

## Tartalomjegyzék

1. Bevezető.....	2
2. Történelmi áttekintés .....	4
3. Polimerek és szerves félvezető anyagok működési mechanizmusa .....	6
3.1 Vezetés elve .....	6
3.2 A fénykibocsátás mechanizmusa .....	10
3.3 Kis molekulájú szerves félvezetők .....	12
4. Organikus fénykibocsátó diódák típusai, felépítésük .....	13
4.1 A PLED.....	14
4.2 Az SM OLED (vagy csak OLED) .....	15
4.3 A PHOLED (foszforeszcens OLED).....	19
4.4 LEC (Fénykibocsátó elektrokémiai cella) .....	23
4.5 Átlátszó illetve flexibilis organikus fénykibocsátó diódák (TOLED, FOLED) .....	25
4.6 OLED-ek hatásfoka .....	29
4.6.1 Belső kvantumhatásfok ( $\eta_{\text{int}}$ , IQE).....	30
4.6.2 Külső kvantumhatásfok ( $\eta_{\text{ext}}$ , EQE).....	31
4.6.3 Fényhasznosítás .....	33
5. Gyártástechnológiák .....	35
5.1 Tintasugaras eljárás.....	35
5.1.1 A gyártás folyamata .....	36
5.2 Vákuumgőzölés .....	40
5.3 Roll – to – Roll.....	41
6. Az OLED-ek jelene .....	43

Az alábbi szakdolgozat részlet **Szendrey Ádám** munkája.

A vizsgaanyaghoz szorosabban nem kapcsolódó fejezeteket is  
meghagytam azoknak, akiket a téma jobban érdekel, de ezeket kék  
színű betűkkel Gröller György

## 1. Bevezető

**N**apjaink gazdasági környezetében, az emelkedő energiaárak, dráguló erő- és anyagforrások mellett a világítástechnika energiahatékonysága az elsődleges szempontok közé kezd emelkedni, sok más területtel együtt. Természetesen a gazdasági érdekeknél fontosabb szempontok miatt is ez egy pozitív változás. Azonban ezek az igények komoly elvárásokat támasztanak a világítástechnika tudományával szemben, mind technológiai, mint rendszertervezési (és üzemeltetési) szempontból.

Az elektronikus fénycső/halogén előtétek már jó ideje megtalálhatóak a piacon, áruk mára igen kedvező szintre szelődött, így jelentős mértékben el is terjedtek. A kompakt fénycsővek is nagy teret hódítottak el a piacon a hagyományos izzókhöz képest. Az utóbbi néhány évben új szereplő tört be gőzerővel a világítástechnikai piacra, ezek a félvezető

alapú fényforrások, a LED-ek. Természetesen régóta léteznek, sőt a nagyteljesítményű típusaik sem számítanak újdonságnak, azonban a fényhasznosításuk, és stabilitásuk, és nem utolsósorban az árak az utóbbi néhány évben tette őket piacéretté a világítástechnikában. Fehér megvilágítás esetén mutatott a fénycsövek és a fémhalogén lámpák még előbbre járnak, mint a piacon versenyképes áron kapható fehér LED-ek, de várható, hogy a félvezető fényforrások fényhasznosítása és egyéb fontos paraméterei jelentősen javulni fognak. Színek előállításában már, igen jelentős fölényrel, a LED-ek vették át a vezetést.

A teljesítmény LED-ekkel azonban van néhány probléma melyek miatt sok területen hátrányba kerülhetnek. Fényük erősen irányított (körülmenyes és gazdaságtalan nagy homogén világító felületeket előállítani velük), gyártásuk ugyan nem drága, de nem is nevezhető olcsónak, energiaigényes és környezetterhelő. Itt térjünk rá az OLED-ekre, mint a világítástechnikai célú félvezető technika újabb lépcsőjére.

Az OLED betűszó az „Organic Light Emitting Diode” szavak kezdőbetűiből áll össze, magyarul „Organikus Fénykibocsátó Dióda”. Különlegessége abban áll, hogy ún. félvezető polimerekből, szerves anyagokból épül fel. Legnagyobb előnye épp az őt felépítő anyagokban, egész pontosan a felhasználható gyártástechnológiában rejlik. Az OLED-eket akár nyomdatechnikával is elő lehet állítani rendkívül nagy sebességgel, nagy felületeket létrehozva, melyek homogén fényt állítanak elő. Lehetőség nyílhat olyan megoldásokra, mint például a „világító tapéta/padló/plafon”. Tetszőleges formák hozhatók létre belőle, akár RGB színkeveréses formában is. Sőt, már (több éve) léteznek OLED kijelzők kereskedelmi forgalomban is. Kialakíthatók aktív felületek, dinamikus tartalmú újságok, elektronikus papír, a lehetőségek szinte korlátlanok. Köszönhetően az említett gyártástechnológiának a fajlagos előállítási költség rendkívül alacsonyra szorítható. Ezen munka keretein belül megpróbálom bemutatni ezt az ígéretesnek tűnő technológiát, múltját, jelenét és jövőjét, illetve a benne rejlő lehetőségeket.

## 2. Történelmi áttekintés

A félvezető polimerek (ellenőrizhető) története a XIX. század közepéig, 1862-ig nyúlik vissza [1][4]. Ekkor állította elő H. Letheby az első ilyen tulajdonságokkal rendelkező anyagot. Ez a polianilin volt. Több mint 70 évvel később, 1935-ben T. Yasui a Letheby által használt eljárással (elektrokémiai úton) előállított polianilinnel végzett kutatásokat. Ezt követően, 1937-ben egy elméleti munkát publikált bizonyos J. Lennard-Jones, melyben már ún. konjugált rendszereket, illetve  $\pi$  elektronokat írt le. Látni fogjuk később, hogy ez miért is volt fontos elméleti fejtegetés. Bernanose és kutatótársai már az 1950-es években sikeresen állítottak elő elektrolumineszcenciát szerves anyagokban, nagyfeszültségű váltakozó áramú villamos térbe helyezett kvinakrin, valamint fénypor segítségével. Nem elhanyagolható M. Jozefovicz és kollégáinak munkája sem, hiszen az 1960-as években már a polianilinről, mint félvezetőről írtak. 1963-ban Weiss jóddal adalékolt oxidált polipirrolról írt, mint igen jó vezetőképességű anyagról. Azonban, ahogy oly sok más tudományos felfedezéshez, a vezető polimerekben rejlő lehetőségek felismeréséhez is, egy „véletlen” vezetett. 1967-ben egy vendégkutató, aki H. Shirakawát segítette kutatásaiban, tévesen három nagyságrenddel több katalizátort használt poliacetilén szintetizálása során, mint amire elvileg szükség lett volna, és ennek nyomán egy fényes (fémes jellegű), igen jó vezetőképességű anyag keletkezett. 1974-ben felbukkant egy jelentés egy bistabil, melanin alapú szilárdtest kapcsolóról, mely minden átkapcsoláskor egy „villanást” produkált, fényt bocsájtott ki. Közel 10 évvel később, H. Shirakawa megismerkedett egy amerikai kutatópárossal (Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid), és nem sokkal ezután közösen folytatták a kutatást. Két évre rá, 1977-ben jóddal adalékolt poliacetilénnél 9 nagyságrendnyi vezetőképesség növekedést értek el. Ez a kutatás 2000-ben meghozta az elismerést, egy Nobel-díj formájában, melyet a három kutató közösen kapott „a vezető szerves polimerek felfedezéséért és fejlesztéséért”. Mint látható, a korábbi kutatási eredmények, és jelentések nagyvonalúan feledésbe merültek [1].

A vezető, illetve félvezető polimerekben rejlő lehetőségek felismerése igen hamar egy lehetséges új fényforrás ötletéhez vezetett, mely igen sokoldalú, és gyakorlatilag tetszőleges

színekben és formákban előállítható. Eleinte a különböző anyagok élettartama okozta a problémát, hiszen ez nem volt több néhány másodpercnél. Napjainkra ez bizonyos színek esetén már több tízezer órában mérhető, bár a kék szín továbbra is problémák forrása.

A világon elsőként 1996-ban mutatták be a nagyközönségnek a polimer alapú fényforrásokat, ezt szorosán követte a hajlítható kijelzők és fényforrások felbukkanása, valamint a polimer alapú színes kijelzők [19]. A rákövetkező években igen gyors behatolást produkáltak a kijelző piacra az OLED-ek. Már 2001-ben léteztek, ugyan még csak demonstrációs céllal, 13"-15" képátlójú színes OLED kijelzők. 2002-ben kifejlesztették a mobiltelefonokba szánt kisméretű megjelenítőket. 2003-ban a Kodak elsőként alkalmazott OLED kijelzőt digitális fényképezőgépben. Ilyen és ehhez hasonló rengeteg apró lépcső vezetett a mai állapothoz. Manapság számos MP3 lejátszóban, mobiltelefonban, kamerában, digitális fényképezőgépben OLED alapú kijelző található. Egyelőre a nagyobb megjelenítők még mindig elsősorban folyadékkristályosak, azonban a Sony 2008 elején piacra dobott 11"-os OLED TV-je [19] ezen is változtatni látszik, bár az ára jelenleg igen borsos. Látható, hogy kijelzők terén jelentős a fejlődés, azonban fényforrásként történő alkalmazásról annál kevesebbet hallhattunk eddig. Igazán hangzatos áttörésekről 2008-ban hallani, hiszen mind a GE, mind az Osram fontos lépéseket tett az OLED alapú világítás fejlesztése terén. A GE az OLED fényforrások tömeggyártására alkalmas technológiát (ún. Roll-to-Roll) fejlesztett ki és demonstrált, az Osram pedig egy OLED-es „design” lámpát dobott piacra. Mindezekről, a jelenkor fejlesztéseiről, később, a hatodik fejezetben lesz bővebben szó.

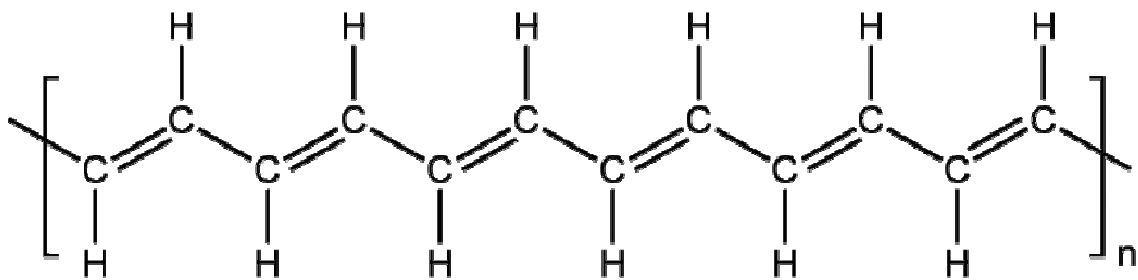
De a szerves félvezetők nem csak a fényforrások (legyen az kijelző, vagy megvilágításra használt eszköz) terén hoz(hat)nak áttörés, hiszen gyakorlatilag bármilyen, a hagyományos félvezetőkkel megvalósítható áramköri elem, felépíthető segítségükkel. Jó példa erre az ún. AMOLED kijelző, mely az Active Matrix OLED rövidítése. Ennél a technológiánál a pixelek vezérlését organikus FET-ek végzik.

### 3. Polimerek és szerves félvezető anyagok működési mechanizmusa

#### 3.1 Vezetés elve

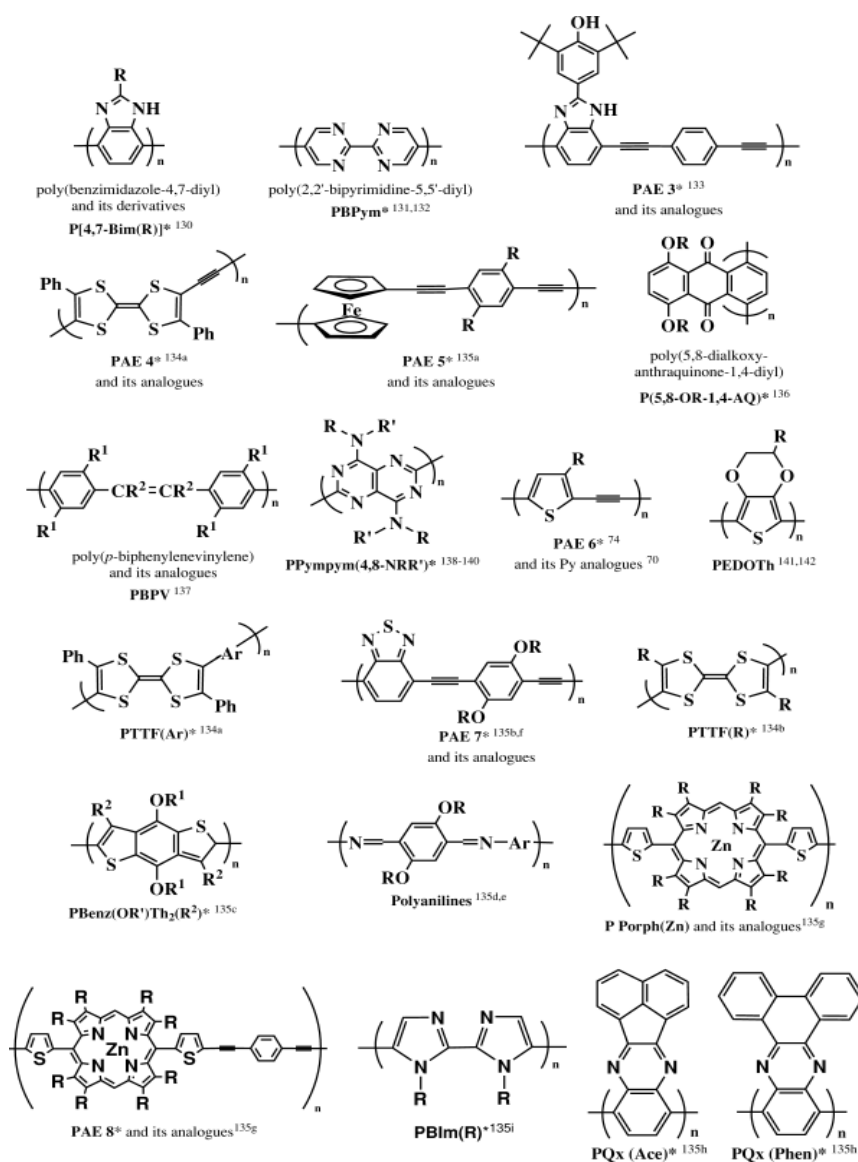
A szerves polimereket legtöbbször úgy ismeri, mint igen jó szigetelőket, felhasználásuk igen elterjedt a villamos iparban. Egy vezető polimer valójában egy szerves polimer félvezető, vagy röviden, szerves félvezető. Két nagyobb csoportra oszthatóak, töltésvivő komplexekre, és vezető poliacetilénekre. Utóbbi csoportba tartozik maga a poliacetilén, valamint a polipirrol, a polianilin, és ezek különböző változatai.

