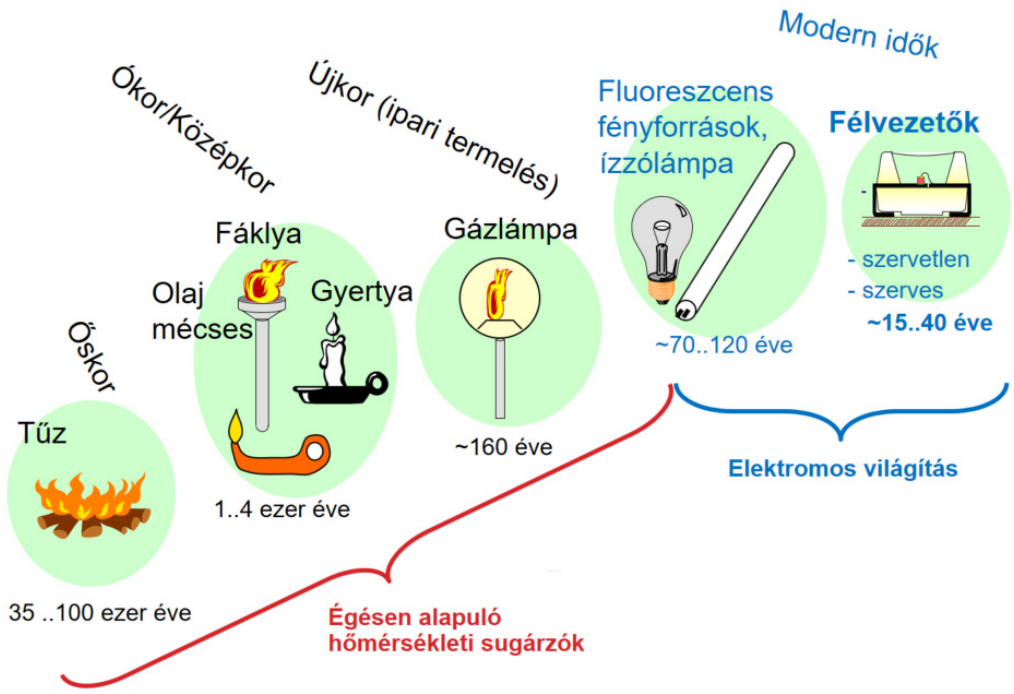
A LED, mint fényforrás

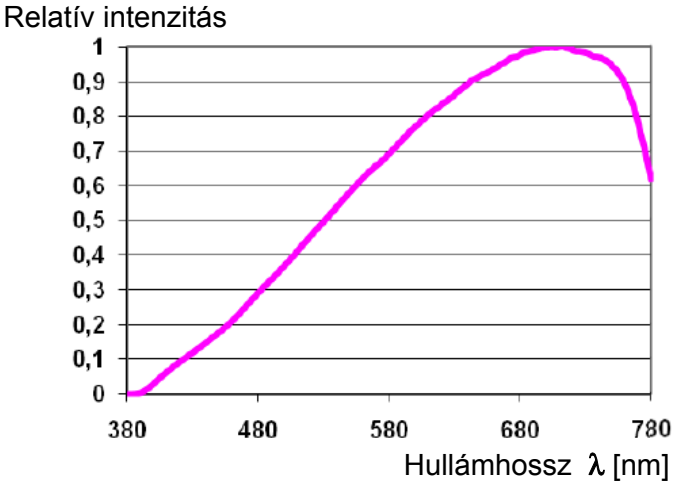
1.1. Rövid történeti áttekintés



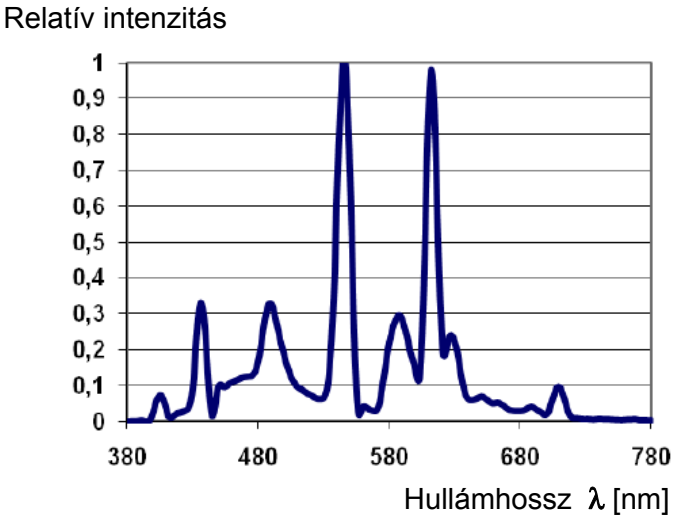
1. ábra – A mesterséges világítás fejlődése

A mesterséges világítás szinte az emberiséggel egyidős; ennek legújabb fejezetét alkotja az elektromos világítás, azon belül is a félvezető eszközök, mint fényforrások alkalmazása (1. ábra).

Az ún. hőmérsékleti sugárzók vagy fekete test sugárzók által kibocsájtott elektromágneses sugárzás a sugárzó test hőmérsékletétől függ, ezt az összefüggést az ún. Planck-törvény írja le [1]. Minél magasabb a sugárzó test hőmérséklete, annál rövidebb hullámhossznál található a sugárzás spektrumának maximuma. Sokak által ismert a vörösen vagy fehéren ízzó vas. Az izzólámpák esetében is hasonló jelenséget tapasztalunk, de a tűz helyett a lámpán átfolyó elektromos áram melegíti az ízzószálat. A klasszikus ízzólámpák wolfram spiráljának hőmérsékletéhez képest a halogénlámpák ízzószála magasabb hőmérsékletű, így azok egy picit "fehérebb" fényt sugároznak ki, mint a (mára már a kereskedelmi forgalomból kivont) normál ízzólámpák. Minden ízzólámpának azonban az a legnagyobb problémája, hogy hőmérsékleti sugárzók lévén, a teljes elektromágneses spektrumban sugároznak, kisugárzott teljesítményüknek csak egy hányada esik az emberi szem által is látható tartományba, teljesítményük tekintélyes részét infravörös sugárzás (hősugárzás) formájában bocsájtják ki. Emiatt hatásfokuk, illetve az ún. fényhasznosításuk nagyon rossz, az előbbi 5%, utóbbi 8-10 lm/W körüli. Egy ízzólámpa sugárzásának a látható tartományba eső relatív spektrális teljesítményeloszlását láthatjuk a 2a. ábrán.



a)



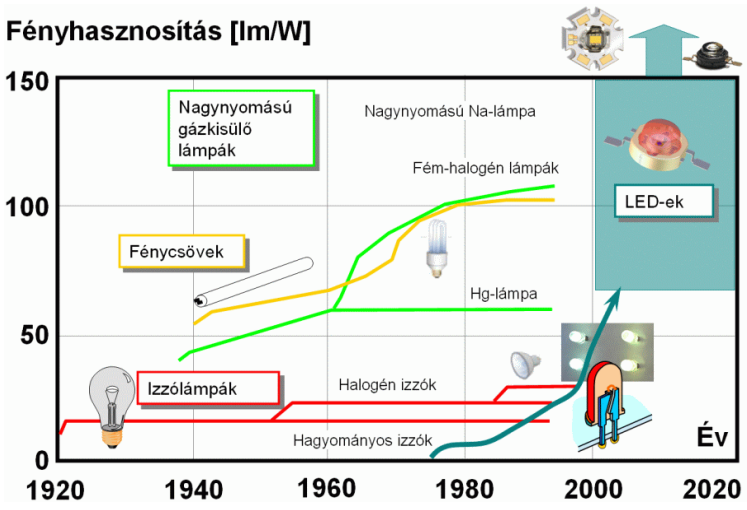
b)

2. ábra – Hagyományos fényforrások relatív spektrális teljesítményeloszlása: a) ízzólámpa, b) kompakt fénycső

Az energiakonverziós hatásfokot, illetve a fényhasznosítást a gázkisülés, mint jelenség alkalmazásával sikerült az ízzólámpákhoz képest jelentősen növelni. Az alapjelenség az, hogy egy gáztérben az elektromos áram hatására a gáztér atomjai gerjesztődnek, azaz külső elektronhéjukon (lásd a 6a. ábrát) lévő elektronjaik egy magasabb energianívójú pályára kerülnek. Amikor ezen magasabb energiaszintről a gerjesztett elektronok visszajutnak alapállapotukba, a két energiaszint különbségének megfelelő energiát egy foton formájában kisugározzák. A fényforrások esetében igen széles körben a higany gőzében így keletkező sugárzást használják (higanygőz lámpák, fénycsövek, kompakt fénycsövek). A higanygőzben tapasztalható gázkisülés során keltett fotonok hullámhossza jórészt az UV tartományba esik (bár vannak a látható tartományba eső spektrumvonalak is, de azok intenzitása az UV tartományba esőkhöz képest csekély). A keltett UV sugárzást fényporral konvertálják a látható tartományba eső fénnyé. Ebben az esetben is jellemzően néhány hullámhosszon van számottevő sugárzás (2b. áb-

ra), de a fénypor által kisugárzott fényt az emberi szem fehérnek érzékeli. Az ízzólámpákhoz képest hatalmas előny, hogy a keltett elektromágneses sugárzás legnagyobb része látható fény, de a gázkisülő lámpák is magas hőmérsékleten üzemelnek, a betáplált elektromos teljesímény egy jelentős hányada továbbra is veszteségi hővé alakul. Mindent egybevetve azonban, a gázkisülő lámpák hatásfoka, illetve fényhasznosítása messze meghaladja az ízzólámpákét.

