дисплеи. В табл. 9. 1 са обобщени основните характеристики на нисковолтовите дисплеи с полева емисия, произведени от Futaba и Pixtech [37].

Futaba използва синьо-зелен луминофор $ZnO:Zn$ (цинков оксид:цинк) с яркост на светене от приблизително 200 cd/m^2 за техните нисковолтови дисплеи с емисионно поле, което е достатъчно за производство на дисплеи за външно наблюдение. Независимо от високата ефективност на цинковооксидния луминофор при ниски напрежения, емисионният ток в екрана трябва да бъде поддържан, за да се постигне това ниво на яркост. При напрежение от 250 V светлинната ефективност на цинковия оксид е 7 lm/W . Базирайки се на тази ефективност, е изчислено, че за дисплейте на Futaba максималният ток за един пиксел е $18 \mu\text{A}$. Този максимум на тока за един пиксел изисква високо напрежение в гейта, което от своя страна осъществява процеса. Като допълнение

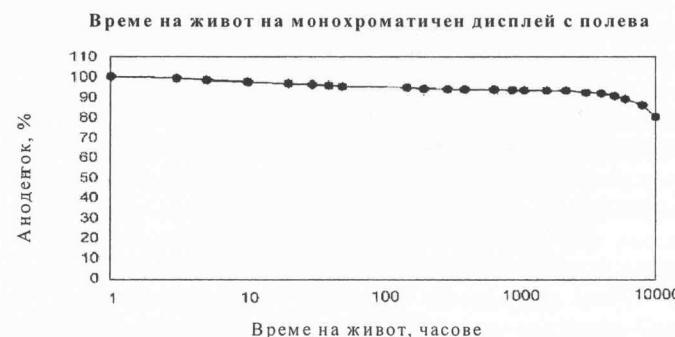
към високата яркост цинковият оксид не намалява действието на конусните микрокатоди от молибден, които се намират на разстояние около $200 \mu\text{m}$ от анода. На фиг. 9. 9 е представена характеристика за времето на живот на дисплей с полева емисия, произведен от Futaba. Този дисплей е работил непрекъснато $10\,000$ ч, но е запазил 80% от емисионния си ток.

Таблица 9. 1.

Параметри	Futaba	Pixtech
Размер на екрана (диагонал) (инч)	7.3	5.2
Брой пиксели	640 x 480 (VGA)	320 x 240(1/4 VGA)
Яркост (кандел/квадратен метър)	200	240
Тегло (грамм)	340	200
Зрителен ъгъл (градус)	160	160
Консумирана мощност (ват)	6	2.4

Бъдещото развитие на нисковолтовите дисплеи с полева емисия е насочено към увеличаване на яркостта,eto защо се разработват луминофори за получаване на по-наситени цветове при ниски напрежения. Такива са органичните електролуминесцентни материали. Повечето луминофори имат слаба яркостна ефективност при напрежения под 3 kV поради ниската изльчвателна способност и неспособност електроните да рекомбинират на повърхността. Когато се увеличи плътността на емисионния ток, нараства и яркостта, а повечето луминофори започват да изльчват фотони при плътност на тока от около $10 \mu\text{A/cm}^2$. По-голямата плътност на тока води до бързо стареене на луминофора, това от своя страна намалява яркостта. Луминофори като $SrGa_2S_4:Eu$, използвани за дисплеи с полева емисия, имат време на реакция в интервала $0.01\text{-}0.1 \mu\text{s}$, за разлика от луминофор $ZnS:Cu,Ag$, използван в дисплейте с катоднольчева тръба, чиято реакция/просветване е в интервала $10\text{-}100 \mu\text{s}$.

Въпреки че много университети се занимават с разработката на нисковолтов луминофор, все още не е открит подходящ луминофор, отговарящ на изискванията за необходимата яркост и наситеност на цветовете. За разлика от нисковолтовите луминофори има много налични висковолтови луминофори, които работят при напрежения над 3 kV . Дисплеи с полева емисия, които работят при по-високи напрежения на анода, имат много допълнителни преимущества като по-ниско напрежение на катодите, по-дълго време на живот на луминофора, способност да използват отразяващи алуминиеви покрития и по-голямо разстояние между анода и катода. Работата на дисплей с полева емисия при по-високо напрежение на анода е свързана с много нови електрофизични ефекти, които не са срещани в нисковолтов режим.