Hogy megértsük a polimerek vezetésének elvét, vegyünk a legegyszerűbb példát, a poliacetilént. [1] [5]



1. ábra – Poliacetilén

Mint az 1. ábrán is látható, a szénhez tartozó egyébként szabadon maradó elektronpár miatt, váltakozó egyszeres illetve kétszeres kovalens kötések sora alakul ki. Amennyiben ebbe a rendszerbe **instabilitást** viszünk be, például a lánc egyik végén elektront vonunk el, vagy injektálunk, akkor ez az elektronhiány, vagy többlet, egy kétszeres vagy egyszeres kötés formájában képes „végigfutni” a láncon.



3. ábra – Számos konjugált kötésű polimer létezik, rengetegféle tulajdonságuk hasonlítható össze.

Ez a vezetési mechanizmus egyébként igen hasonló ahhoz, mely a grafitnál is megfigyelhető.

Ezen polimerek esetében a szerkezet vázát az egyszeres kötések adják, a töltések továbbítását pedig a kétszeres (ún.  $\pi$  kötések) végzik [1] [5].

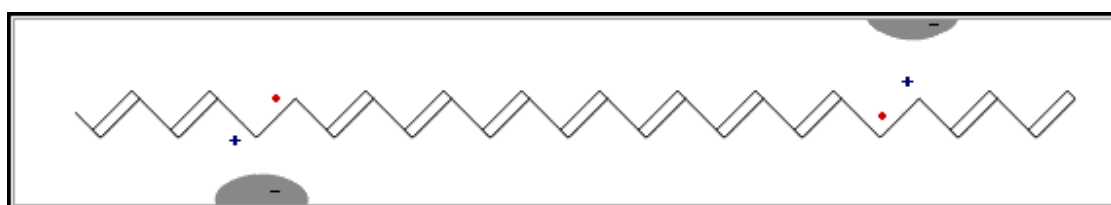
A poliacetilént általában elektrokémiai polimerizációval állítják elő, mely során az elektródán egy vékony, ezüstös fényű, nem vezető réteg keletkezik. Ahhoz, hogy félvezető illetve vezetőképes anyaggá váljon, adalékolni szükséges. Például jódos oxidációval a

vezetés 8 nagyságrenddel megnő. Az előállítás során számos módszer kínálkozik a kívánt vezetési tulajdonságok beállítására, lehetséges a szerves félvezetőkhez hasonlóan a p, illetve n adalékolás (lényegében részleges oxidálás illetve redukálás). Elérhető akár 12 nagyságrendnyi vezetőképesség növekedés. Általánosságban elmondható, hogy halogének segítségével (mint például a jód – oxidáció) p adalékolás valósítható meg, míg alkálifémekkel (mint például a nátrium – redukció) n típusú félvezető állítható elő. Oxidáció során, tehát elektron elvételkor, az illető poliacetilén molekula pozitívan töltötté válik, ún. kation gyökké, más néven polaronná alakul, miközben egy negatív töltésű jód ion keletkezik. Gyakorlatilag kialakul egy „lyuk”, egy elektronhiány. Ez a lyuk képes végigvándorolni a láncon. Azonban mivel a jód ion mobilitása viszonylag kicsi, nagy mennyiségű szennyezőre van szükség, hogy a láncon szabadon tudjon mozogni a létrejött polaron [5].

Az alábbi ábráson a polaron létrejöttét, és vándorlását szemlélteti

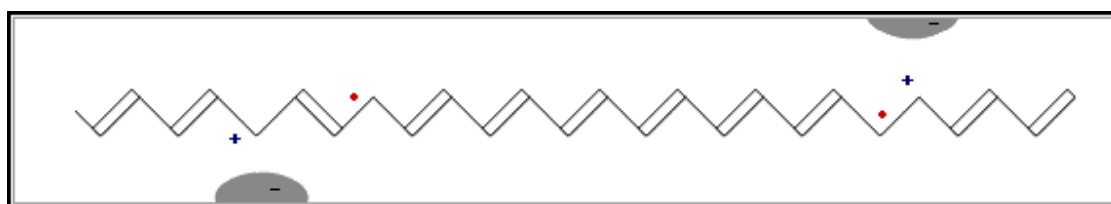
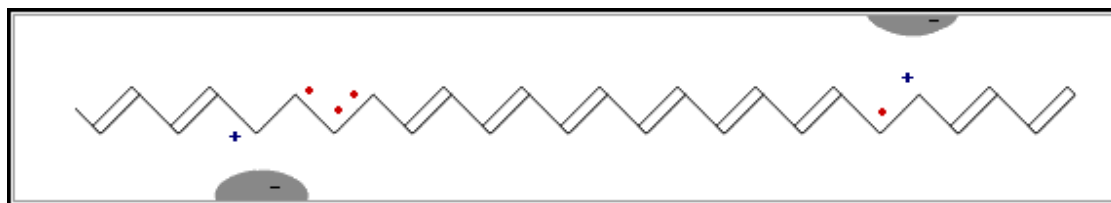


4. ábra – A szürke félkörök a jód ionokat reprezentálják. A kettős vonalak a kettős kötések, a szimpla vonalak az egyszeres kötések. A szén atomok a töréspontokban helyezkednek el.

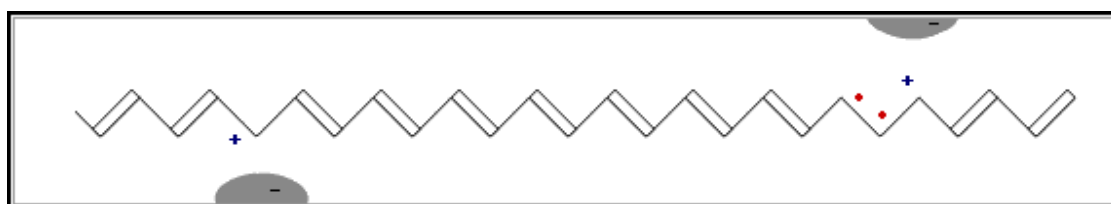


5. ábra – A jód az oxidáció során elektront von el az acetilén molekulától, egy pozitív töltésű „lyukat” létrehozva.

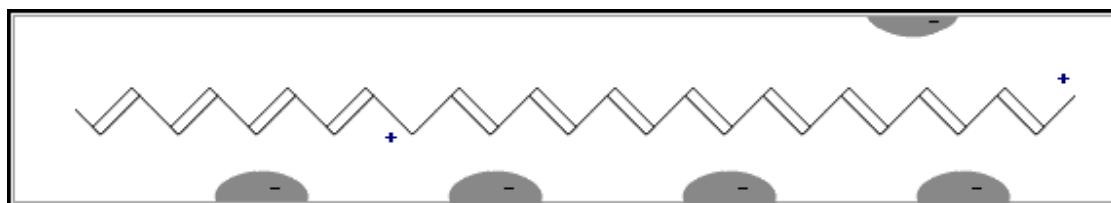




6. és 7. Ábra – A létrejövő elektron-lyuk párból az elektron vándorlásnak indul a lánc mentén, folyamatosan felbontva, majd újraképezve a kötéseket



8. ábra – Az elektron egészen addig vándorol a láncon, míg végül egy másik polaron szabaddá vált elektronjával nem találkozik, ahol is létrehoz egy kettős kötést.



9. ábra – Az elektron hiány, azaz a polaron, megfelelő adalék koncentráció esetén, képes szabadon vándorolni a lánc mentén.

Két további polaron típus alakulhat ki. Független polaronnak nevezzük azt a jelenséget, amikor további oxidáció során egy második elektront is eltávolítunk a már oxidált láncrészből. Ha pedig egy már kialakult polaron pár nélküli elektronját vonjuk ki a rendszerből, azt bipolaronnak nevezzük. A két típus hasonlónak tűnhet, azonban a másodlagos oxidáció helyében különbség van. Fontos szerepet játszanak a vezetésben az ún. szolitonok, melyek gyakorlatilag szándékosan bevitt hibák a polimerláncban. Ezek

olyan stabil szabadgyökök, melyek képesek ugyan a lánc mentén mozogni, de töltést nem szállítanak [5].

### 3.2 A fénykibocsátás mechanizmusa

Az adalékolás hatására az illető polimernek, vagy molekulának, a szerves félvezetőkhez hasonló sávszerkezete alakul ki [1] [5].

Azonban a szerves félvezetőkkel eltérően, ahol viszonylag egyszerűen leírható a gerjesztés illetve a rekombináció, a szerves félvezetők esetén összetettebb a helyzet. „Hagyományos” esetben a tiltott sáv lényegében az energiakülönbség a vegyérték illetve a vezetési sáv között. Amikor gerjesztjük az illető elektront, egy töltés pár jön létre, a vezetési sávba elektron kerül, míg a vegyérték sávban egy „lyuk” keletkezik (pozitív „töltés”). Amikor az elektron „visszazuhan” az eredeti állapotában, a tiltott sáv szélességének megfelelő energiájú fotont bocsát ki (közvetlen rekombináció).

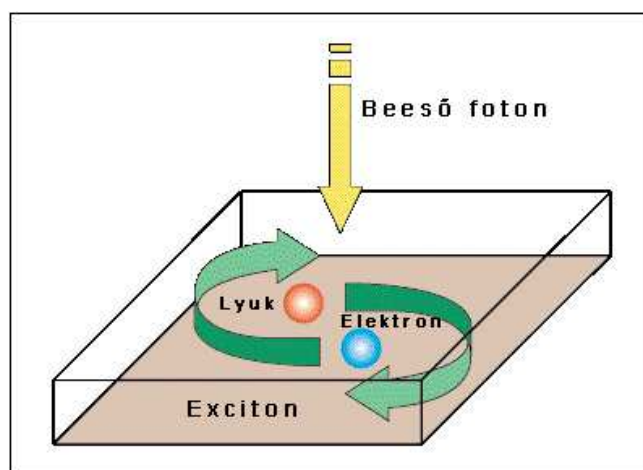
Szerves félvezetőknél korántsem ilyen egyszerű ez a gerjesztési mechanizmus, és a mai napig viták zajlanak a jelenség leírása körül.

Annyit bizonyosan tudunk, hogy a munkát a delokalizált pi kötések végzik. Azon felül, hogy lehetővé teszik a vezetést, képesek a szerves félvezetők elektronszerkezetéhez hasonló módon viselkedni. Ahhoz, hogy félvezetőként működjenek, szükség van energiakülönbségre, egy lépcsőre, gyakorlatilag a tiltott sávról van szó. Polimerek esetén ezt bizonyos elektronpályák ( $p_z$ ) „átfedése” teszi lehetővé. Az így kialakuló kötő (bonding), illetve nem kötő (lazító, vagy antibonding) pi kötések közötti energiakülönbség adja a szükséges szintkülönbséget. Az alacsonyabb energiájú pi kötések felelnek meg a vegyérték sávnak (HOMO szint: Highest Occupied Molecular Orbital), a magasabb energiájú pi kötések pedig a vezetési sávnak (LUMO szint: Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Az alap- és a gerjesztett állapot közötti (azaz a HOMO és LUMO szint közötti) energiakülönbség általában 1,4 és 3 eV közé tehető [1].

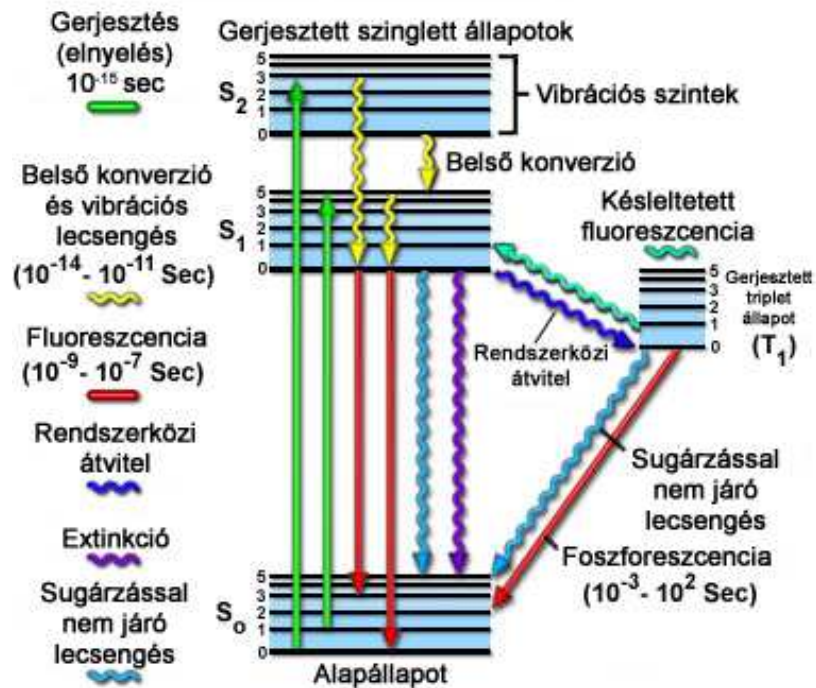
Gerjesztéskor, itt is lényegében egy töltéspár jön létre, az ún. exciton (ld. 10. ábra). A gerjesztett elektron a vezetési sávba kerül, azonban ellentétben a szerves félvezetőkkel,

ez az elektron kötött marad a töltéspárjához. Ezek az excitonok szabadon tudnak vándorolni a molekulalánc mentén [5].

Amikor ez az exciton megszűnik (visszakerül alapállapotba), fénykibocsátás történik. Ennek több módja is lehetséges, attól függően, hogy a gerjesztett elektron milyen kvantumállapotba kerül. Ismert tény, hogy azonos pályán lévő elektronok spinje nem lehet azonos. Amikor létrejön egy exciton, a töltéspár tagjai két különböző pályán helyezkednek el, így nincs megkötés a spinjükre egymáshoz képest. Azonban az alapállapotba való visszatérésnek feltétele, hogy a gerjesztett elektron spinje ellentétes legyen a párjával (a lyukhoz is rendelhetünk spint, hiszen alapállapotba való visszatéréskor oda „bekerül” egy elektron). Ha a gerjesztés során az elektron olyan kvantumállapotba került, ahol a spinje megengedi a visszatérést az alapállapotba (ekkor az exciton tagjainak spinje ellentétes, ez az ún. szingulett állapot), akkor beszélünk fluoreszcenciáról, míg ha ez nem megengedett (ekkor azonos a spinje a lyuk-elektron párosnak, ezt nevezzük triplettnak), akkor foszforeszcenciáról. Ez utóbbi folyamat lassabb, hiszen ahhoz, hogy az illető elektron spinje „megforduljon” egy köztes szereplőre (ütközésre) van szükség. A 11. ábra szemlélteti a két lehetséges állapotot [6].



10. ábra - Az exciton (fotonnal való gerjesztés)



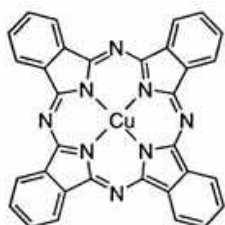
11. ábra - Szingulett és triplett állapotok

### 3.3 Kis molekulájú szerves félvezetők

Fontos még megemlíteni ezt az anyagcsoportot is, hiszen később még utalok rá. A működési mechanizmus lényegében ugyanaz, mint a polimereknél [1]. Olyan szerves molekulákról van szó, melyekben konjugált kötésrendszer alakul ki. Általában más-más molekulákat alkalmaznak a fénykibocsátáshoz, lyukvezetéshez, elektronvezetéshez. A fő eltéréseket a gyártástechnológiáknál, illetve a különböző típusú diódák felépítésénél fogjuk látni.