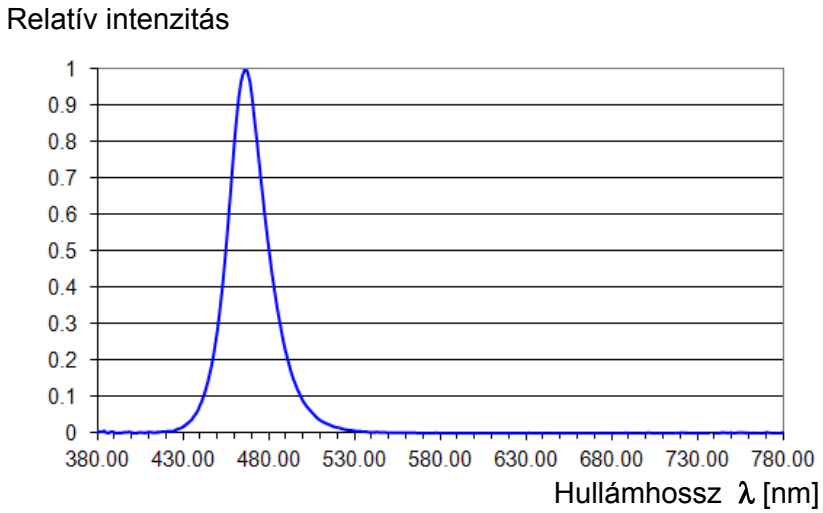
A fényforrásiparban a forradalmi változást az jelentette, amikor (az elektronikához hasonlóan) a vákuumtechnikát kiváltotta a félvezető technológia: ahogy az elektroncső vákuumtérében mozgó elektronok helyett egy tranzisztor esetében egy félvezető egykristályban mozgó elektronokat vezérlünk, ugyanígy, a gázkisülés során a gáztérben keletkező gerjesztett elektronok helyett egy félvezető dióda esetében az alkalmas félvezető egykristályban található gerjesztett állapotban lévő elektronok relaxációja révén keletkező fotonokat hasznosítjuk. Az ilyen félvezető diódákat nevezzük LED-eknek. A LED-ek minden olyan előnnyel rendelkeznek a gázkisülő lámpákkal szemben, mint amilyen előnnyel a tranzisztorok rendelkeztek az elektroncsövekkel szemben: kisebb méret, kisebb fogyasztás, nagyobb megbízhatóság, kisebb előállítási költség… Amint tehát a LED-ek fényhasznosítása meghaladta a hagyományos fényforrások fényhasznosítását (3. ábra), megállíthatatlanná vált térhódításuk a világítástechnikában. Félvezető egykristályokban kialakított fénykibocsájtó diódák segítségével majdnem monokromatikus fényt lehet kelteni: a (színes) LED-ek sugárzási spektruma egy igen szűk hullámhossz tartományba esik. Ennek megvan az az előnye, hogy egy LED által kisugárzott elektromágneses sugárzás teljes egészében látható fényként áll rendelkezésre (4. ábra).



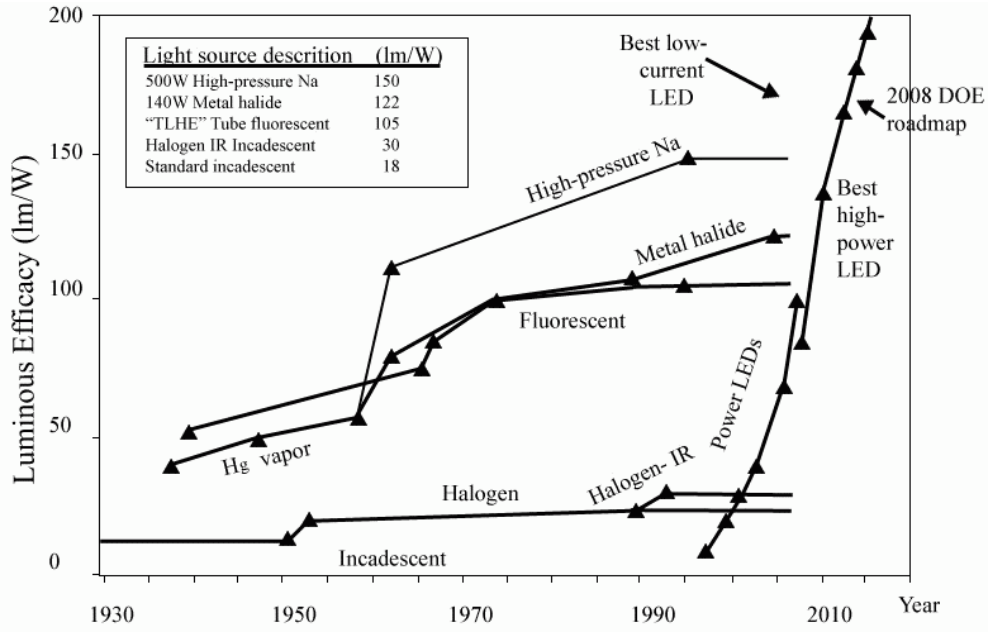
3. ábra – A LED, mint fényforrás betörése a világítástechnikába a hagyományos fényforrások fényhasznosításának lekörözésének volt köszönhető

A LED-ek fejlesztésének 1962-ben elindult története arról szólt, hogy miképp sikerül olyan félvezető eszközkonstrukciót kialakítani, amelyben a betáplált elektromos teljesítmény révén keltett fényteljesítmény messze meghaladja a hőként

eldisszipált veszteséget. 2000. táján sikrült leköröznie az ízzólámpákat, mára pedig, az előrejelzéseknek megfelelően (5. ábra), a nagy intenzitású gázkisülő lámpákkal vetekszenek a LED-ek.



4. ábra – Egy kék LED relatív spektrális teljesítményeloszlása



5. ábra – Egy 2008-ban publikált előrejelzés a LED-ek fényhasznosításának várható növekedéséről (forrás: Lumileds)

A félvezető egykristályban fehér fényt természetesen nem tudunk előállítani, így a fluoreszcens fényforrások esetében bevált fényporos konverziót alkalmazzák: egy kék fényű LED lapka sugárzásának egy részét alkalmas fényporral nagyobb hullámhosszúságúvá konvertálva keletkezik a fehér érzetet keltő sugárzási spektrum.

1.2. A LED-ek működésének fizikai alapjai – a kezdetek

Napjainkban kevés olyan műszaki újdonság van, amelyről annyi szó esnék, mint a fénykibocsájtó, vagy fényemittáló diódáról (angolul: ***l**ight **e**mitting **d**iode*, azaz röviden: LED). Ebből következik, hogy mind a nyomtatott, mind az elektronikus sajtóban igen nagyszámú olyan közlemény jelenik meg, amely nemhogy a szakszerűséget nélkülözi, hanem téves információt is terjeszt. Ezek részben a LED-ek fizikai működésének nem pontos ismeretében, részben tulajdonságaik túldicsérésében jelentkeznek. Elöljáróban le kell szögezni, hogy **a LED nem izzó és nem égő**. A LED egy olyan félvezető eszköz, amelyben az optikai sugárzás energiája közvetlenül keletkezik az elektromos energiából. Ezt a jelenséget a fizika *hidegen sugárzásnak vagy lumineszcenciának* nevezi, s mivel villamos energia hatására jön létre, *elektrolumineszcencia* a neve.

Az elektrolumineszcencia egyik első leírása az angliai Henry Joseph Roundtól származik, aki az akkortájt született új, nagy keménységű mesterséges anyagot, a szilíciumkarbidot (SiC), más néven a korundot (*carborundum*) vizsgálta abból a szempontból, hogy vajon az használható lenne-e kristály detektorként, azaz a korabeli rádiókészülékek egyenirányító eszközeként. Round vizsgálatai közben furcsa fényjelenséget tapasztalt, mit sem sejtve, hogy az első ún. Shottky átmenetes világító diódákat készítette el. A később elektrolumineszcenciának elnevezett fényjelenségről Round 1907-ben az *Electrical World* c. folyóiratban számolt be. A SiC diódák története a Szovjetunióban folytatódott, ahol egy nagyon tehetséges fiatal tudós, Oleg Vlagyimírovics Loszev 1923 és 1924 között szilíciumkarbid diódákkal foglalkozott: megmérte azok feszültség-áram karakterisztikáját és feltárta azt, hogy az észlelt fényjelneség nem hőmérsékleti sugárzás. Loszev eredményeit 1927-ben publikálta és az általa konstruált világító diódát 1929-ben a Szovjetunióban szabadalmaztatta.

A fénykibocsájtó diódák felé az 1950-es években fordult újból a kutatók figyelme, ami azt eredményezte, 1962-ben az USA-ban már megindult a vörös fényű LED-ek gyártása, melyeket elsősorban kijelzőként alkalmaztak. A szilárdtest fizikai kutatások nyomán megszülettek a zöld, sárga, az ún. *homo átmenetes* kék, majd az ún. *hetero átmenetes* kék LED-ek, majd ezeket alapul véve a fényporos fehér LED-ek. Az ezredfordulóra bizonyossá vált, hogy egyes igen kedvező paramétereiknek (hosszú élettartam, nagy megbízhatóság) köszönhetően a LED-ek alkalmazási területe kibővül és a világítástechnikában is helyet követelnek maguknak.