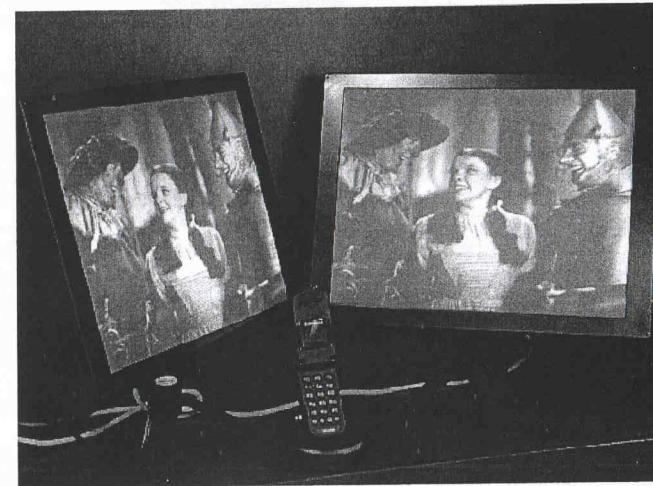
Фиг. 9. 9 Харacterистика за времето на живот на дисплей с полева емисия, произведен от Futaba.

9.5. Високоволтови дисплеи с полева емисия

Дисплеи с полева емисия, работещи в интервала 3-7 kV, се наричат високоволтови, въпреки че това напрежение е далеч по-ниско от потенциал 30 kV, използван при екраните с катоднольчева тръба. Произведени са малко високоволтови дисплеи, но всяка фирма, която се занимава с разработката на дисплеи с полева емисия, продължава да развива високоволтовите дисплеи като основен заместник на електроннольчевата тръба. От самото начало през 1990 г. Motorola решават да се концентрират върху разработката на високоволтови дисплеи, за разлика от Futaba и Pixtech, които избират нисковолтовите. Тяхното решение се основава на това, че съществуват подходящи луминофори, които работят при високо напрежение, по-ниска консумация на енергия и подобрен фокус на електронната пушка. На фиг. 9.10 са представени два 15-инчови VGA дисплеи, произведени от Motorola. Тези два прототипа работят при напрежение на анода 5 kV, емисионен ток 2 μ A за цветен пиксел и яркост 160 cd/m².

При проектирането на високоволтови дисплеи с полева емисия съществен проблем е трудността за разработка на дисплейните компоненти, които осигуряват устойчивата работа на панела за хиляди часове. Високото напрежение върху анода, приложено през разстояние от около 1mm, може да предизвика фатални проблеми, както и да намали емисионния ток. Такива проблеми водят до стареене на луминофора, което от своя страна намалява времето на живот на дисплея. Друг проблем при дисплейите с полева емисия са вакуумни дъги, които се получават в разстоянието между анода и катода. Включването на резистори в структурата на катода ограничава емисионния ток на металните конуси; това, от своя страна, значително намалява броя на вакуумните дъги. Когато напрежението върху анода се увеличи до няколко киловолта, електроните, намиращи се на повърхността на анода, ионизират абсорбираните газове. Йоните на тези газове се ускоряват към катода с достатъчно голяма енергия, за да се инплантират в него. Натрупалите се газове

в катода могат да предизвикат пробив в точката на пресичане между ред и колона, където интензитетът на полето на гейта е около 10^6 V/cm. В този случай е възможен пробив на катод в точката на пресичане на гейта и луминофора. Този проблем е решен по два начина: единият е чрез поставяне на мрежа над катода, която да улавя йоните, другият е чрез отлагане на резистивен слой върху катода, който не пропуска натрупалия се заряд.



Фиг. 9. 10 Два 15-инчови VGA дисплеи, произведени от Motorola.

Чрез навлизането на органичните материали в OLED дисплеите те вече започват да намират приложение и в дисплейите с полева емисия, като по този начин може възбуждането на светлинна емисия да се осъществи с директен контакт на въглеродните нанотръбички или молибденовите микроигли с излъчвателните пиксели, а не чрез емитиране на електрони - поради електрическите свойства на органичните полупроводници. Това би могло вече да доведе до бум в технологията на FED дисплейите и да ги направи водещи през следващите десетилетия не само за изобразяване на динамична информация, както досега бяха дисплейите с електроннольчевите тръби, но и в останалите направления на дисплейната техника.