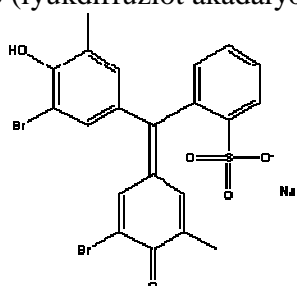
Néhány elterjedt molekulatípus (természetesen ezen anyagok tárháza igen terjedelmes):

Lyuk injektor:



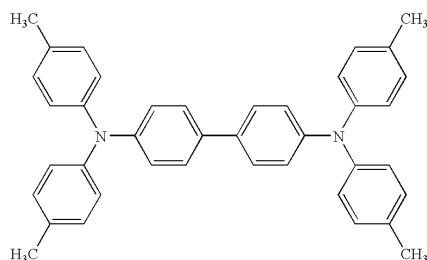
CuPc (Réz – phtalocianin)

Lyukblokkoló (lyukdiffúziót akadályozza):



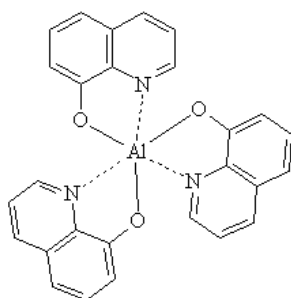
BCP („Bromo Creso Purple”)

Lyukvezető:



TPD (Tetra-fenil-benzidin)

Elektronszállító:



Alq<sub>3</sub> – Tri-(8-hydroxyquinoline) Al)

Azon felül, hogy elektronvezető, zöld fluoreszcenciát is képes produkálni

#### 4. Organikus fénykibocsátó diódák típusai, felépítésük

Számos különböző konstrukciós és technológiai megoldás született a szerves fényforrásokra. Ennek megfelelően a bemutatásuk sem egyszerű feladat, hiszen a

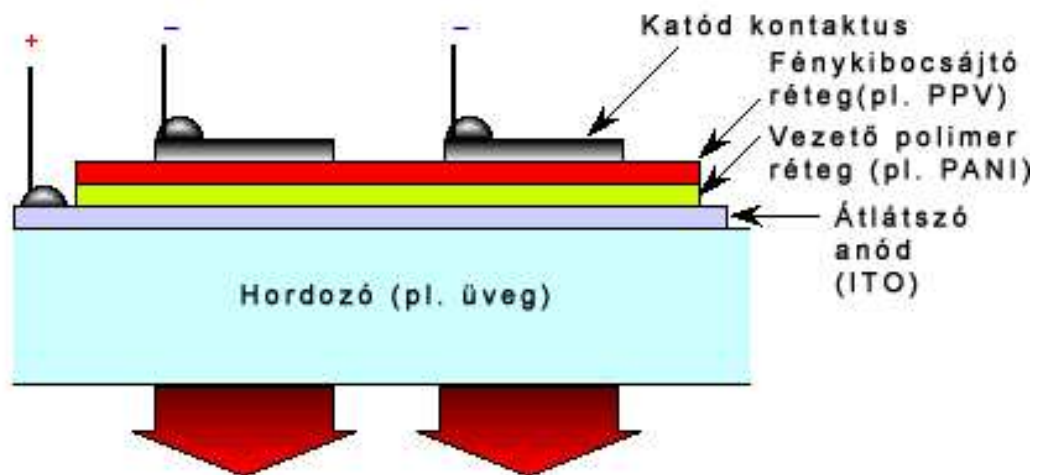
csoportosításra is sokféle szempont kínálkozik. Itt főbb típusok szerint kerülnek bemutatásra ezek az eszközök.

Főbb típusok:

- PLED (Polimer LED)
- SM OLED (Small Molecule OLED, avagy kis molekulájú OLED) az OLED kifejezést általában erre a típusra értik)
- PHOLED (Foszforeszcens OLED)
- LEC (Fénykibocsátó elektrokémiai cella)

#### 4.1 A PLED

A PLED a Polimer LED (vagy polimer OLED) rövidítése. Szerkezete igen egyszerű, az alábbi ábra szemlélteti.



12. ábra - PLED felépítése

A vezető polimer réteg mely az anód illetve a fénykibocsátó réteg között van, nem feltétlenül szükséges, azonban javít a szerkezet paraméterein. További speciális rétegekkel jelentősen javítható a hatásfok. A használt polimerek, a már ismertetett konjugált láncú

családból származó valamely anyagok, mint például a PPV vagy PANI (polianilin). Jelenleg elsősorban kijelzőkhöz használják ezt a szerkezetet [1] [4].



13. ábra - PLED technológiát alkalmazó alfanumerikus kijelző

A 13. ábra egy PLED technológiát alkalmazó alfanumerikus kijelzőt ábrázol. Előnyei közé tartozik a nagy fényerő és kontraszt, valamint az alacsony fogyasztás, illetve a gyártástechnológia egyszerűsége és gazdaságossága.

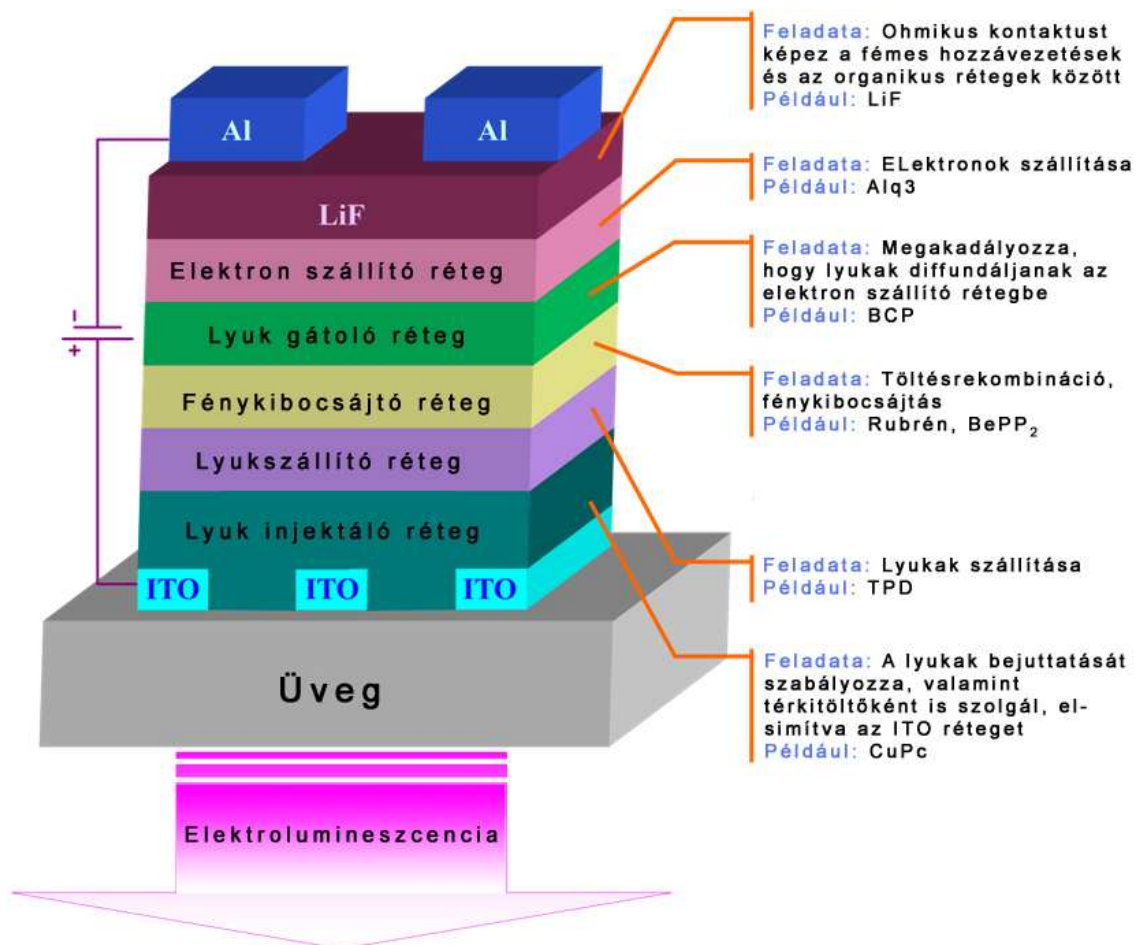
Gyártása elsősorban a polimerek oldószeres formában történő felvitelével történik, a tintasugaras nyomtatáshoz rendkívül hasonló módszerrel. Azonban a legújabb fejlesztések nyomán akár az újságygyártásból már ismert rendkívül nagy átbocsájtó képességű „hengeres” (roll to roll) nyomdatechnika is alkalmazható (hajlékony hordozó esetén). Épp ezen okok miatt (olcsó és egyszerű gyártás), ez a típusú OLED valószínűleg komoly jövő elé tekint, annak ellenére, hogy az alább tárgyalt SM-OLED-ek megelőzték bizonyos paraméterek terén.

#### 4.2 Az SM OLED (vagy csak OLED)

Az kis molekulájú OLED-ek történelmileg megelőzik a PLED-et. Rétegszerkezetük lényegesen összetettebb.

ártástechnológiai szempontból költségesebb, hiszen általában vákuumgőzöléssel történik a rétegek egymásra vitele. Mivel hordozóként elsősorban az üveg jöhet szóba, így ez a technológia lényegesen kevésbé alkalmas flexibilis kijelzők/fényforrások előállítására. A

gyártás során a különböző rétegek egymásra vitelekor ún. maszkolást alkalmaznak. Jelenleg e maszkolás pontossága, és a tömeggyártás problémájának megoldása az a két terület melyek hátráltatják az elterjedést. Tovább rontja a helyzetet, hogy a kis molekulájú szerves fényforrásoknál a kék szín élettartama nem túl kedvező (egyelőre) [1] [19].



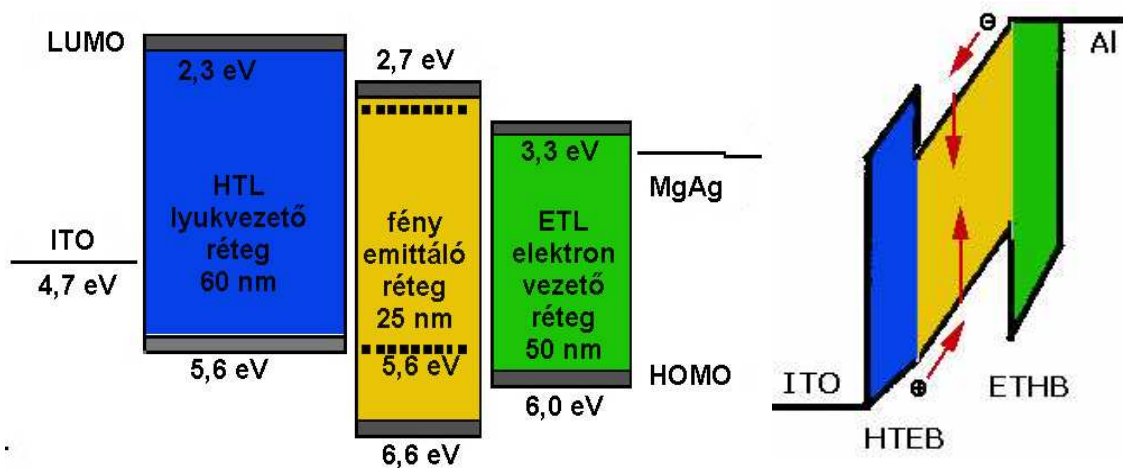
14. ábra - SM-OLED szerkezete

Mivel a működéshez szükséges számos részfeladatot mind-mind más molekulák látják el, így szükséges a sokrétegű szerkezet. Fényhasznosítása jelen pillanatban a PLED



technológiánál magasabb, azonban gyártási költsége, a fent említett okokból kifolyólag szintén magasabb.

A 16. ábrán látható cella a három alapszín keverésével (R G és B rétegek) fehér fényt állít elő. Ez a kísérleti cella már eléri a 25 lm/W fényhasznosítást, de a hosszú távú cél az, hogy ez az érték túllépje a 100 lm/W –ot. A Philips és a Novaled közös fejlesztésében előállított cella legnagyobb fénysűrűsége 1000 cd/m<sup>2</sup> körül mozog. A különböző színű komponensek élettartama azonban jelentősen eltér. Míg a vöröse 100 000 óra, a zöldé pedig 50 000, addig a kék színé csupán 6000 óra, 500 cd/m<sup>2</sup> kiindulási fénysűrűség esetén. A kutatók további céljai közé tartozik, a fényhasznosítás növelése mellett, a hőmérséklet-stabilitás növelése (100 °C fölé), valamint a kék szín élettartamának javítása.



15. ábra – OLED sávszerkezete, a rétegek egymáshoz illeszkedése (energetikailag)

A 15. ábra egy OLED sávszerkezetét, és energetikai viszonyait mutatja [1]. A rétegeken belüli energiaszinteket a szürke sávok mutatják (baloldalon). Látható, hogy a rétegek egymáshoz képest el vannak tolódva energetikailag. Ebből adódik a viszonylag magas működési feszültség, mivel a réteghatárokon töltés felhalmozódás alakul ki, ami lényegében egy potenciálgátat eredményez. Jobb oldalon az ITO (anód) réteg irányából érkező lyukak, valamint az Al réteg (katód) irányából érkező elektronok útja van feltüntetve (A betűszók elemei: H: hole = lyuk, E: elektron, T: transzport, B: blokkoló, L:

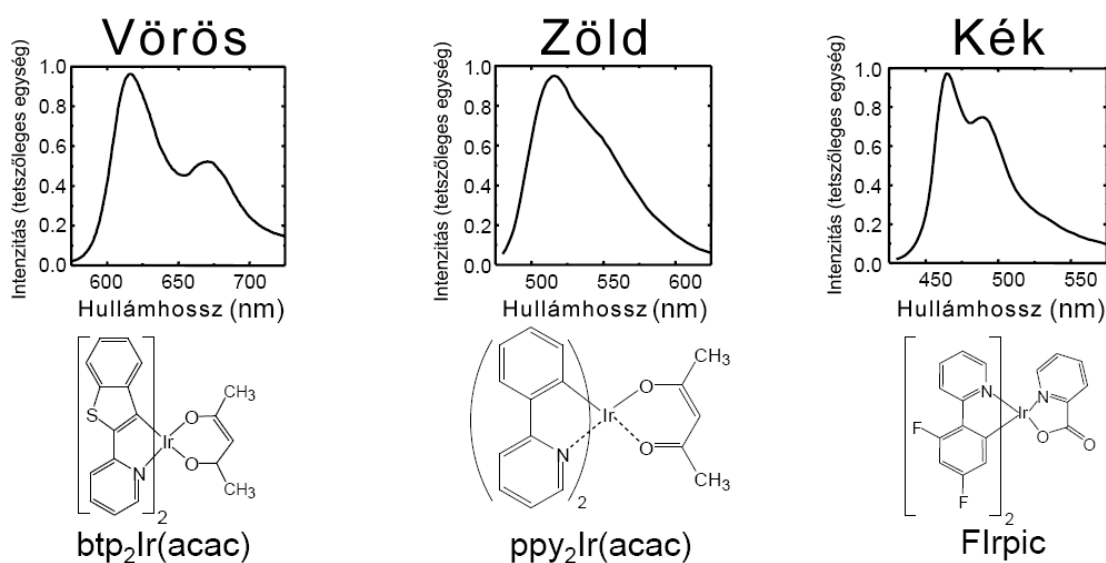
layer = réteg). A narancssárgával jelölt aktív rétegben történik a rekombináció és a fénykibocsátás.