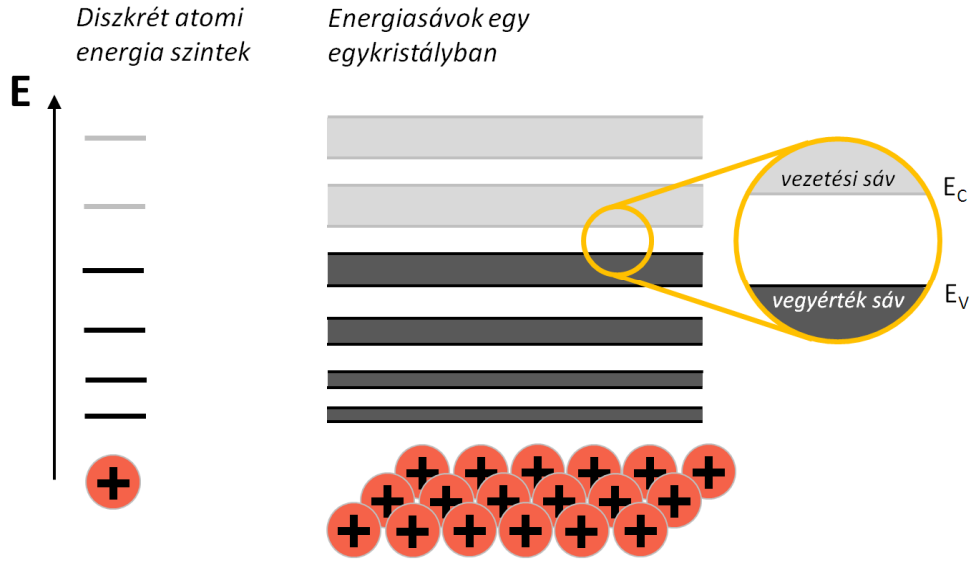
1.3. A LED-ek működésének fizikai alpjai – félvezetőfizikai háttér

A LED-ek működését bizonyos szilárdtest fizikai ismeretek alapján tárgyalhatjuk [1], [3].

1.3.1. Energiasávok, tiltott sáv

Minden atom magja körül elektronok keringenek, amelyek ún. diszkrét energia szinteken helyezkedhetnek el (6a. ábra). A lehetséges elektron energiállapotok közül a legalacsonyabb nívók betöltöttek. A legmagasabb szintű, betöltött pályákon helyezkednek az ún. vegyérték elektronok, amelyek például a kovalens kémiai kötésekben is részt vehetnek. Megfelelő gerjesztés hatására a külső héj elektronjai magasabb, ún. gerjesztett állapotba kerülhetnek. Egy ilyen gerjesztett állapotból visszatérve az elektronok a többlet energiájukat elektromágneses sugárzás formájában a környezetüknek leadják, azaz egy megfelelő energiájú fotont bocsájtanak ki. Ez a gázkisülő lámpákban lezajló fénykeltési folyamat lényege.

Ha az atomjaink egy kristályrácsba rendeződnek, a korábbi, egyedül álló atomokra vonatkozó diszkrét energia szintek "felhasadnak" – így biztosítva a Pauli-féle kizárási elv érvényesülését, azaz azt, hogy egy atomi rendszerben nem lehet két olyan elektron, amelyeknek az ún. kvantum állapotai megegyeznek (6b. ábra). N atom alkotta rendszerben a korábbi diszkrét állapotok felhasadása N-szeres, egy szinte végtelen atomot tartalmazó egykristályban pedig az energia szintek sávokká hasadnak, azaz az elektronok által betölthető energiaállapotok értékei egy folytonos intervallumot alkotnak.



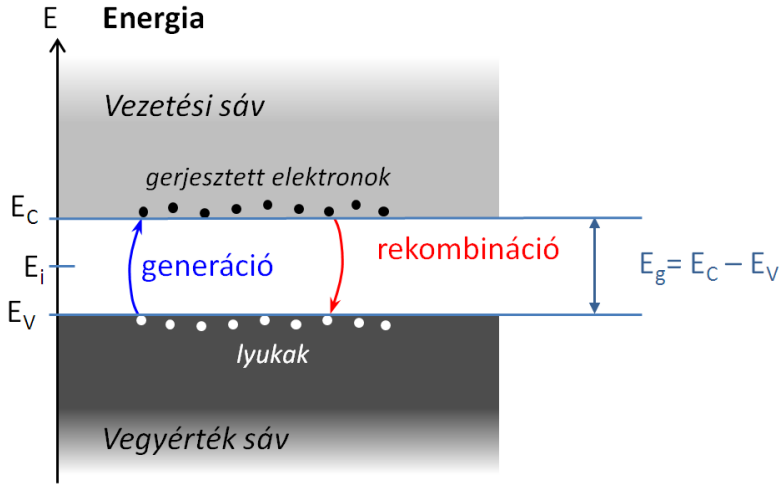
6. ábra – Diszkrét atomi energia szintek (a), illetve energiasávok egykristályokban (b): sötét szürkével a (szinte teljesen) betöltött, világos szürkével a (szinte) betöltetlen nívókat jelöltük ([1] nyomán).

Egy szilárd kristályrácsban kialakuló energiasávok közül azt a legmagasabb szintű sávot, amelyet az elektronok ténylegesen betöltenek, ***vegyérték sávnak*** (angolul: *valance band*) nevezzük, ugyanis az ott elhelyezkedő elektronok lesznek azok, amelyek a kristályrács egymás melletti atomjai közötti kémiai kötéseket alkotják. Az ilyen elektronokat lényegében helyhez

kötöttnek tekinthetjük, mert a kémiai kötések "fogva tartják" azokat, ezért nem képesek makroszkopikus elektromos áram vezetésére.

A kristályrács lehetséges energiasávjai közül a vegyérték sáv felett elhelyezkedő első betöltetlen energia sáv ezzel ellentétben olyan, hogy ha oda valamilyen oknál fogva egy elektron felkerül, az már nem lesz helyhez kötött, az egész kristályrácsban szabadon mozoghat, azaz képes az anyagban elektromos áramot vezetni. Emiatt ezt a legalacsonyabb nívójú, gyakorlatilag betöltetlen energiasávot ***vezetési sávnak*** (angolul: *conduction band*) nevezzük.

A vegyérték sáv és a vezetési sáv között elhelyezkedő zónában nincsenek megengedett elektron állapotok, ezért ezt ***tiltott sávnak*** nevezik. Ezen ***tiltott sáv szélessége***, angolul a ***bandgap*** az elektrotechnikában és a félvezető iparban használt anyagok egyik legfontosabb jellemzője. A tiltott sáv szélességével (jele: E_g, szokásos mértékegysége: eV, 1 eV=1,6.10^{-19} J) jól jellemezhetőek a *szigetelők* (nagyon nagy sávszélesség, pl. 10 eV), a *félvezetők* (nem túl nagy sávszélesség, pl. szilícium esetében 1.12 eV, vagy gallium-arzenid esetében 1.44 eV), illetve a *fémek*, ahol tulajdonképpen nem is beszélhetünk tiltott sávról, mert a vegyérték sáv és a vezetési sáv átlapolnak, azaz egy fémes kristályrácsban az elektronok szabadon mozoghatnak, képesek az áramvezetésre.



7. ábra – Spontán generáció és rekombináció.

1.3.2. Töltéshordozók adalékolatlan és adalékolt félvezetőkben

Számunkra most a félvezetők a fontosak. Tiszta, ún. *adalékolatlan* vagy *intrinsic* félvezető anyagban a vegyérték sáv elektronjai véletlenszerűen (pl. termikus gerjesztés révén) szert tehetnek annyi többlet energiára, hogy legyőzzék a tiltott sáv szélességének megfelelő gátat és a vezetési sávba kerüljenek, ahol aztán szabadon mozoghatnak. Ezt a jelenséget (spontán) *generációnak* nevezzük (7. ábra). Ekkor egy helyi *elektronhiány* is keletkezik a kristályrácsban, ezáltal az atommagok és a vegyértékelektronokból álló fel-

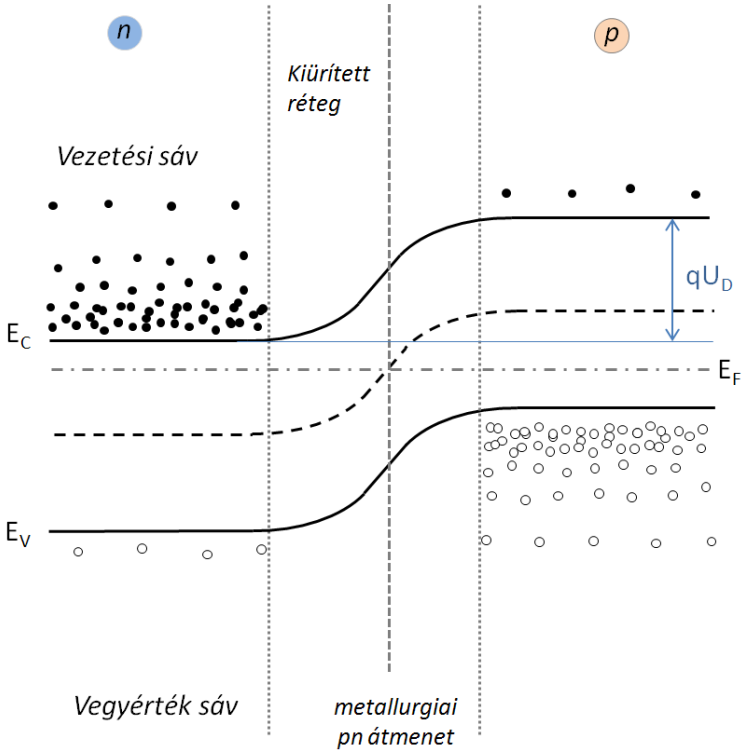
hő alkotta rendszer töltéssemlegessége lokálisan megbomlik. Ezt úgy is tekinthetjük, mintha egy egységnyi pozitív töltésű részecskét vittünk volna be ebbe a rendszerbe. Az ilyen, egy elektron hiányát reprezentáló látszólagos részecskét ***lyuknak*** (angolul: *hole*) nevezzük. Egy ilyen lyuk nem helyhez kötött, azaz a vezetési sávban lévő elektronokhoz hasonlóan a lyukak is képesek az áramvezetésre. A lyukakat, mint a vegyérték sávból hiányzó elektronokat tehát a vegyérték sávban tartózkodó pozitív töltésű részecskeként jellemezhetjük; leírásmódjuk hasonló az elektronokéhoz, pl. a lyukakhoz is rendelhetünk ún. effektív tömeget, vagy ún. kvázi impulzust.