26. ábra - 25 lm/W fényhasznosítású fehér SM OLED cella

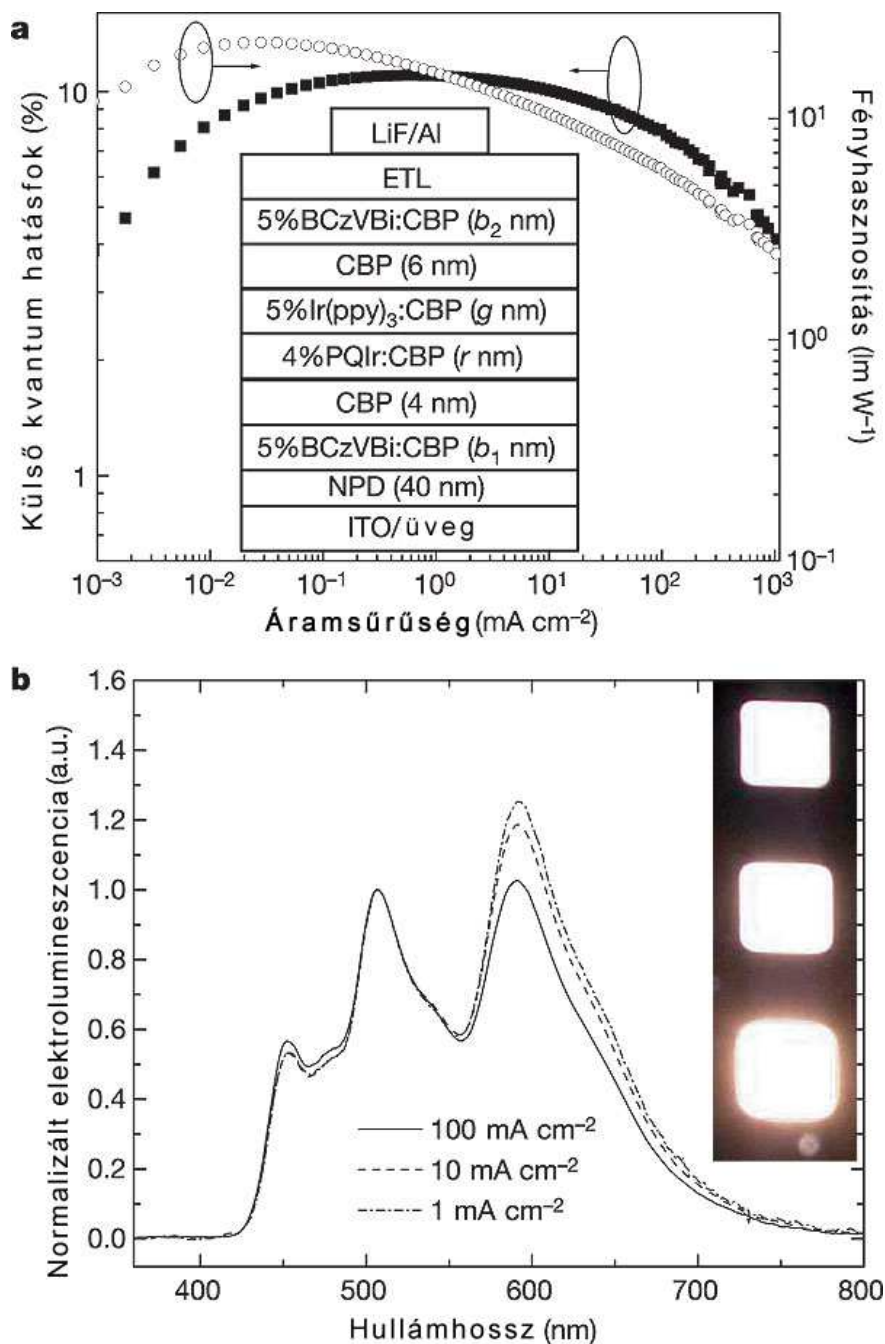
### 4.3 A PHOLED (foszforeszcens OLED)

A harmadik fejezetben, az OLED-ek működése kapcsán, már tárgyaltuk, hogy alapvetően két módja lehet a fénykibocsátásnak. A triplett állapotban lévő exciton csak közvetett úton rekombinálódhat, köztes szereplőre, a fénykibocsátáshoz foszforeszcens anyagra, van szükség. A PHOLED-ek ennek megfelelően a fluoreszcencia mellett (szingulett állapotok), a foszforeszcenciát (triplett állapotok) is hasznosítja a fénykibocsátáshoz, így a belső kvantum-hatásfok igen magas, 100 %-hoz közelít. A foszforeszcens anyagok közül erre a felhasználásra legalkalmasabbnak az Ir, a Pt, és az Os komplexei (komplex: egy kisméretű molekulából (vagy molekulákból) és fém ionokból álló molekula) bizonyultak [1].



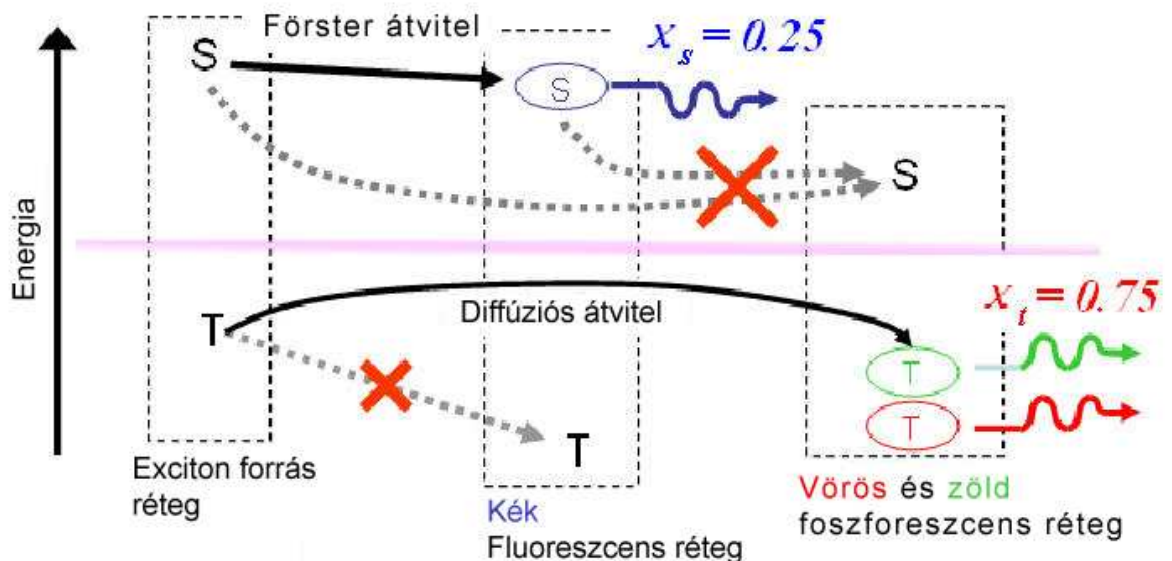
37. ábra – Néhány jellemzően alkalmazott Ir ion komplex. Legnagyobb belső kvantumhatásfoka a zöld színnek van.

A 18. ábra egy kísérleti, fehér, PHOLED cella mérése során kapott eredményeket mutatja grafikonos formában, valamint az „a” ábra a rétegszerkezetet is ábrázolja. A  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $g$ ,  $r$  paraméterek (rétegvastagságok) az aktuális cellaszerkezetből egy összefüggés által adódnak [8].



18. ábra – Fehér PHOLED (WOLED) cella mérésének eredményei különböző áramsűrűségek mellett

Ezt a cellát Yiru Sun, Noel C- Giebink, és Hiroshi Kanno kutatók fejlesztették ki. Különlegessége, hogy kiküszöböli az egyébként igen rövid élettartamú kék foszforeszcens anyagot, és helyette a kék színt teljes egészében fluoreszcencia útján (szingulették által) állítja elő, míg a vörös és zöld színeket pedig a tripllett állapotból, foszforeszcencia útján.



19. ábra – Fehér PHOLED cella sávszerkezete; szingulett (S) és tripllett (T) állapotok „munkavégzése”. A piros X-el áthúzott átvitelek nem megengedettek.

A sokrétegű szerkezet nem csak a három alapszín „bekeverése” miatt szükséges, hanem azért is, mivel a különböző színeket nem lehet egymásra rétegelni közvetlenül, ugyanis ekkor az excitonok átdiffundálnának a rétegek között, ami rontaná az eszköz színtabilitását. Emiatt ún. exciton blokkoló rétegekre van szükség.

A cella síkjára merőleges (szemközti) nézési irányban a külső kvantum hatások (18. ábra fehér karikák) 11 % környékén tetőzött (500 cd/m<sup>2</sup> fénysűrűség, illetve 1 mA/cm<sup>2</sup> áramsűrűség mellett), és az áramsűrűség növekedésével kissé csökkent. 1 A/cm<sup>2</sup> áramsűrűség mellett a fénysűrűség elérte a 83 000 cd/m<sup>2</sup> értéket. A fényhasznosítás (fekete négyzetek) 1 mA/cm<sup>2</sup> áramsűrűségnél 22 lm/W körül mozgott (nagyobb áramsűrűségek esetén lecsökkent).

Fontos eredménye a mérésnek, hogy a spektrális eloszlás viszonylag stabil, kevésbé tolódik el a különböző áramsűrűségeken. A színvisszaadás CRI=85 a „b” grafikonon feltüntetett mindhárom áramsűrűségeken. Az alsó grafikonon a fotó három 4,5 mm<sup>2</sup> felületű cellát mutat, különböző áramsűrűségeket mellett.

Egy, a Tsinghua egyetemen (Benjing) dolgozó, kutatócsoportnak 2006-ban sikerült olyan PHOLED-et előállítania, melybe szükségtelen volt exciton blokkoló rétegeket elhelyezni. Egy egyszerűbbé teszi a szerkezetet, olcsóbbá a gyártást, és kis mértékben növeli a fényhasznosítást is, valamint csökkenti a működési feszültséget [7].



20. ábra – Fehér PHOLED (WOLED) cella

A kísérletben használt cella hatásfoka 10,5 cd/A körül mozgott (a nézési irány a felületre merőleges), illetve 22 000 cd/m<sup>2</sup> fénysűrűséget ért el.

A cella szerkezete abban különbözik a „hagyományos” exciton blokkoló rétegeket alkalmazó PHOLED-ektől, hogy míg ott egyetlen hordozót alkalmaztak, addig itt a két, vagy három foszforeszcens anyaghoz inkább saját, megfelelően kiválasztott, hordozót használtak. Ezzel gyakorlatilag a megfelelő hordozó rétegek által a rendszerbe bevitt

energiagátak megakadályozzák az exciton diffúziót a fénykibocsátó rétegek között, miközben kevésbé emeli a működési feszültséget, mint egy külön blokkoló réteg. A cella nyitófeszültsége 5 V, a legnagyobb fénysűrűséget pedig 18,2 V –on éri el. Látható, hogy mennyire eltér, épp a többrétegű szerkezet miatt, egy ilyen típusú fénykibocsátó dióda nyitó- és működési feszültségtartománya egy hagyományos LED-től. A magas nyitási/működési feszültség egyelőre komoly hátrányt jelent kis teljesítményű eszközökben való használhatóság terén, és növeli a villamos veszteségeket is.

A PHOLED-ek gyártása vákuumgőzöléssel történik, emiatt viszonylag költséges és (tömeggyártás szempontjából) bonyolult. Fehér cella esetén a színek arányait a fénykibocsátó rétegek vastagságának beállításával szabályozzák. Ennek köszönhetően a színárnyalatok, fehér esetén pedig a színhőmérsékletek könnyen beállíthatóak. Ez a praktikus tulajdonság egyszerűbbé teszi az adott felhasználáshoz való dinamikus alkalmazkodást.

A kutatók reményei szerint a PHOLED-ek fényhasznosítása eléri az 50-60 lm/W értéket, élettartamuk az 50 000 órát, 1000 cd/m<sup>2</sup> fénysűrűség mellett, még 2010 előtt. Ha ezek a kilátások beigazolódnak, akkor felvehetik a versenyt a 90+ CRI értékű fénycsövekkel, melyek fényhasznosítása nem olyan kedvező, mint a 80-as társaiké.

#### **4.4 LEC (Fénykibocsátó elektrokémiai cella)**

A LEC egy olyan fénykibocsátó eszköz, mely két fémes elektródából, és a közéjük felvitt polimer „keverékből” áll. Természetesen az egyik elektróda (általában az anód) valamilyen átlátszó vezető anyagból készül, például a már jól bevált ITO-ból (Indium Ón Oxid). Ezt az anyagot azért is használják előszeretettel anódként, mert a lyukinjektálás szempontjából kedvező tulajdonságai vannak.

A már említett polimer keverék egy fénykibocsátó polimerből, egy sóból, és egy ionvezető polimerből áll, amiben a só feloldódik és ionokat képez. Érdekessége a viszonylag jó hatásfokában, alacsony működési feszültségében (ami által kedvezőbb lehet kisteljesítményű eszközökben történő felhasználáskor), és egyszerű előállíthatóságában

rejlik. A só által a rendszerbe bevitt ionok, a mozgékonyaságuk által, az elektródok és a polimer közötti potenciálgátat közel nullára csökkentik. Mivel nem szükséges a kilépési munkát még tovább csökkenteni, a katód anyagául nem kell az elektromos és kémiai szempontból nem túl kedvező magnéziumot, kalciumot, vagy lítiumot használni, hiszen megfelel az alumínium is [9].



21. ábra – LEC cella – Milánói Politechnikum Elektronikai Tanszéke

Egy lehetséges háromkomponensű polimer keverék az alábbi:

1. Vezető, fénykibocsátó (lumineszcens) polimer: m-PPP (poli parafenilén)
2. Ionvezető polimer: PEO, poli-etilén-oxid
3. Só: lithium-trifluoro metán szulfonát ( $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ )

A nyitófeszültséget (pontosabban „bekapcsolási feszültséget”) gyakorlatilag a fénykibocsátó polimer tiltott sávjának szélessége szabja meg (hagyományos LED-ekhez



hasonlóan). Ez jelentős előnyt jelent a kis teljesítményű elektronikus eszközök, és kijelzők terén.

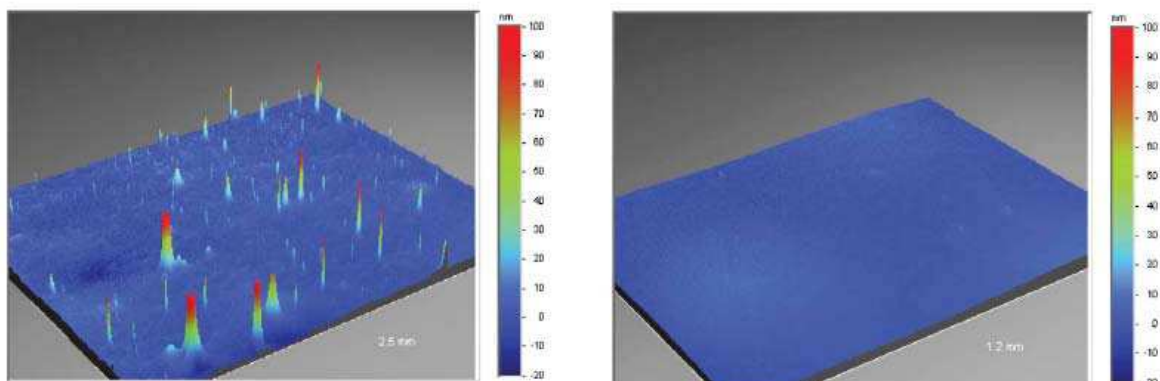
A 15. ábrán látható cella esetében a háromkomponensű keveréket centrifugálással vitték fel egy ITO-val bevont üveg hordozóra (200 nm vastag filmréteget kapva), majd argon atmoszférában felmelegítették azt, így elpárologtatva az oldószert. Ezt követően alumíniumot párologtattak a felületre (katód), kb. 50 nm vastagságban.

Egy LEC hatásfoka tovább növelhető, ha a PHOLED-hez hasonlóan olyan foszforeszcens anyagokat juttatunk az eszközbe melyek a triplett állapotokat is képesek hasznosítani.

#### 4.5 Átlátszó illetve flexibilis organikus fénykibocsátó diódák (TOLED, FOLED)

Az OLED-ek talán leg kecsegtetőbb technikai lehetősége az átlátszó, illetve hajlékony fénykibocsátó felületek lehetősége.

Azonban ahhoz, hogy például hajlékony felületre képezzünk ki OLED-et, megfelelő hordozót kell találni. A legtöbb műanyag mely szóba jöhet, nem igazán felel meg a követelményeknek, így az OLED-ek számára külön műanyag fóliákat állítanak elő, melyek bizonyos paramétereikben (hőállóság, optikai áteresztő képesség, felület minősége stb..) különösen magas elvárásoknak kell, hogy megfeleljenek [3] [1].



22. ábra – Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel ipari minőségű (baloldal) és az OLED –ekhez használható (jobb oldal) PEN (polietilén-naftalát) felületéről.



23. ábra – Hajlékony üveg hordozó

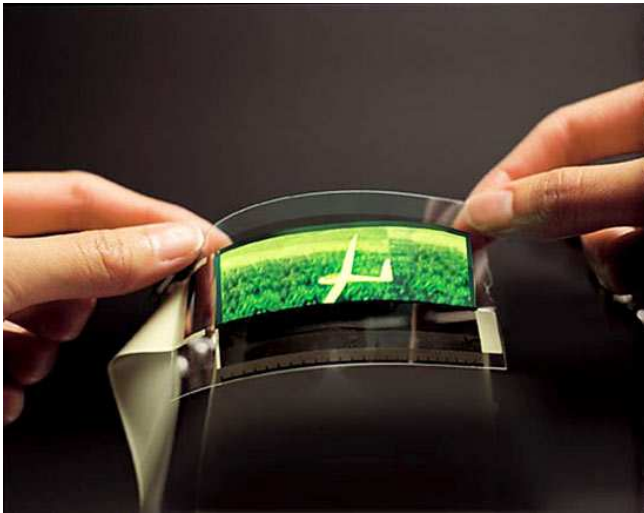
A hajlékony OLED-ek, mint azt már korábban érintettük, gyárthatóak ún. roll-to-roll technikával, mely a nyomdaiparban már régóta alkalmazott eljárás. Rendkívül nagy tételek, nagy sebességgel, és olcsón állíthatók elő ezzel a módszerrel.

A GE 2008 márciusában jelentette be, hogy a világon elsőként sikeresen demonstrálták ennek a gyártástechnológiának az OLED-ek előállítására történő hasznosítását. Ez igen jelentős előrelépést jelenthet az OLED iparban [10].

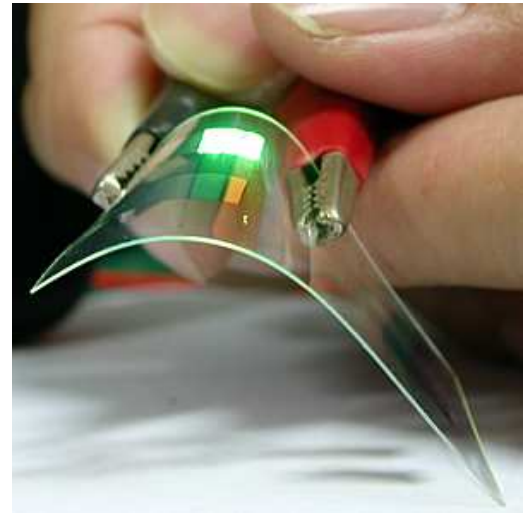
A flexibilis fénykibocsátó felületekben rejlő lehetőségek közül csak néhány:

- Szinte bármilyen felület fényforrássá alakítható
- Nagy felületű világító „fal”, padló, mennyezet.
- Aktív felületekkel rendelkező ruházat

Nem csak a civilszféra, hanem a világ haderői is felfigyeltek ennek a technológiának a jelentőségére. Lehetővé teszi dinamikus álcák használatát, könnyen és gyorsan telepíthető fényforrásokat teremthet. Ez természetesen a civilszférában is komoly piacot hozhat létre, a divatszaktól a lakberendezésen át az sportokig (pl. hordozható túrafelszerelésként).

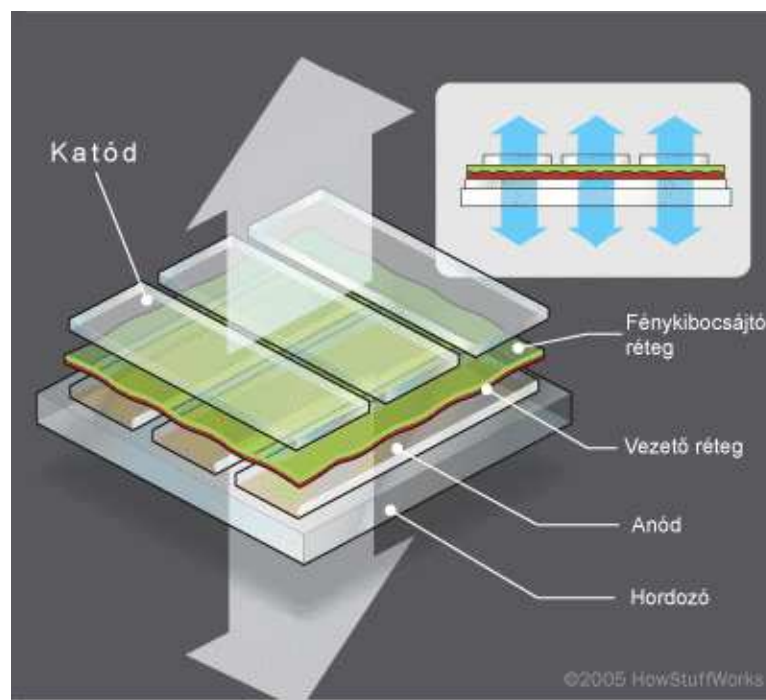


24. ábra – A Universal Displays nevű cég által kifejlesztett flexibilis OLED kijelző



25. ábra – Flexibilis OLED fényforrás

Az átlátszó OLED-ek (TOLED) esetén a hordozó problémáján felül mindkét elektródának átlátszónak kell lennie.

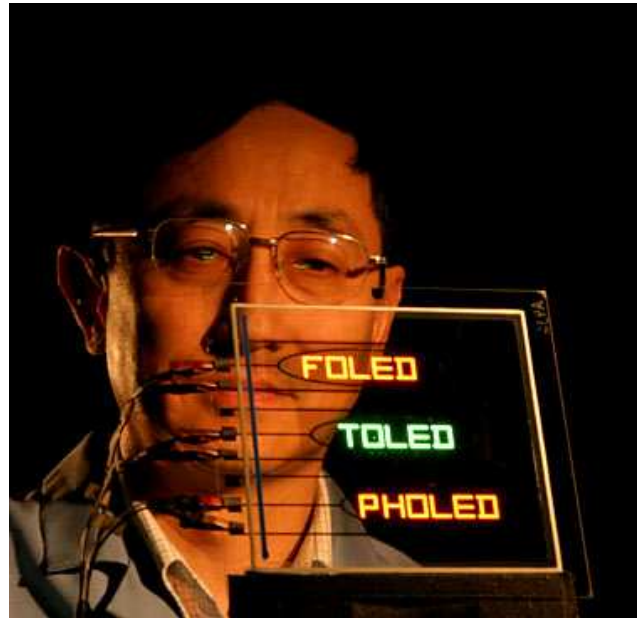


26. ábra – TOLED felépítése. Mind a két elektródának átlátszónak kell lennie

Ennek érdekében a katód is kiképezhető ITO-ból, azonban ez az anyag erre a szerepre, elektrokémiai szempontból nem kimondottan alkalmas, hiszen inkább felel meg lyukinjektáló elektródnak (anódnak) mint negatív elektródnak. Hogy ezt a problémát kiküszöböljék sok esetben igen vékony fémréteget (gőzöléssel felvihető), szilícium réteget, vagy akár vezető polimert is alkalmaznak.



27. ábra – Az OSRAM „átlátszó fényforrása”



28. ábra – A Universal Display kutatója egy különböző technológiával készült átlátszó fényforrásokat bemutató panel mögött áll.

A 27. ábrán látható fényforrás, melyet az Osram cég fejlesztett ki, kikapcsolt állapotában 55-75 százalékos átlátszósággal rendelkezik. A fényhasznosítása eléri a 20 lm/W értéket, a fényűrűsége pedig  $1000 \text{ cd/m}^2$  [20]. A Universal Display cég pedig 70-85 % -os átlátszóságot ért el az általuk kifejlesztett TOLED-ek terén [19].

Az átlátszó kijelzők és fényforrások merőben új lehetőségeket kínálnak, megvalósíthatóak olyan ablakok, térelválasztók, melyek egyébként szinte teljesen átlátszóak, de egy „gombnyomásra kijelzővé, vagy fényforrássá „válnak”.

További érdekes felhasználása az OLED-eknek a kétoldalas kivitel. Ez főként kijelzők esetén előnyös, de könnyen elképzelhető egy olyan fényforrás, ami két ellentétes oldalán más színű/intenzitású fénnel világít. Ezt főként a rendkívül vékony jelleg teszi lehetővé.



29. ábra – Kétoldalas aktív mátrixos OLED kijelző  
Jobb oldalon látható, hogy organikus technológiával milyen vékony házban fér el két egymás mögött lévő kijelző

#### 4.6 OLED-ek hatásfoka

Alapvetően két fő részre osztható az OLED-ek hatásfoka:

- belső kvantumhatásfok  $\eta_{\text{int}}$  (IQE)
- külső kvantumhatásfok  $\eta_{\text{ext}}$  (EQE)

Ez a két érték szabja meg a cella összhatásfokát, és szabja meg az elérhető elméleti fényhasznosítást. A fényhasznosítást mindezekon felül befolyásolja a kibocsájtott fény spektrális eloszlása, valamint az optikai rendszer (lencse, prizma, reflektor, stb..) hatásfoka.

#### 4.6.1 Belső kvantumhatásfok ( $\eta_{int}$ , IQE)

A belső kvantumhatásfokot lényegében az szabja meg, hogy a rendszerbe juttatott töltéshordozók (lyukak-elektron párok) mekkora hányada hoz létre fénykibocsátást [1]. Egyszerűbben fogalmazva, az excitonok aránya a kibocsátott fotonok számához képest, azaz:

$$\eta_{int} = \frac{\text{Az eszköz belsejében létrejövő fotonok száma}}{\text{Rendszerbe juttatott (injektált) lyuk – elektron párok száma}}$$

A fénykibocsátásig, azaz egy foton keletkezéséig alapvetően három lépés zajlik le:

- A gerjesztés hatására létrejön az exciton
- A gerjesztés körülményeitől függően a létrejött töltéspár kvantumállapota vagy szingulett vagy triplett állapotot vesz fel.
- Az exciton jellegétől függően vagy fluoreszcencia vagy foszforeszcencia útján alapállapotba kerül vissza (rekombinálódik), és a gerjesztett valamint az alapállapot közti energiakülönbséget egy foton formájában leadja.

Mindegyik folyamat bizonyos valószínűséggel zajlik le, a kvantummechanika törvényeinek megfelelően, így a belső kvantumhatásfokot e három folyamat valószínűségének szorzata adja.

Az egyik leg-meghatározóbb tényező az  $\eta_{int}$  esetében a szingulett és triplett állapotok aránya, és az, hogy az illető cella mely állapotokból tud fényt nyerni. Általánosságban elmondható, hogy a szingulett állapot az összes gerjesztés kevesebb, mint ¼ -ét teszi ki.

Mivel az OLED-ek többsége kizárólag fluoreszcencia folyamata útján bocsát ki fényt, így ezek  $\eta_{int}$  értéke törvénytörően 25 % alatt mozog. Ez alól azonban kivételt képez a PHOLED, hiszen mind a két gerjesztett állapotot kihasználja, ebből következik a már

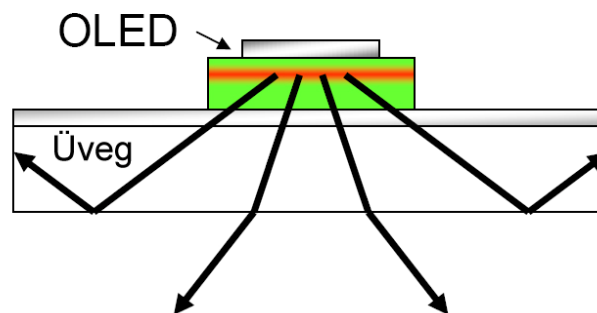
említett, közel 100 %-os belső kvantumhatásfoka. Az IQE értékét csökkentik a triplett-triplett ütközések.

#### 4.6.2 Külső kvantumhatásfok ( $\eta_{\text{ext}}$ , EQE)

Mint láthattuk a PHOLED-nél például 100 % -ot megközelítő belső kvantumhatásfok érhető el. Azonban hiába ilyen jó az illető eszköz belső hatásfoka, ha a keletkező fény nem képes megfelelően kijutni a cellából a kívánt irányba. A keletkező, és „hasznosuló” fotonok (levegőbe kijutó) arányát nevezzük külső kvantumhatásfoknak [1].

Az optikai veszteségek az alábbiakból tevődnek össze:

- Réteghatárokon létrejövő veszteségek (visszaverődések)
- Rétegek fényvezetése (szóródás, abszorpció)



30. ábra – Teljes visszaverődések az üveg hordozó és a levegő határán. Ugyanilyen visszaverődések történnek a cella és a hordozó határán, sőt a cellán belül is.