Egy vezetési sávba került elektron természetesen nem marad örökké ezen gerjesztett állapotában – értelemszerűen a vegyérték sávban hátra hagyott lyukak sem lesznek örök életűek. E pozitív és negatív töltésű részecskéknek, azaz ***töltéshordozóknak*** egy újabb jellemzője tehát az ún. *élettartamuk*. Az átlagos élettartam elteltével a vezetési sávba került elektronok visszakerülnek a vegyérték sávba, miáltal ott megszűnik a korábban hátrahagyott elektronhiány, a lyuk, miközben a tiltott sáv szélességének megfelelő energia felszabadul és a környezetnek átadódik. Ezt a folyamatot ***rekombinációnak*** nevezzük. A rekombináció közben a környezetnek történő energiaátadás módja meghatározó a LED-ek működése szempontjából.

Összefoglalva tehát, a félvezető anyagokban kétféle töltéshordozóról beszélhetünk: a negatív töltésű, vezetési sávbeli, mozgásképes elektronokról és a vegyérték sávban hátra hagyott, pozitív töltésű, szintén mozgásképes lyukakról; értelemszerűen egy félvezető anyagban tapasztalható makroszkopikus áram vezetéséhez mindkét töltéshordozó fajta hozzájárul(hat).
Adalékolatlan félvezető anyagokban a mozgásképes töltéshordozók koncentrációja nem túl nagy, ezért az ilyen anyagok áramvezető képessége sem számottevő. Ezen az ún. *adalékolással* lehet segíteni. Vannak olyan elemek, amelyekkel a félvezető egykristályba többlet elektronok csempészhetők be. Ezeket *donor adalékoknak* hívják, és azt mondjuk, hogy a donor adalékolású félvezető *n típusú*, mert bennük ezek az adalékok által bevitt elektronok a vezetési sávban vannak, azaz áramvezetésre képesek. Hasonlóképpen, vannak olyan elemek, amelyeknek a tökéletes félvezető egykristály szomszédos atomjai közötti kötések kialakításához szükségesnél eggyel kevesebb vegyérték elektronjuk van, azaz amikor ilyen atomok épülnek be a félvezető egykristályba, akkor ezekkel az atomokkal egy lyukat csempészhetünk be a kristályrácsba. Az ilyen adalékolást *akceptor adalékolásnak* nevezzük, mert a vegyérték sáv bármely elektronját be tudja fogadni a becsempészett lyuk, miáltal a lyuk tovább vándorol. Az ilyen anyagot *p típusú félvezetőnek* is nevezik, mert a pozitív töltésű lyukak képesek vezetni benne az elektromos áramot.

1.3.3. A pn átmenet

Ha egyesítünk egy *p* és egy *n* adalékolású félvezetőt, kialakul az ún. *pn átmenet* vagy *félvezető dióda*.



8. ábra – A pn átmenet sávvázlata zéró külső feszültség esetén.

A pn átmenet mentén az *n* és a *p* oldal közt egy kontak-potenciál jellegű lépcső alakul ki a két oldal között, amit U_D-vel jelöltünk a 8. ábrán. U_D az ún. *diffúziós potenciál*, ami az *n* és a *p* oldal adalékkoncentrációjától és a félvezető anyag ún. intrinsic töltéshordozó koncentrációjától függ.
Ha az átmenet két oldala között zéró külső feszültség van, makroszkopikus áramot természetesen nem tapasztalunk.

A *p* és az *n* oldal közé pozitív feszültséget kapcsolva a potenciál lépcső alacsonyabbá válik, ami által a kisebbségi töltéshordozók ún. egyensúlyi diffúziós áramához képest többlet áram jelentkezik, ami az átmenet két oldala közötti feszültségtől nagyjából exponenciálisan függ. A pn átmenet pontos elméleti feszültség-áram karakterisztikáját az ún. *ideális diódaegyenlet* adja meg:

$$I(U) = I_0 \cdot [\exp(U / U_T) - 1] \qquad (1)$$

ahol I_0 az ún. szaturációs áram, $U_T = kT/q$ az ún. termikus feszültség, ami szoba hőmérsékleten kb. 26 mV. Az I_0 együttható erős hőmérsékletfüggést mutat – erről később még szó lesz.

Ha a dióda *anódját* alkotó *p* oldalra a *katódot* alkotó *n* oldalhoz képest pozitív feszültséget kapcsolunk, azt mondjuk, hogy a pn átmenet nyitó irányban

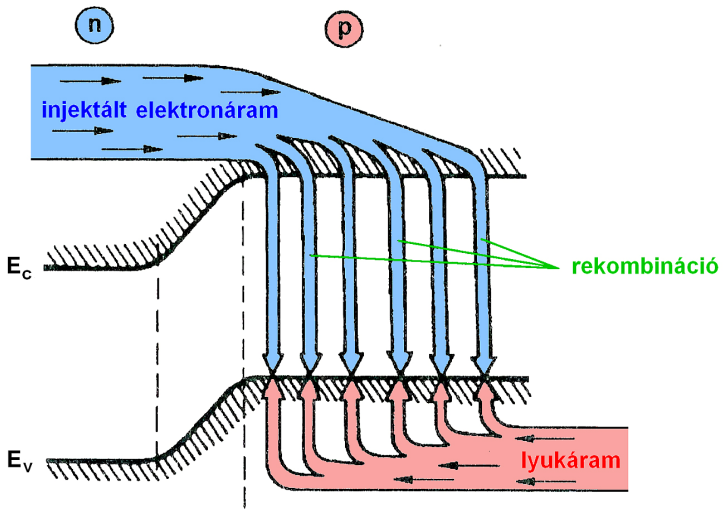
előfeszített és a feszültséget *nyitófeszültségnek* nevezzük (angolul: *forward voltage*), amit U_F-fel (az angol nyelvű irodalomban V_F-fel) jelölünk. Az anódtól a katód felé folyó, nyitófeszültség hatására létrejövő áramot *nyitóáramnak* nevezzük, szokásos jele I_F.

A fordított irányú (a *p* és *n* oldal közötti negatív) feszültséget *zárófeszültségnek* nevezzük és az angol neve (*reverse voltage*) után U_R-rel (vagy V_R-rel) jelöljük. Ha a (2) egyenletben *U* helyére nagy negatív értéket helyettesítünk, azt tapasztaljuk, hogy az áram I_0 nagyságrendű lesz, azaz záró irányban normál körülmények közt egy pn átmeneten nem folyik át jelentős áram. Megjegyzendő, hogy a LED-ek működése szempontjából a záró tartománynak nincs különösebb jelentősége; a LED konstrukciókat a nyitó tartomány nagyáramú szakaszára optimalizálják.

1.3.4. Direkt és indirekt sávátmenet: fény és hő keletkezése a pn átmenetben

A dióda *n* oldalán elektronok vezetik az áramot, a *p* oldalon lyukak. Ez azt jelenti, hogy a pn átmenetben az elektronok át kell adják az áramvezetés "stafétabotját" a lyukaknak. Ez úgy történik, hogy pl. a *p* oldalra a kiürített réteg felől a nyitófeszültség hatására beinjektálódott többlet elektronok a *p* oldali többségi töltéshordozó lyukakkal *rekombinálódnak* egészen addig, amíg koncentrációjuk a *p* oldali egyensúlyi kisebbségi elektronkoncentráció értékére nem csökken. Hasonlóképpen, az *n* oldalra bediffundálódó lyukak szintén rekombinációval elfogynak, átadván az áramvezetést az elektronoknak. A pn átmenet áramának ilyen záródását szemlélteti az 9. ábra.

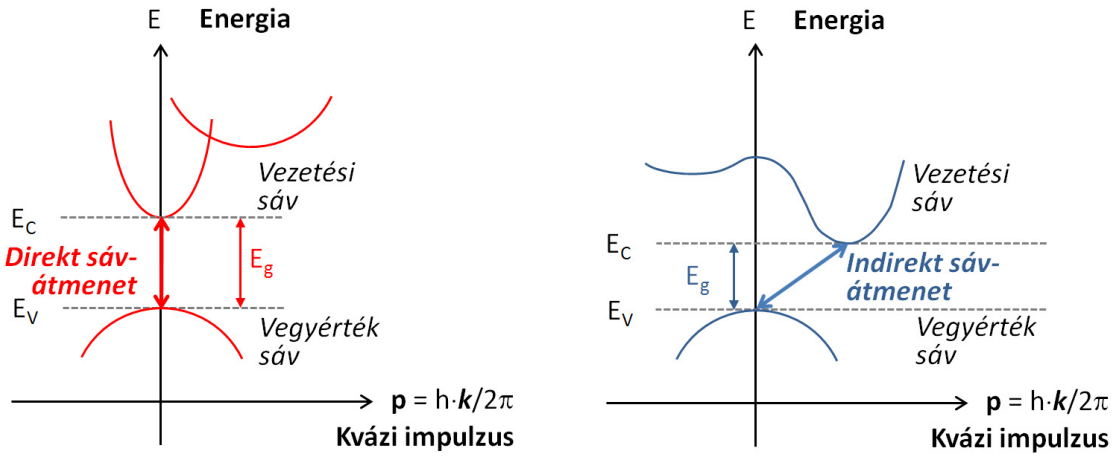
Amint azt a bevezetőben láttuk, a rekombináció azt jelenti, hogy egy elektron a vezetési sávot elhagyva a visszatér a vegyérték sávba, ahol ennek következtében egy lyuk is megszűnik. A rekombináció folyamata során a megmaradási törvényeknek teljesülniük kell, azaz az E_g tiltott sávszélességnek megfelelő energia átadódik a környezetnek.