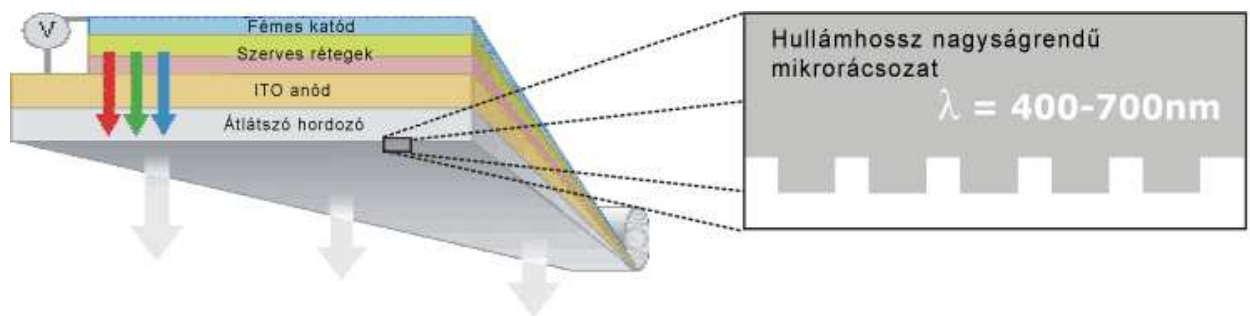
Ezen tényezők közül a legnagyobb súllyal a réteghatárokon létrejövő visszaverődések játszanak szerepet. Ez a típusú veszteség eléri a 80 %-ot, emiatt az egyébként kiváló belső hatásfokkal rendelkező eszköz sem működhet 20 %-nál jobb összhatásfokkal. A további veszteségek már kevésbé jelentősek. Az átlátszó elektródretek átteresztőképessége minden esetben 85 % felett van, általában 90 %. A belső rétegek elnyelése pedig gyakorlatilag elenyésző a rendkívül kicsi rétegvastagság miatt (néhányszor 10 nm, esetleg 100 nm).

A belső reflexióból származó veszteségek kis mértékben csökkenthetőek a rétegek törésmutatójának körültekintőbb megválasztásával, azonban mivel a felhasználható

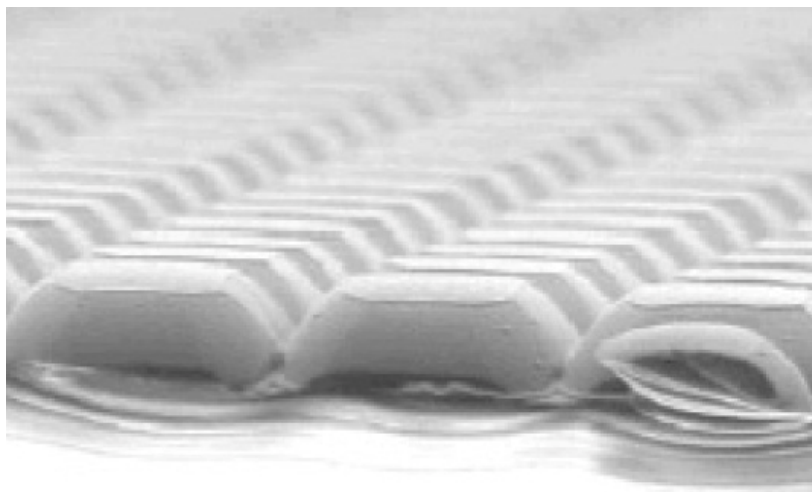
anyagok adottak bizonyos típusú cella előállításához, így itt a variálási lehetőség igen szűkös. Lényegesen jobb eredmények érhetőek el ha a határfelületek jellegét változtatjuk meg.

Erre több lehetőség is kínálkozik:

- Mikrolencsék, mikrobarázdák
- Kvarcüveg mikrogömbök
- Felületérdesítés
- Interferenciaretegek hozzáadása



31. ábra – Külső kvantumhatásfok javítására szolgáló eljárás. A hordozó külső felületén a kilépő fény hullámhossztartományával egy nagyságrendbe tartozó osztású rácsot képeznek ki.



32. ábra –Mikrolencsés felületképzés



### 4.6.3 Fényhasznosítás

Mivel e munka legfőképp az OLED-ek világítástechnikában való alkalmazásával foglalkozik, a fényhasznosítás kérdése mindenképp fontos pontja az organikus fényforrások taglalásának [1].

A fényhasznosítás gyors és egyértelmű megmondója egy fényforrás energia hatékonyságának, és könnyű összehasonlítási alapot teremt a különböző fénykeltési technológiák között.

A fényhasznosítás az alábbi hányadosként írható fel:

$$\eta^* = \frac{\phi}{P} = \frac{\text{Leadott fényáram}}{\text{Felvett elektromos teljesítmény}}$$

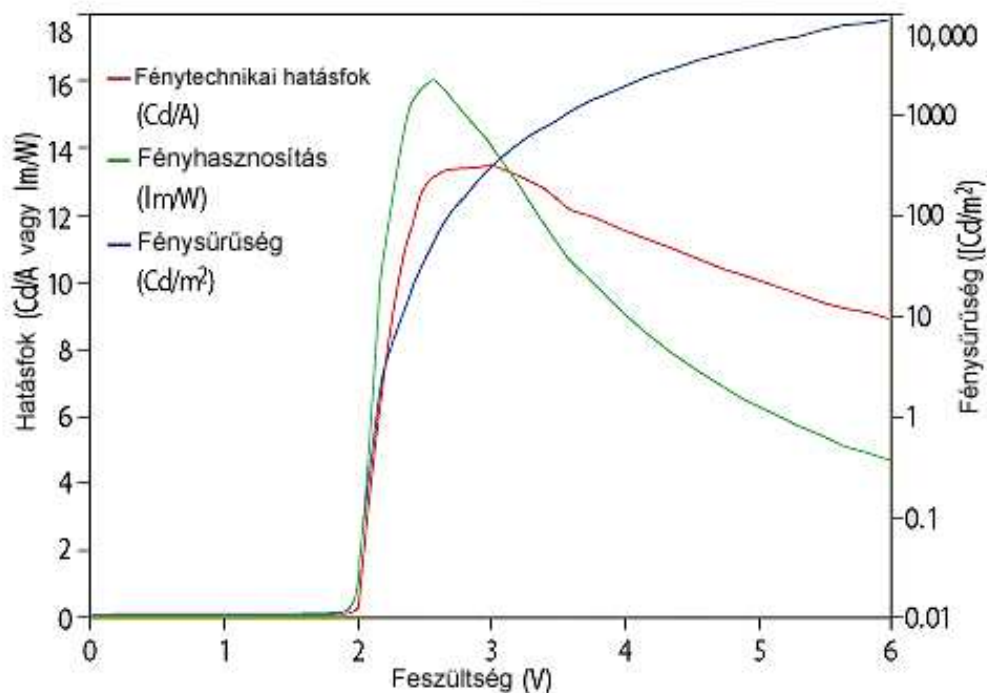
A teljes kvantumhatásfok javításának lehetőségeit már tárgyaltuk az előző alfejezetekben. További hatásfok növekedést a villamos paraméterek javításával tudunk elérni. A sok réteg miatt az OLED-ek jellemzően nagy nyitó illetve működési feszültséggel rendelkeznek. Ennek megfelelően adott munkaponti áram mellett viszonylag nagy a hődisszipáció. Ez határozottan nemkívánatos állapot, de e veszteség csökkentésére léteznek eljárások. Ahhoz, hogy a cella ohmos ellenállása minél kisebb legyen, több út kínálkozik:

- Rétegvastagság csökkentése
- A különböző rétegek közti potenciálgát csökkentése

A rétegvastagság természetesen nem csökkenthető akármeddig, ugyanis ha az excitonok átlagos diffúziós szabad úthossza alá esik, akkor az illető excitonok a szomszédos rétegekbe átdiffundálnak, és fénykibocsájtással nem járó módon szűnnek meg, illetve fehér

emitternél rontják a színhőmérséklet stabilitást. Ennek a hatásnak a csökkentésére szolgálnak a már korábban tárgyalt exciton blokkoló rétegek.

A rétegek közti potenciálgát csökkentésére a legjobb példa talán a LEC. Ahogy láthattuk az ott használt fémsó ionjai szinte nullára redukálják az elektródák és az aktív réteg közötti potenciálgátat, ezzel pedig jelentősen lecsökken a cella működtetéséhez szükséges feszültség. Azonban a hagyományos OLED-eknél is csökkenthető ez a potenciálgát a megfelelő elektróda alapanyag megválasztásával. Ez főleg a katód oldalon érvényes, ahol többnyire Ca, Mg, Li-ot használnak. Anód oldalon meglehetősen szűk korlátokat szab, hogy átlátszónak kell lennie. Az ITO jellemzően viszonylag nagy fajlagos ellenállással rendelkezik. Ez problémát jelent nagy homogén felületű OLED fényforrások előállításánál. Ennek oka az, hogy a nagyobb felület közepe felé haladva a feszültségesésből származó veszteség már látványos fényáram csökkenést eredményez.



33. ábra –OLED jellemző hatások görbéi a feszültség függvényében

A fenti ábrán látható görbék mutatják, hogy milyen jelleggel változnak egy OLED különböző hatások mutatói a rákapcsolt feszültség függvényében. A konkrét értékek igen

szerteágazóak, és sűrűn változnak, azonban a görbék jellege nagyon hasonló minden esetben.

Ugyan nehéz kiemelni egy-egy kísérleti eredményt a kutatások gyors üteme miatt, a jelenleg közzétett, és ezen írás szerzője által ismert, fényhasznosítás fehér OLED-nél 64 lm/W, 1000 cd/m<sup>2</sup> fénysűrűség mellett. Azonban az élettartam (50 % -os fényáram veszteség) csupán 10 000 óra. A jelenlegi fejlesztésekre, és egyéb kísérleti eredményekre egy későbbi fejezetben fogunk bővebben visszatérni.

Ezek a számadatok legalábbis biztatóak, az élettartam várhatóan nőni fog, követve a fényhasznosítás robbanásszerű növekedését. Ez nem csak várható, de szükséges feltétele is az OLED-ek nagyarányú elterjedésének (az olcsó és megbízható tömeggyártás megléte mellett).

## 5. Gyártástechnológiák

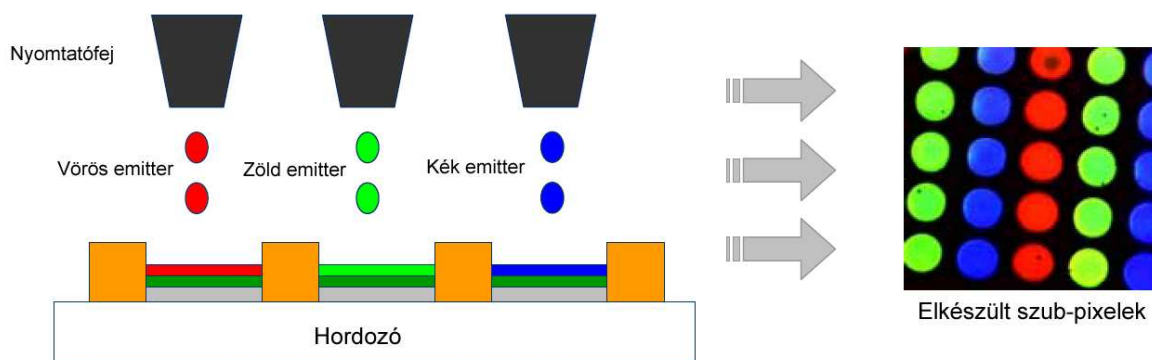
Az előző fejezetben a különböző OLED típusoknál már érintőlegesen tárgyaltuk a különféle gyártástechnológiákat. Ebben a fejezetben az alkalmazott eljárásokról részletesebben esik szó, főként a lehetséges tömeggyártásra koncentrálva, mint fő szempont. Az itt ismertetett gyártástechnológiák nem csupán fénykibocsájtó eszközök előállítására alkalmasak, hanem gyakorlatilag bármilyen makroelektronikai eszköz létrehozásához. A magasan integrált áramköröket ugyanazon a gépsoron bele lehet illeszteni az egyébként polimer alapú áramkörbe, így létrehozva a nyomtatható eszközöket. Az ilyen áramkörökben rejlő lehetőségek rendkívül szerteágazóak.

### 5.1 Tintasugaras eljárás

Elsősorban PLED-ek gyártására alkalmas. A tintasugaras eljárás lényegében ugyanazt a technológiát alkalmazza melyet a már jól bevált tintasugaras nyomtatók. Alkalmas mind merev mind hajlékony felületre való nyomtatáshoz, precíz mivoltából adódik, hogy kijelzők, és polimer alapú elektronikai alkatrészek gyártására egyaránt használható, és természetesen fényforrásokéra is [1] [11] [19].

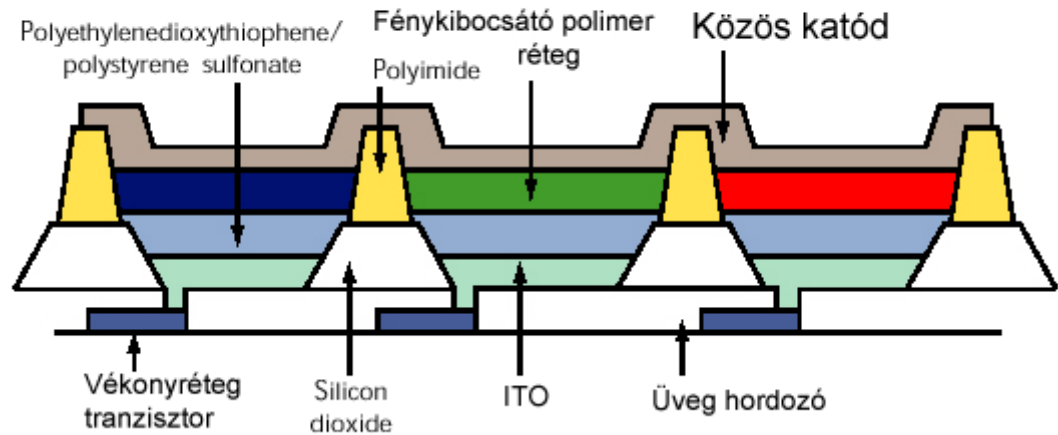
### 5.1.1 A gyártás folyamata

A gyártósorra az ITO bevonattal ellátott hordozó (például üveg) készen kerül be. Ugyanezt a hordozót használják az LCD kijelzőkhöz is, így könnyen és olcsón beszerezhető. A hordozót ezután megtisztítják. Kijelző esetén a hordozóban már előre kiképzett „üregek” vannak, a pixelek számára. A tisztítás után a nyomtatóba kerülnek a lapok, ahol igen precízen minden egyes pixelbe a megfelelő mennyiségű polimer oldat kerül. Ezt a kemence követi, ahol elpárologtatják az oldószert. Ez után ismét nyomtatásra kerül sor, hogy a következő réteg polimer is a helyére kerüljön, majd ismét a kemencébe kerülnek a lapok.