9. ábra – A pn átmenet áramának záródása a rekombináció közvetítésével a p oldalon ([1] nyomán).

Eddig pusztán az elektronok energiájával foglalkoztunk az ún. egyszerűsített sávdiagramok segítségével; nem voltunk figyelemmel pl. az effektív tömegükkel arányos ún. *kvázi-impulzusukra*.

A félvezető anyagok sávszerkezetének fontos jellemzője az, hogy miképpen alakul a vezetési sáv alja és a vegyérték sáv teteje a töltéshordozók kvázi-impulzusa függvényében (10. ábra) [3]. Fontos kérdés, hogy a vezetési sáv minimum helye és a vegyérték sáv maximum helye azonos kvázi impulzushoz tartozik-e, ugyanis a legvalószínűbb elektron energiaállapot változás e minimum- és maximumhely között van. Ha egy félvezető anyagban e minimum- és maximumhely azonos impulzus értékhez tartozik, akkor az ilyen anyagot ún. *direkt sávú félvezetőnek* nevezzük; ha a minimum- és maximumhely nem azonos impulzus értéknél található, akkor ún. *indirekt sávú* félvezetőről van szó.



10. ábra – Direkt és indirekt sávstruktúra ([4] nyomán).

Mint említettük, a rekombináció során a megmaradási törvények nem sérülhetnek, így az energia megmaradás mellett az impulzus megmaradásnak is teljesülnie kell. Ha ***direkt sávátmenettel*** történik rekombináció (direkt rekombináció), akkor a rekombinálódó elektron impulzusa nem változik meg, ezért az elektron az E_g tiltott sávszélességnek megfelelő többlet energiája egy foton emissziója révén szabadul fel, azaz ***fénykibocsájtás*** történik, ezért a LED-eket ún. direkt sávú félvezető anyagból készítik. Az emittált foton ν frekvenciája

$$\nu = \frac{E_g}{h} \qquad (2)$$

lesz, ahol h a Planck állandó. Innen a kibocsájtott fény hullámhossza: $\lambda = h \cdot c / E_g$, ahol c a fény sebessége vákuumban. Az ilyen rekombinációt *sugárzásos rekombinációnak* is nevezzük. Színes LED-ek esetében tehát a tiltott sáv szélessége határozza meg a LED ún. csúcshullámhosszát, azaz a színét. A kék LED-ek csúcshullánhossza 450..470 nm körüli, ami nagyjából 3 eV nagyságrendjébe eső tiltott sávszélességnek, illetve ennél egy picit na-

gyobb nyitófeszültségnek felel meg; vörös LED-ek esetében 600..700 nm körüli csúcshullámhossz és 1,5 eV körüli tiltott sávszélesség és az ennek megfelelő nyitófeszültség tapasztaható.

Indirekt sávátmenttel lezajló rekombináció (ún. indirekt rekombináció) esetében a rekombinálódó elektronnak mind az enregiája, mind az impulzusa megváltozik. Ez a kristályrács rezgésének kvantumaival, az ún. *fononokkal* való kölcsönhatás révén lehetséges. Egy ilyen, ún. fonon-csatolt rekombináció során a szóban forgó elektron impulzus- és energiaváltozása is a kristályrácsnak adódik át, más szóval ***hő termelődik***, azaz a kristályrács melegszik. Az ilyen, hőtermeléssel járó rekombináció melegíti a pn átmenetet, rontja egy LED hatásfokát, illetve fényhasznosítását.

Tehát LED-ek készítéskor a cél az, hogy növeljük a sugárzásos rekombináció valószínűségét. Ezért a LED-ek pn átmeneteit is úgy alakítják ki, hogy az átmenet határán a *p*, illetve *n* oldalra injektálódó kisebbségi töltéshordozók koncentrációja a lehető legnagyobb legyen. Ezt ma az ún. *többszörös kvantumvölgyes hetero-átemenetes* (angolul: *multiple quantum-well heterojunction*) struktúrákkal valósítják meg. E struktúrák tárgyalása jelen könyv kereteit jelentősen meghaladná, ezért ettől eltekintünk, de az érdeklődő olvasó figyelmébe ajánljuk a [4] és [5] jelű irodalmat.

1.4. Különböző színű LED-ek

A gyakorlatban a nagyobb tiltott sávszélesség és a kisebb mértékű indirekt rekombináció elérése céljából nem elemi, hanem vegyület félvezetőket alkalmaznak. Megfelelő anyagpár választással elérhető, hogy a kristályrácsstruktúrában a két szomszédos atom közötti kovalens-kötést biztosító elektronpár figyelembevételével minden atomban ugyanúgy 8 elektron tartózkodjék a vegyértékhéjon, mint a szilíciumrácsban. Ez a feltétel természetszerűen érvényesül a III. és az V. oszlop elemeiből előállított vegyületeknél, így az első LED-ek gallium-arzenidből (Holonyak, 1962) ill. gallium-foszfidból (GaP) ill. ezek elegykristályaiból készültek.

A piros, sárga és zöld LED-ek megjelenése után a kéken sugárzó dióda előállítására kellett várni, hogy ezután már a „fehér” – tehát világítástechnikai jelentőséggel bíró – LED-ek is elérhetőek legyenek. Ehhez megfelelően nagy tiltott sávszélességű félvezető anyag kellett, a III. és V. oszlop elemeinek sokféle kombinációjából megfelelőnek mutatkozott pl. a gallium-nitrid (GaN) és az indium-gallium-nitrid (InGaN). Az első GaN alapú kék LED-ek még egyszerű pn átmenettel készültek (Akasaki és Amano, 1989), majd megszülettek dupla heteroátmenetes, nagy hatékonyságú kék LED-ek is (Nakamura, 1993). Ezen fejlesztéseikért e három japán professzor 2014-ben elnyerte a fizikai Nobel-díjat.

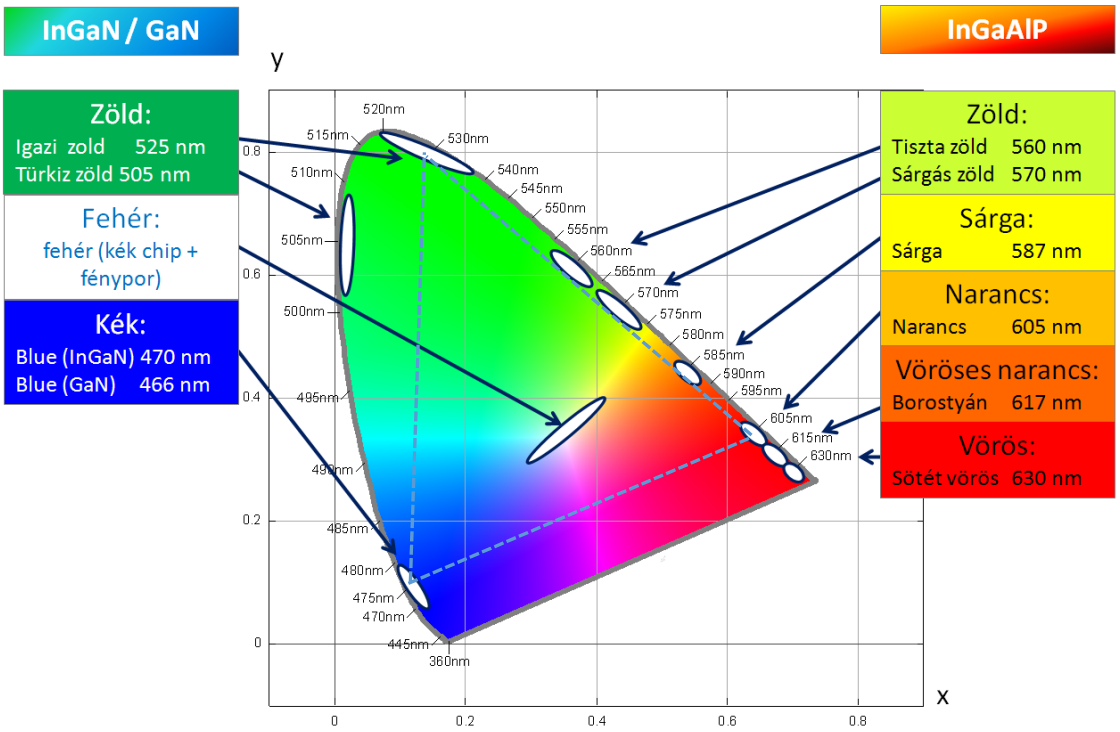
Mind a 3 vegyértékű, mind az 5 vegyértékű elemekből többféle is alkothatja a kristályt. Az elegykristályok esetében az egyes alkotóelemek arányának változtatásával különféle frekvenciájú sugárzások állíthatók elő, ugyanis a komponensek aránya befolyásolja a tiltott sáv szélességét. Például a gallium-indium-alumínium-nitrid alapú LED-ek az összetevők arányának változtatásával a zöldtől az ultraibolyáig képesek sugározni. A LED iparban ma használatos vegyület-félvezető anyagrendszerekkel előállítható LED-ek színkoordinátáit mutatjuk be a 11. ábrán.