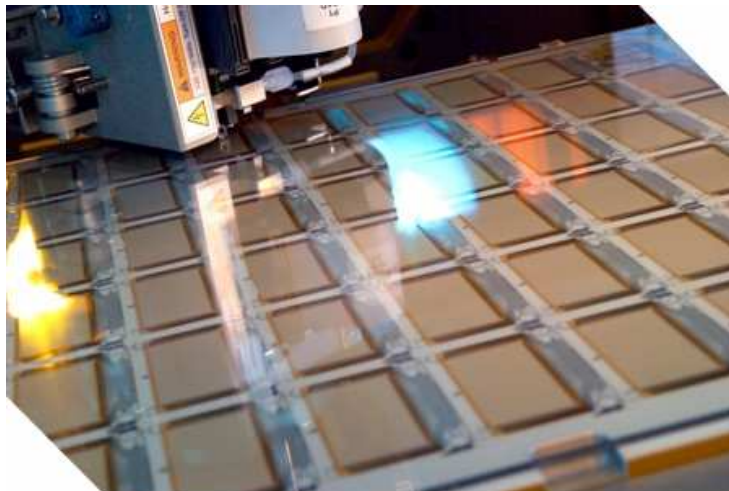
34. ábra –Cellák nyomtatása tintasugaras eljárással

A fenti folyamat (nyomtatás, „beégetés”) annyiszor ismétlődik, ahány rétegre szükség van. A rétegek nyomtatása után a félkész termék egy vákuumkamrába kerül, ahol rápárologtatják a katódot (pl.: Ba Al ötvözet). Ezután többrétegnyi szilícium nitrid, illetve szerves összetevő réteg kerül az eszközökre (szintén vákuumban), ezzel tulajdonképpen „becsomagolva” a cellákat. A vákuumból való kikerülés után még egy réteg kerül a felületre, a fizikai behatások elleni védelem érdekében.

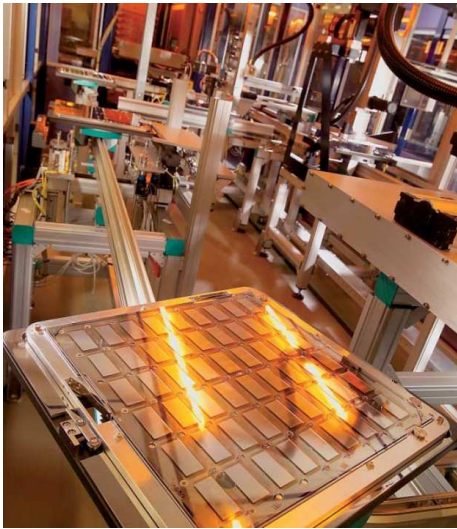


35. ábra –Vákuumgőzöléssel felvitt katóddal rendelkező PLED szub-pixelek egy AMOLED (Active Matrix OLED) kijelzőben.

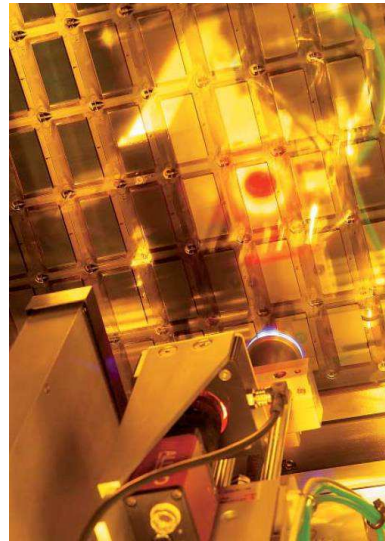
Utolsó lépésként feldarabolják az üveg hordozót, szétválasztva a késztermékeket. Az OTB Display nevű cég által kidolgozott teljesen automatizált, és távvezérelt gépsor kijelzők előállítására készült, de jól mutatja a tintasugaras technológia lehetőségeit. Azáltal hogy integrált, lineáris („futószalagos”) rendszert alakítottak ki, szükségtelenné vált az ún. tiszta szobák használata, amivel a gyártás költségeit jelentősen csökkentették [11].



36. ábra –A nyomtatófej, amint a kijelzők nyomtatását végzi az integrált gyártósoron



37. ábra –Munkatálca a PLED gyártósoron



38. ábra –Technológiai lépés a PLED kijelzők gyártása során

Ennek a gyártási folyamatnak előnye a nagy precizitás, a könnyű kézben tarthatóság, és a viszonylag nagy átbocsájtó képesség. Az SM OLED-ek gyártásához képest lényegesen kevesebb lépésnél van szükség vákuumra, ez gyorsít a folyamaton, és olcsóbbá is teszi azt.

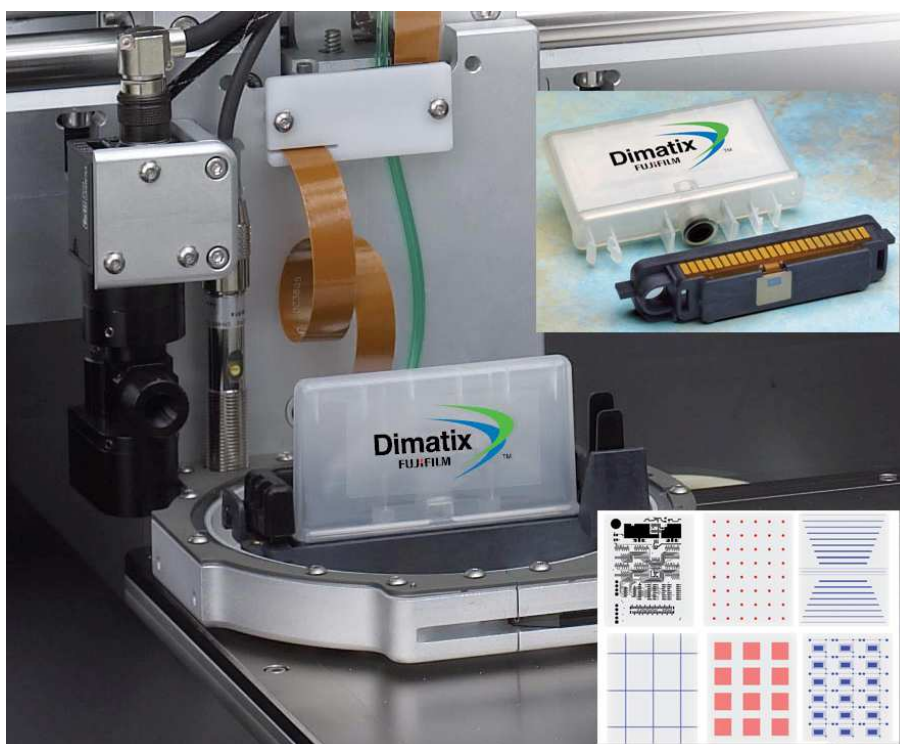
Itt érdemes említést tenni a Dimatix nevű cég termékéről, mely egy tintasugaras asztali nyomtató [21]. Ez önmagában nem volna újdonság, azonban ez a nyomtató kifejezetten a legkülönbözőbb vegyi anyagok bizonyos hordozókra való precíziós felvitelére készült, elsősorban laboratóriumok számára.

Néhány jellemző adat:

- 200 x 300 mm nyomtatási felület
- 5-254  $\mu\text{m}$  pontméret
- $\pm 25 \mu\text{m}$  pontosság („megismételhetőség”)
- Széles nyomtatható-anyag támogatás (szerves, szervetlen, fémes oldatok)
- Egyszerű és gyors kezelhetőség



39. ábra –Dimatix nyomtató. A hordozót tartó felület fűthető, valamint vákuummal rögzíti a hordozót (illetve hajlékony anyagoknál ki is simítja).



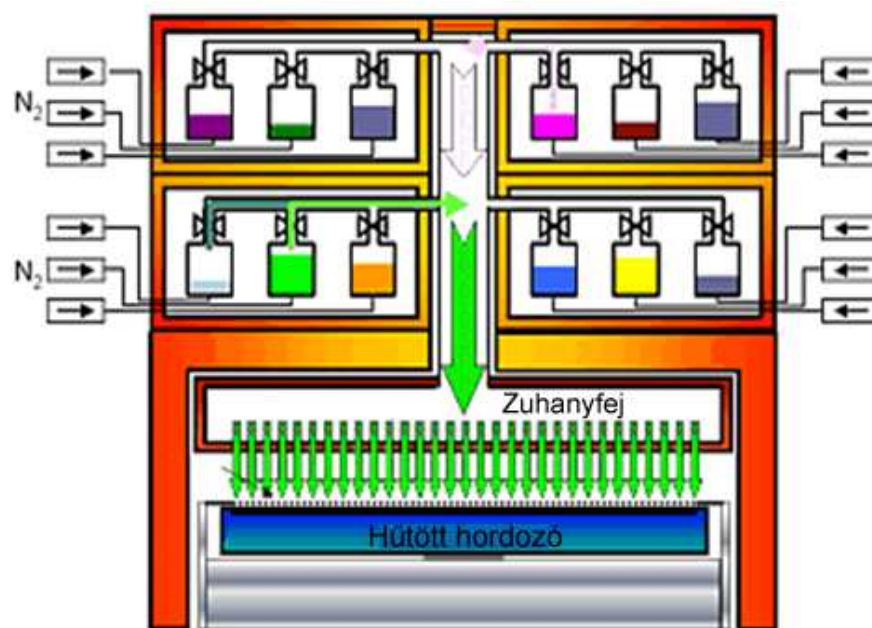
40. ábra – A patron illetve nyomtatófej. A tárol 1,5 ml űrtartalommal rendelkezik. A fej piezo alapú MEMS (micro electro-mechanical system) technológiát alkalmaz.

## 5.2 Vákuumgőzölés

A vákuumgőzöléses eljárást az SM OLED-ek előállításában alkalmazzák. Célja, hogy az elpárologtatott molekulák, a megfelelő rétegsorrendben, a megfelelő helyre kerüljenek a hordozón [2].

A sorrend betartása egyszerű, hiszen csupán a gőzöléses eljárás során kell egymás után adagolni az anyagokat. Az OLED-eknél használatos vákuumgőzölés azonban jelentősen különbözik az iparban „megszokottól”. Itt nincs szükség arra, hogy az átlagos szabad úthossz méteres nagyságrendűre növeljük.

Mint az alábbi ábrán is látható, a különböző felviendő anyagok külön tárolókban helyezkednek el, melyeket felmelegítenek. Ezután nitrogént buborékoltatnak át az illető anyagon, kinyílik a megfelelő szelep, és a molekulák a vákuumtérbe kerülnek (itt még tovább keveredhetnek más elpárologtatott molekulákkal), ahol miután áthaladnak egy szitán, melynek feladata az egyenletes anyagelosztás, rákerülnek a hordozóra.



41. ábra – Rétegvivő berendezés sematikus ábrája



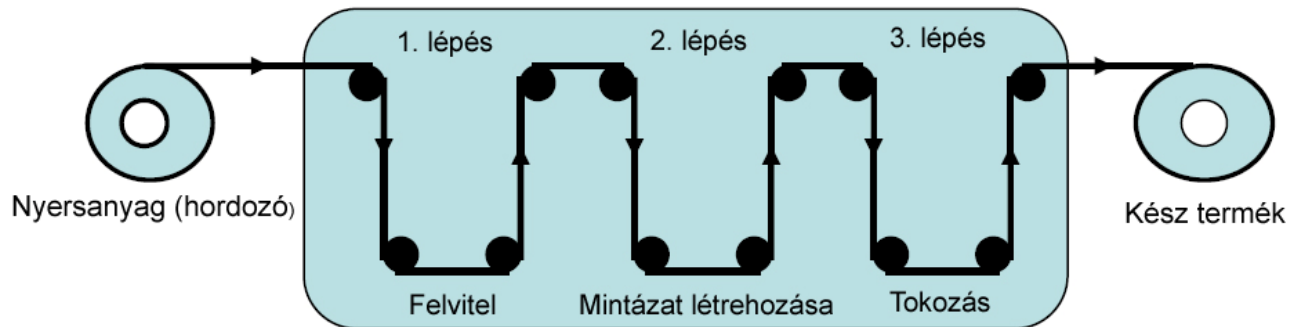
Ahogy az elgőzöltetett molekulák a „hideg” hordozóhoz érnek, kicsapódnak, és egyenletes réteget képeznek. Miután elérik a megfelelő rétegvastagságot, a munkadarab továbbhalad, és felgőzölik rá a következő réteget. Ez a folyamat annyiszor ismétlődik, ahány rétegre szükség van. Amennyiben mintázatot (és nem csak egybefüggő réteget) szándékoznak előállítani, akkor például maszkolást alkalmaznak, de létezik fotolitografikus gyártási eljárás is, ahol meglévő rétegből marnak le. Az eljárás sajátosságai miatt a gyártás körülbelül kétszer annyi időt vesz igénybe azonos felületek előállítása számára, mint a tintasugaras eljárás a PLED-ek esetén.

### 5.3 Roll – to – Roll

Jelen pillanatban a leg-ígéretesebb gyártástechnológia a nyomtatott elektronikus eszközök területén, legyen szó kijelzőkről, fényforrásokról, vagy komplett készülékekről [2].

Az eljárást különböző iparágakban már sikeresen alkalmazzák hosszú ideje. Elsősorban a nagy volumenű nyomdaipar részesíti előnyben, hiszen rendkívül alacsony fajlagos költséggel, és nagyon magas termelékenységgel rendelkező technológia.

Maga a fogalom „roll-to-roll” önmagában nem utal arra, hogy milyen eljárással kerül pontosan a kívánt mintázat a felületre, csupán a gyártás jellegét mutatja. Eszerint a flexibilis hordozó egy dobról „letekeredve” kerül be a gépsorba ahol ez a hordozó szalag számos görgőn halad keresztül, miközben rétegenként rákerül a kívánt mintázat, általában egy ún. mintahengerről, de ez lehet akár egy sor tintasugaras fúvóka is melyek nagy sebességgel nyomtatnak az előttük elhaladó szalagra, majd a késztermék egy másik hengerre „feltekeredik”.



42. ábra – A Roll-to-Roll eljárás egyszerűsített sémája

2006-ban a Svéd Linköping egyetem és az Acreo Intézet közös fejlesztéséből született egy ilyen, nagy átbocsájtású berendezés, mely szerves félvezető alkatrészek gyártására fejlesztettek ki. Különböző 2-3 rétegű alkatrészeket, például OFET (organikus FET) eket, OLED-ek, illetve ezek rendszerének nyomtatására alkalmas, papír valamint műanyag

hordozókra. A nyomtatás alapvetően három lépésben zajlik:

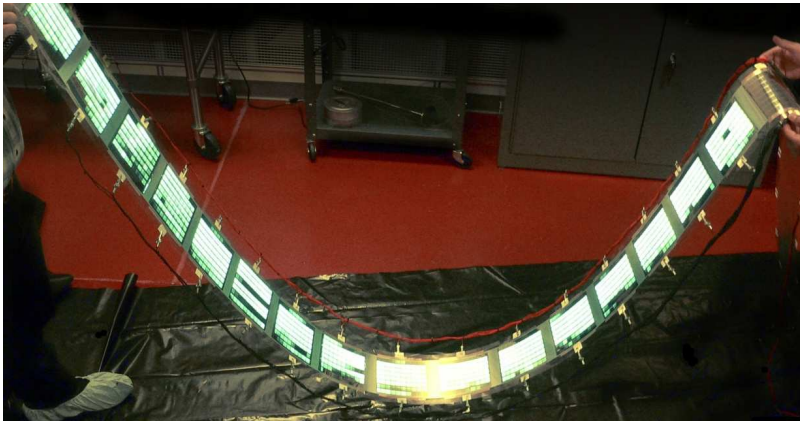
- Vezető/félvezető rétegek
- Elektrolitikus átvezető rétegek
- Fedőréteg

Szubsztraktív illetve additív „mintázást” alkalmaz, forgó mintahengerek illetve, forgó maszkok segítségével. Az így elérhető fajlagos költség rendkívül alacsony, csupán 1 USD / A5 lap.



43. ábra – Fent: A Linköping egyetem és az Acreo Intézet által közösen fejlesztett Roll-To-Roll rendszerű gépsor.

Már zajlanak a fejlesztések az új berendezés kapcsán, mely az energiatároló elemet is beleintegrálná áramkörbe a gyártás folyamán. A GE, mint már korábban említettük, sikeresen demonstrált egy PLED –ek gyártására alkalmas Roll-To-Roll eljárást [22].

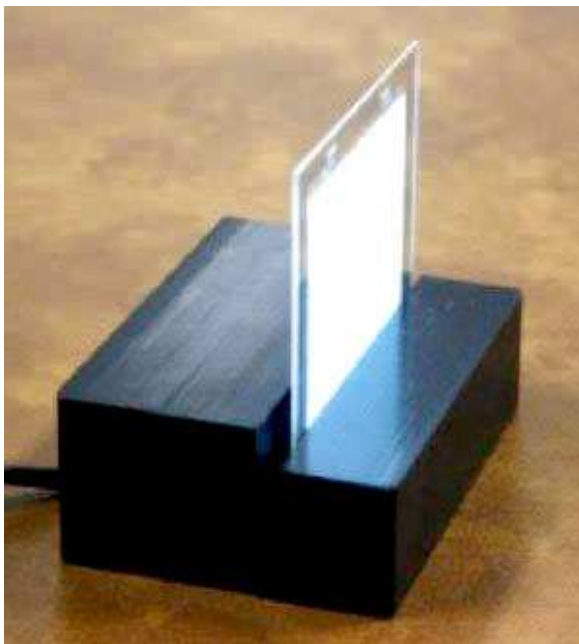


44. ábra – A GE Roll-to-Roll eljárással előállított OLED „szalagja”

## 6. Az OLED-ek jelene

A jelen fejlesztések mind a kijelzők, mind a fényforrások terén gőzerővel folynak. Ezzel párhuzamosan arra irányuló kutatóprogramok is születtek, melyek célja, hogy olcsó nagy

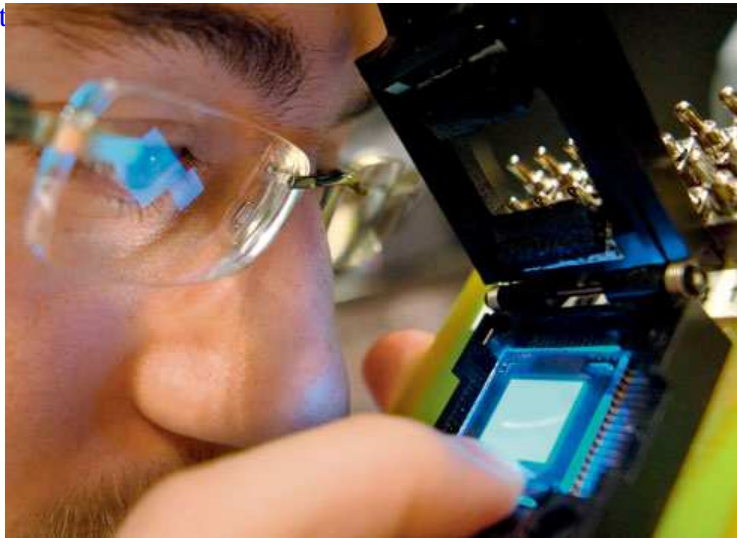
mennyiségben előállítható ún. nyomtatható eszközök valósulhassanak meg [19].



45. ábra – A Konica Minolta 64 lm/W –os OLED prototípusa

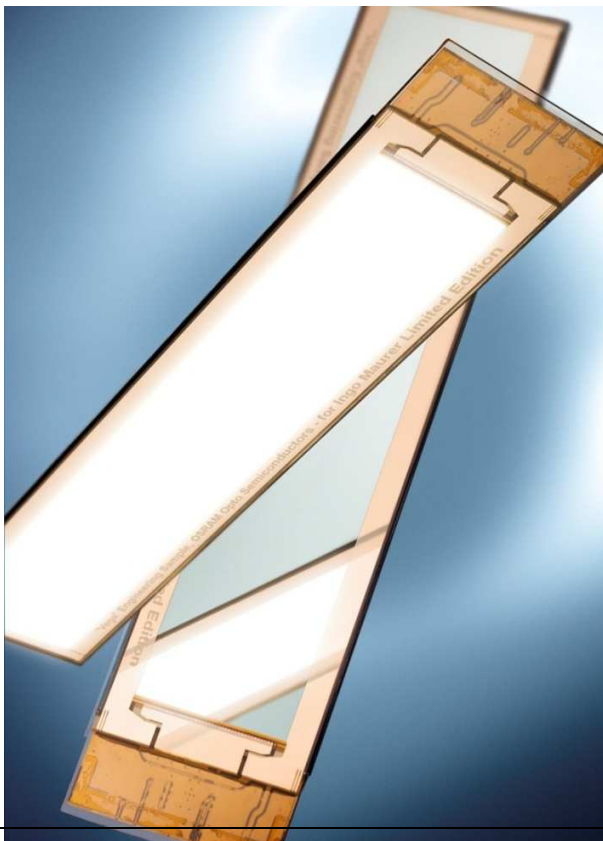
Ahogy már korábban említettük, a jelenleg (a szerző által) ismert legnagyobb fényhasznosítással rendelkező OLED-et a Konica Minolta állította elő (lásd baloldalon). 64 lm/W -ot érték el, 10 000 órás (50 % fényáram csökkenés) élettartam mellett. Mind az Osramnál (lent), mint a GE-nél, és még több nagynevű cégnél komoly projektekbe kezdtek bele, melyek

célja főként az élettartam és a fényhasznosítás növelése. Jelen írásban csak néhány szám adatot mutatunk [19].



45. ábra – Az Osram egyik kutatója vizsgál egy OLED prototípust

Komoly előrelépést jelent, még ha reprezentatív is, az Osram részéről, hogy 2008 elején megjelentek a piacon egy OLED-es design lámpával. A készülék korlátozott mennyiségben kapható, élettartama csupán néhány ezer órában mérhető, és a fényhasznosítása is mindössze 10 lm/W [19].



46. ábra – Ingo Maurer designer által kitalált OLED technológiát alkalmazó asztali lámpa, az „Early Future”

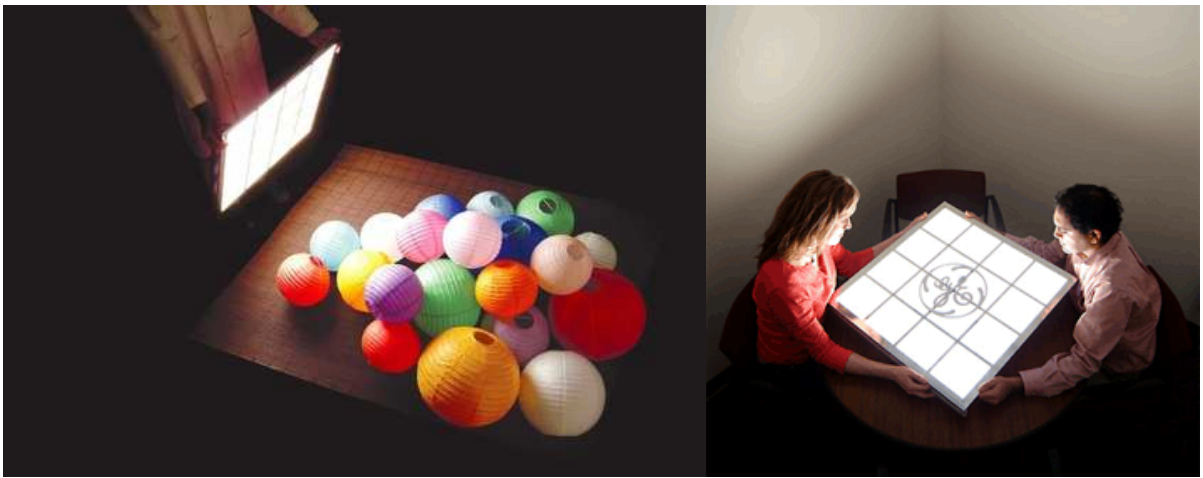
Az apró „fát” formázó világítótestet Ingo Maurer álmodta meg. A „levelek” mérete 113x33 mm, és alig több mint 1 mm vastagok, 10 db található belőlük a „törzsön”. Az alkotás neve, találóan, „Early Future” azaz „Korai Jövő”, utalva a technológiában rejlő lehetőségekre.

Szintén a design világítás piacán jelent meg Jonas Samson tervező „világító tapétája”, mely egészen különleges új beltéri környezetek kialakítását teszi lehetővé [23]. Ugyan az „alkotás” egyelőre kuriózum, minden arra mutat, hogy az elterjedése néhány éven belül nagy lendületet vehet, hiszen az előállítási költségek csökkenése, a fényhasznosítás növekedése várható, könnyen lehet, hogy az ilyen fényforrások tömegtermékké válnak.



47. ábra – A Jonas Samson féle tapéta, kiöltöje társaságában. A padlóból „kinövő” mintázat nem egyszerre jelenik meg, hanem szó szerint „növekszik”. Kikapcsolt állapotában gyakorlatilag nem különböztethető meg a fényforrás a tapéta anyagától.

Míg az Osramnál az SM-OLED-ek felé, addig a GE-nél az OLED-ek fejlesztése főként a PLED-ek irányába mozdult el, elsősorban a gyártástechnológiai megfontolások miatt. Az elmúlt 14 évben mindvégig a célok között volt a Roll-to-Roll technológia alkalmazása OLED-ek gyártása terén, és mint ismeretes, ezt többé-kevésbé, bár még viszonylag nagy hibaarányal, a cég demonstrálta is.



48. ábra – A GE által kifejlesztett fehér OLED panelek. Az ilyen típusú fényforrásokkal különböző kísérletek során már 90 feletti CRI értékeket értek el.

Jelen pillanatban az OLED technológia legnagyobb piaca a kijelző ipar. Az előnyök közé tartozik:

- Alacsony gyártási költség. Az LCD kijelzők háttérvilágítása és maga a folyadékkristály rétegek a készülék költségének mintegy felét teszik ki.
- Rendkívül nagy (1 000 000:1) kontrasztarány
- Nézési iránytól független láthatóság
- Nagy fénysűrűség



49. ábra – Az Optimus Maximus billentyűzet. Minden egyes gombban egy parányi OLED kijelző található, melyek szabadon konfigurálhatóak egy szoftver segítségével

A Sony cég 2008 elején bocsátotta piacra 11 inch képátlójú OLED képernyőjét, az XEL-1 TV-t [19]. A mindössze néhány mm vastagságú megjelenítő az ún. AMOLED (Active Matrix OLED) technológiát alkalmazza. Ennek lényege rendkívül hasonló az aktív mátrix rendszerű LCD kijelzőkéhez. Minden egyes elemi képponthez egy integrált kapcsolóelem (tranzisztor) tartozik. Ezt a szerkezetet már láthattuk a Gyártástechnológiák című fejezetben a PLED kijelzők előállítására kapcsán (12. ábra). A Sony állítása szerint a képernyő élettartama 30 000 óra (50 % fényáram csökkenésig), azonban független mérések ettől jelentősen eltérő értékekre utalnak. Ezek szerint folyamatos fehér fény kibocsátása esetén csupán 5000 óra az élettartam, míg átlagos „video” felhasználásban 17 000 óra, bár ezt a Sony „hazugságnak” nevezi. Mindezen felül, a kompozit (R, G, B) fehér OLED-ek re jellemző differenciális öregedés figyelhető meg. 1000 üzemóra után a kék szín fényárama 12 százalékkal, a vörösé 7 százalékkal, míg a zöldé 8 százalékkal csökkent. Ez nyilvánvalóan színeltolódáshoz (fehérpont eltolódás) vezetne. A gyártók egyelőre ezt úgy küszöbölik ki, hogy a berendezésbe kompenzációs áramköröket építenek, melyek a működés során, ismert görbék segítségével, a szubpixelek fényerejét hozzáigazítják az öregedéshez. Mindez nem valószínű, hogy változni fog, amíg a kék komponens élettartamát nem sikerül jelentősen megnövelni.

Több cég is részt vesz a minél nagyobb, és minél hosszabb élettartamú OLED kijelzők piacán folyó harcban. Fel-feltűnnek 30-40 inch-es képátlójú prototípusok, azonban ezekre a piacon még várnunk kell.



50. ábra – Sony XEL-1

## Forráslista

- [1] Gröller György, Nemcsik Ákos – Polimer alapú színes kijelzők és fényforrások
- [2] Gröller György – Polimer Elektronika ea.
- [3] Konarka Technologies, Inc. – From Light to Power ea.
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_light-emitting\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_light-emitting_diode)
- [5] <http://webpages.charter.net/dmarin/coat/>
- [6] <http://www.olympusmicro.com/primer/java/jablonski/jabintro/>
- [7] <http://www.photonics.com/content/spectra/2006/May/LED/82585.aspx>
- [8] [http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7086/fig\\_tab/nature04645\\_F3.html](http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7086/fig_tab/nature04645_F3.html)
- [9] <http://home.dei.polimi.it/sampietr/polymer/LEC1.html>
- [10] <http://www.grcblog.com/?cat=19>
- [11] <http://www.otbdisplay.com/display/>
- [12] <http://www.ledsmagazine.com/news/5/5/6>
- [13] [http://www.netl.doe.gov/ssl/highlights\\_UDC07.htm](http://www.netl.doe.gov/ssl/highlights_UDC07.htm)
- [14] [http://www.netl.doe.gov/ssl/highlights\\_cree06.htm](http://www.netl.doe.gov/ssl/highlights_cree06.htm)
- [15] [http://www.netl.doe.gov/ssl/highlights\\_PNNL06.htm](http://www.netl.doe.gov/ssl/highlights_PNNL06.htm)
- [16] <http://www.hitech-projects.com/euprojects/olla/index.html>
- [17] <http://www.electronicweekly.com/Articles/2005/11/23/36957/efficiency-of-spray-on-polymer-solar-cell-hits-6.htm>
- [18] <http://www.plastemart.com/upload/Literature/nanotechnologypolymerbattery.asp>
- [19] <http://www.oled-info.com/>
- [20] [http://www.osram-os.de/osram\\_os/EN/News\\_Center/Spotlights/Technology/Transparent-OLED-lighting-sets-new-record.jsp](http://www.osram-os.de/osram_os/EN/News_Center/Spotlights/Technology/Transparent-OLED-lighting-sets-new-record.jsp)
- [21] <http://www.dimatix.com/>
- [22] [http://aiche.confex.com/aiche/2006/preliminaryprogram/abstract\\_52209.htm](http://aiche.confex.com/aiche/2006/preliminaryprogram/abstract_52209.htm)
- [23] <http://www.jonassamson.com/>