Fehér fény LED-ekkel való előállítására két mód is nyílt. Az egyik szerint a vörös-zöld-kék (RGB) LED-ek színének keverésével; a másik szerint – a fénycsőnél alkalmazott eljáráshoz hasonlóan – fénypor segítségével állítják elő a fehér fényt: egy kéken világító LED lapkára felvitt speciális fénypor a kékszínű elsődleges sugárzást hosszabb hullámhosszúvá alakítja, így a LED lapka kékje és a fényporból származó, a sárgától a vörösig terjedő kiegészítő színek együttese révén végül fehér fényt kapunk.

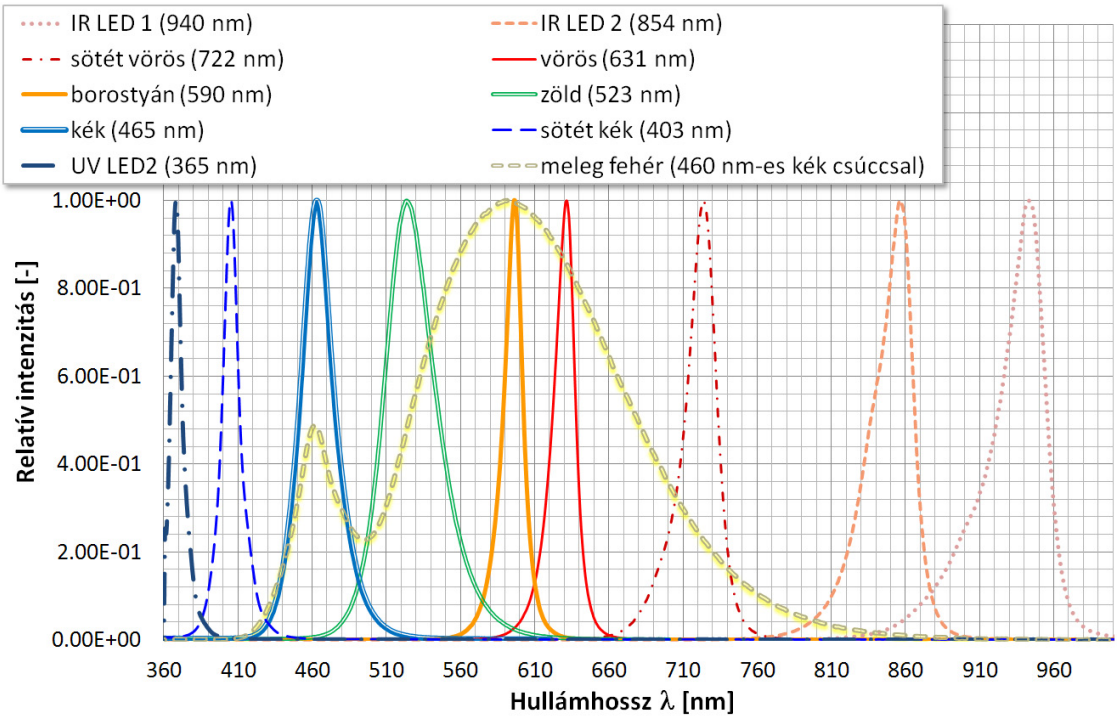
Amint az a 11. ábrán látszik, a színes LED-ek színkoordinátái majdnem a CIE színpatkó határvonalára esnek, ami azt jelenti, hogy a kibocsájtott fényük közel monokromatikus. A színes LED-ek spektrális teljesítményeloszlására valóban az jellemző, hogy számottevő sugárzás csak a. csúcshullámhossz szűk, néhányszor 10 nm-es környezetében tapasztalható (12. ábra). A színpatkóban (11. ábra) az is látszik, hogy a fehér LED-ek színkoordinátái jellemzően a (0,33; 0,33) koordinátájú ún. fehér pont közelébe esnek.

Az utóbbi évek fejlesztésének köszönhetően léteznek kétféle fényporral (vörös-zöld) készített, valamint a rekombináció folyamán UV tartományban sugárzó LED-ek is. Az említett módszerek lehetővé tették a „fehéren” belül a különböző korrelált színhőmérsékletű fényemittáló diódák megjelenését a kereskedelemben.

Megjegyzendő, hogy RGB LED-ekkel szinte tetszőleges színű fény – így fehér is – alkalmas vezérléssel kikeverhető. A 11. ábrán – három különböző színű LED-et feltételezve berajzoltunk egy háromszöget. A három (vörös, zöld és kék) LED alkalmas vezérlésével a háromszögön belüli bármely pont színkoordinátájának megfelelő színű fény (így pl. szinte tetszőleges színhőmérsékletű fehér is) kikeverhető. Az így előállított fehér fény esetében azonban rossz színvisszadást tapasztalhatunk. Ezen a problémán valamelyest segíteni lehet, ha “gazdagítjuk” az ilyen LED-es fényforrás spektrumát, és pl. egy sárgásvörös vagy borostyán (*amber*) színű LED-et is beépítünk a modulba. Ezek az ún. RGBA modulok. Gyakori, hogy egy RGB modul két zöld LED lapkát is tartalmaz (RGGB LED-ek), mert a zöld LED-ek hatásfoka a legrosszabb.



11. ábra – A kétféle, széles körben használatos vegyület-félvezető anyagrendszerrel előállítható LED-ek színkoordinátái és tipikus csúcshullámhossz értékei a CIE xy színdiagramban ([4] nyomán).



12. ábra – Különböző LED-ek relatív spektrális teljesítményeloszlása.

Hasonlóképpen, a jobb színvisszaadás, illetve a jobb ún. színhűség elérése céljából fényporos fehér LED-eknél is gyakori a vörös tartalom növelése vagy megfelelő fénypor kombinációval (lásd fent), vagy pl. úgy, hogy egy

retrofit LED lámpába vörös LED-eket is beépítenek. Számos előnyük miatt általános világítástechnikai feladatok megoldására fényporos LED-eket használnak, a többféle LED lapkás megoldással szemben.

1.5. LED-ek hatásfok jellegű paraméterei

1.5.1. LED konstrukciótól függő hatásfokok

LED-ek vonatkozásában számos hatásfok jellegű paraméter definiálható. A legalapvetőbb ilyen paraméter az ún. ***belső kvantum hatásfok*** (*internal quantum efficiency*), amely azt adja meg, hogy a LED pn átmenetén átfolyó töltéshordozók mekkora hányada vesz részt foton emisszióval járó rekombinációban [5]:

$$\eta_{\text{belső}} = \frac{\text{az aktív régióban egységnyi idő alatt generált fotonok száma}}{\text{az aktív régióba egységnyi idő alatt injektált elektronok száma}} \tag{3}$$

Egy LED aktív régiójában létrejött fotonok nem mindegyike jut el a külvilágba. A fotonok egy része pl. még a félvezető anyagban elnyelődik, más része a félvezető lapka határán teljes reflexiót szenved és ezáltal ragad bent, stb. A fotonok ilyen jellegű elvesztését alkalmas konstrukcióval (pl. a felületi teljes reflexiót mérséklő megoldásokkal) lehet csökkenteni. Azt, hogy mennyire sikeresen tudjuk egy LED belsejében létrejött fotonokat a szabad térbe eljuttatni, a ***kicsatolási hatásfok*** (*extraction efficiency*) jellemzi [5]:

$$\eta_{\text{kicsatolás}} = \frac{\text{egységnyi idő alatt a szabad térbe kisugárzott fotonok száma}}{\text{az aktív régióban egységnyi idő alatt generált fotonok száma}} \tag{4}$$

Megjegyzendő, hogy nagyon nehéz 50%-nál nagyobb kicsatolási hatásfokot elérni.

E fenti két hatásfok szorzataként definiálják az ún. ***külső kvantum hatásfokot*** (*external quantum efficiency*):

$$\eta_{\text{külső}} = \eta_{\text{belső}} \cdot \eta_{\text{kicsatolás}} = \frac{\text{egységnyi idő alatt a szabad térbe kisugárzott fotonok száma}}{\text{az aktív régióba egységnyi idő alatt injektált elektronok száma}} \tag{5}$$

Fényporos fehér LED-ek esetében fontos paraméter ***a fénypor konverziós hatásfoka*** is. Ez a fényporban a nagyobb energiájú kék fotonok kisebb energiájú fotonokká való átalakításának az energiaveszteségét jellemzi.

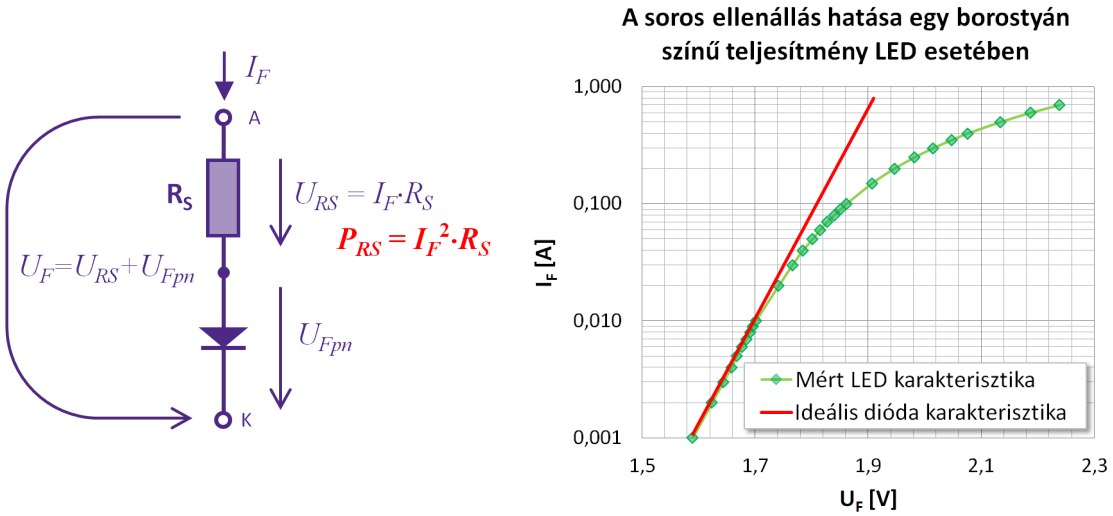
Egy LED ***energiakonverziós hatásfoka*** alatt a LED által kisugárzott optikai teljesítmény és a LED-be betáplált elektromos teljesítmény arányát értjük:

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P_{el}} \tag{6}$$

ahol Φ_e a *kisugárzott optikai teljesítmény* vagy más szóval a *teljes radiometriai fluxus*, $P_{el} = I_F \cdot V_F$ a LED által felvett elektromos teljesítmény. A mai

modern teljesítmény LED-ek esetében az energiakonverziós hatásfok 50% körüli. Az energiakonverziós hatásfoknak többféle angol megnevezése használatos: *energy conversion efficiency*, *power efficiency*, *radiant efficiency*, ill. *wall plug efficiency*.

Az energiakonverziós hatásfok szempontjából fontosak a LED üzemeltetésének körülményei. Például nagyobb nyitóáram esetében romlik a LED-ek hatásfoka. Ennek két oka van: egyrészt, nagyobb áramok esetében megnő az indirekt sávátmenettel járó, hőtermelést jelentő rekombinációs események valószínűsége, másrészt a LED nyitóirányú karakterisztikájában kezd dominánssá válni a minden LED-ben jelenlévő R_S soros ellenállás – lásd a 13. ábrát.



13. ábra – LED-ek soros ellenállása és annak hatása a nyitóirányú karakterisztikára.

A soros ellenálláson eső $U_{RS} = I_F \cdot R_S$ feszültséget is figyelembe véve a LED teljes nyitófeszültsége $U_F = U_{Fpn} + U_{RS}$ lesz, ahol a U_{Fpn} a LED ún. belső pn átmenetén eső nyitófeszültség. A soros ellenálláson disszipálódó P_{RS} veszteségi hő $P_{RS} = I_F \cdot U_{RS} = I_F^2 \cdot R_S$ értékű lesz, míg a belső pn átmenetben keletkező hő az I_F nyitóárammal csak nagyjából lineárisan nő. Ez tehát azt jelenti, hogy nagyobb nyitóáram alkalmazása során ugyan több fényt bocsájt ki egy LED, mint kisebb nyitóáram esetében, de eközben sokkal több veszteségi hő keletkezik, azaz sokkal rosszabb lesz az η_e energiakonverziós hatásfoka.

1.5.2. Fényhasznosítás

Ha ismert egy LED $S(\lambda)$ ún. spektrális teljesítményeloszlása (azaz hogy mely hullámhosszakon mekkora intenzitással sugároz – lásd később a 15. ábrát), akkor a Φ_e teljes radiometriai fluxus egyszerűen meghatározható:

$$\Phi_e = \int_{380\,\mathrm{nm}}^{780\,\mathrm{nm}} S(\lambda)d\lambda \qquad (7)$$

A Φ_e kisugárzott optikai teljesítménnyel tehát energetikailag tudjuk jellemezni egy LED fénykibocsájtását. A világítástechnikai alkalmazásoknál

azonban a legfontosabb az, hogy a kibocsájtott fényt az átlagos emberi szemlélő szempontjából vizuálisan hogy értékeljük, azaz a teljes fluxus számolásakor az egyes hullámhosszakon kisugárzott optikai teljesítményt az átlagos emberi szem $V(\lambda)$ ún. *fotopos spektrális érzékenység függvényével* súlyozzuk. Az így számított fluxust *teljes fényáramnak* nevezzük, jele Φ_V, mértékegysége a lm (lumen). Számítási módja:

$$\Phi_V = K_{\max} \cdot \int_{380\,\mathrm{nm}}^{780\,\mathrm{nm}} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \tag{8}$$

ahol $K_{\max}$ = 683 lm/W, a fényhasznosítás elvi maximuma.

A fenti két fluxus hányadosaként definiáljuk a ***sugárzás fényhasznosítása*** (angolul: *luminous efficacy of radiation*) nevű mennyiséget, amelynek mértékegysége értelemszerűen lm/W [6]:

$$K = \frac{\Phi_V}{\Phi_e} \tag{9}$$

K értéke pusztán a LED $S(\lambda)$ spektrális teljesítményeloszlásától függ. E mennyiséget magyarul gyakran *fényhatásfoknak* is nevezik.

A különböző fényforrások összehasonlítására leggyakrabban használt mennyiség a ***fényhasznosítás*** (angolul: *luminous efficacy*), amely a fényforrás (pl. LED) által kibocsájtott teljes fényáram és a betáplált elektromos teljesítmény hányadosa, jele η_V, mértékegysége lm/W:

$$\eta_V = \frac{\Phi_V}{P_{el}} = K \cdot \eta_e \tag{10}$$

ahol LED-ek esetében a már ismert módon $P_{el} = I_F \cdot V_F$. A fényhasznosítás elvi maximuma a (8) egyenlet kapcsán bevezetett $K_{\max}$ = 683 lm/W érték. A mai (2015) legjobb kereskedelmi LED-ek esetében 250 – 300 lm/W körüli fényhasznosításról szólnak a híradások.

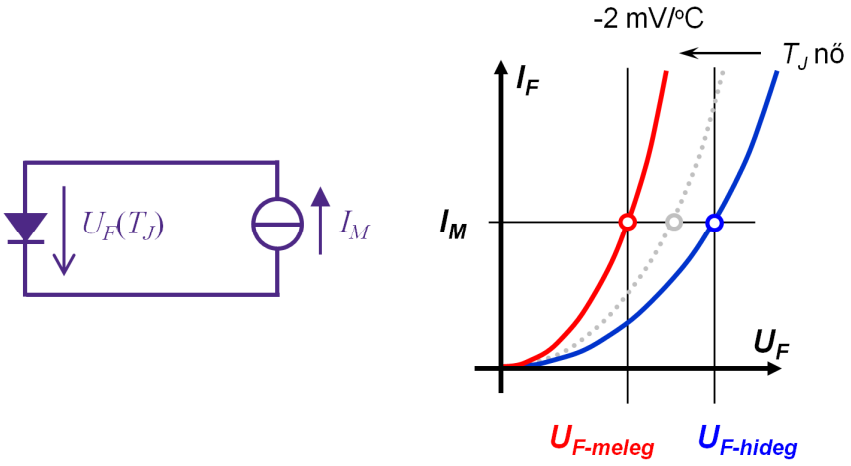
A LED-ek fényhasznosítása az energiakonverziós hatásfokhoz hasonlóan függ az üzemeltetés körülményeitől, azaz az alkalmazott nyitóáramtól és a hőmérséklettől: a nyitóáram és a hőmérséklet növekedtével a fényhasznosítás is romlik.

Egy teljes LED-es lámpa vagy világítótest fényhasznosításának meghatározásakor figyelembe kell venni a tápegység és a LED meghajtó hatásfokát, valamint a lámpa, ill. lámpatest optikai hatásfokát is. Mindezeket figyelembe véve a mai legjobb fényhasznosítású LED-ekkel és a legjobb egyéb rendszer összetevőkkel ideális üzemi körülmények mellett is legfeljebb kb. 210 – 250 lm/W fényhasznosítás érhető el.

1.6. A LED-ek hőmérsékletfüggése

A (1) egyenlet szerinti dióda karakterisztika I_0 áramegyüttható a pn átmenet T_J hőmérsékletétől erősen függ; akár 10 – 20%-kal is növekedhet, ha az átmenet hőmérséklete 1 °C-kal megemelkedik. (A karakterisztika további hőmérsékletfüggését jelenti az exponenciális tagban szereplő termikus feszültség is, de ennek hatása I_0 hőmérsékletfüggéséhez képest kisebb.)

Tekintettel arra, hogy a teljesítmény LED-eket a világítástechnikai alkalmazásokban jellegzetesen konstans áramú meghajtással üzemeltetik (ahogy azt a 14. ábra áramköri diagramja is szemlélteti), az I_0 áramegyüttható hőmérsékletfüggését a dióda csak úgy tudja kompenzálni, ha az adott I_M munkaponti áram mellett a nyitófeszültsége változik meg: növekvő hőmérséklet csökkenő nyitófeszültséget eredményez.

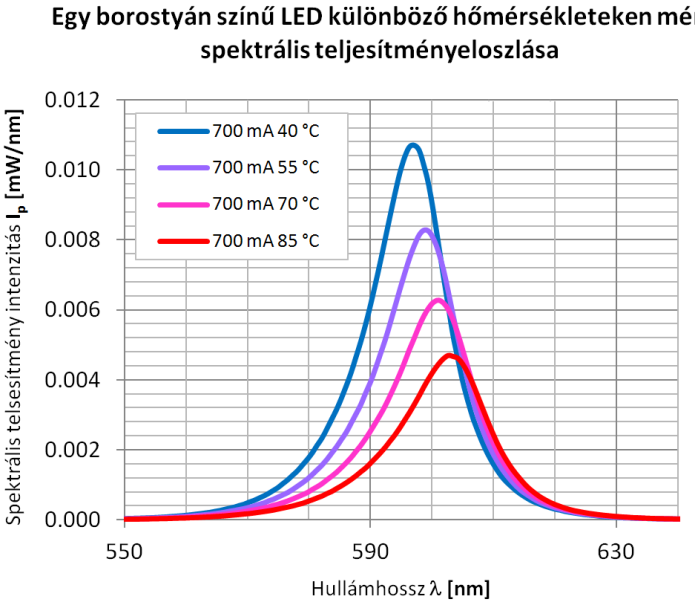


14. ábra – A pn átmenet hőmérsékletváltozásának a hatása a nyitó irányú áram-feszültség karakterisztikára konstans áramú munkapont esetében.

Egy pn átmenet nyitófeszültségének hőmérsékletfüggése nagyjából lineárisnak tekinthető és -2 mV/°C nagyságrendű. Ezen hőmérséklet-érzékenység pontos értéke természetesen függ a félvezető anyagától és a konstans I_M munkaponti áramtól is.

Egy LED hőmérsékletváltozásának egy másik közvetlen hatása a LED által kibocsájtott fény spektrumának megváltozása, ahogy az a 15. ábrán is látszik. Két dolgot tapasztalhatunk: egyrészt a csúcs hullámhossz eltolódik (amit lényegében a tiltott sáv szélességének hőmérsékletfüggése okoz), másrészt a spektrum csúcsa is alacsonyabb lesz, így a görbe alatti terület, azaz a Φ_e kisugárzott optikai teljesítmény, a teljes radiometriai fluxus is csökken. Ez utóbbit az energiakonverziós hatásfok növekvő hőmérséklet esetén fellépő csökkenése okozza.

E két jelenség együttes hatása a színkoordináták és fehér LED-ek esetében a korrelált színhőmérséklet változása, és általában a fényhasznosítás növekvő hőmérséklettel való romlása.



15. ábra – A növekvő pn átmenet hőmérséklet hatása egy színes LED spektrumára ([5] nyomán).

1.7. A LED-es fényforrásoktól a LED-es világítótestekig

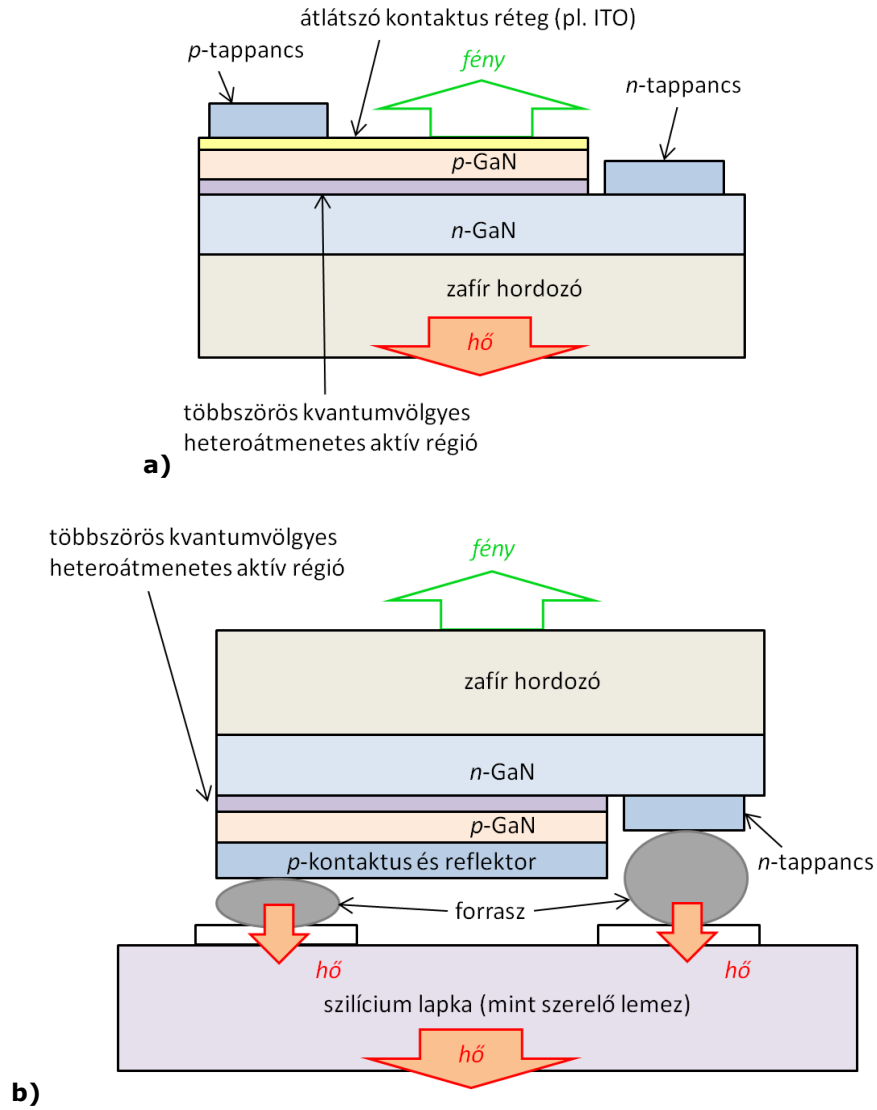
Az előző szakaszokban áttekintettük egy LED aktív régiójában lezajló fizikai folyamatok lényegét, de nem szóltunk a LED lapkák, a LED tokok, a LED szerelvények, lámpák és végül a LED-ek tartalmazó lámpatestek, ill. LED-es világítótestek konstrukciós kérdéseiről.

Előre kell bocsájtanunk, hogy a LED-es alkalmazások esetében a terminológia többnyire eltér a hagyományos világítástechnika terminológiájától. Néhány jellegzetes példát érdemes ez ügyben megemlíteni:
Mivel a LED-ek várható élettartama a többször tízezer órás tartományba tehető (pl. 50 ezer óra), sok esetben nem cél az, hogy a LED-eket cserélni lehessen és ezért egyszerűen oldható kötéssel építsék be egy lámpatestbe. Ez tehát azt jelenti, hogy egy *LED-es világítótest* nem egy cserélhető fényforrás és egy lámpatest együttese, hanem egy, a végfelhasználó által megbonthatatlan egység.

A terminológia változására egy másik példa az ún. *LED light engine*: a meghajtó elektronika, a LED fényforrás és a hozzá csatlakozó esetleges optika együttese. Ezekhez hasonlóak pl. az egyes ún. Zhaga specifikációkat [8] követő ún. *LED modulok*.

Egy külön kategóriát jelentenek az ún. *LED-es retrofit lámpák* (a hagyományos normál, ill. halogén ízzólámpák helyettesítésére), illetve a *retrofit LED csövek* (egyes fénycső típusok helyettesítésére): Ha egy ilyen LED-es retrofit fényforrást helyezünk el egy klasszikus lámpatestben, attól az nem válik LED-es világítótestté, annak sem a termikus, sem az optikai kialakítása nem lesz a LED-es fényforráshoz illeszkedő, arra optimalizált.

A következőkben a LED lapkáktól (angolul: *LED die* vagy *LED chip*) kezdve a tokozott LED lapkán, az áramköri hordózón kialakított LED szerelvényen keresztül egy adott világítástechnikai feladat megoldására alkalmas termékig tárgyaljuk a főbb konstrukciós elveket, megfontolásokat.



16. ábra – Jellegzetes LED lapka konstrukciók ([4]nyomán): a) felületen sugárzó kivitel, b) reflektoros, közbenső hordozóra flip-chip szerelt kivitel.

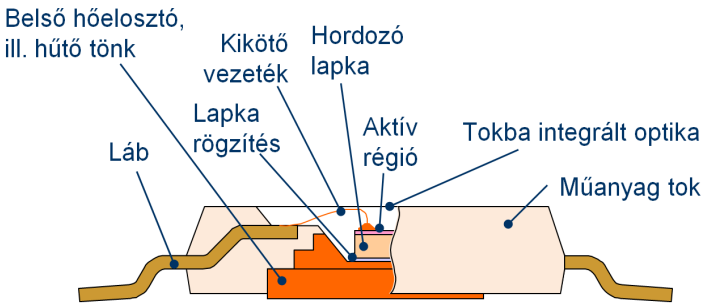
1.7.1. LED lapkák

A LED lapkák a LED-eket előállító felvezető gyárban található tisztatéri gyártósorok végtermékei. Ezek azok a félvezető lapkák (*LED die* vagy *LED chip*), amelyek az alkalmas félvezető anyagból elkészített LED pn átmeneteket tartalmazzák. A félvezető gyárban ezeket 4” vagy 6” átmérőjű, speciális kialakítású félvezető szeleten (*wafer*) készítik el alkalmas félvezetőtechnológiai lépésekkel (pl.: epitaxiális rétegleválasztás, adalékolás, vákuumpárologtatás). A félvezető szeleten kialakított, elektromos kontaktusokkal ellátott LED lapkákat a darabolás előtt, még a szeleten tesztelik: egy tűs mérőfejjel rácsatlakozik a tesztelő automata, ami megméri a LED nyitófeszültségét és

egy spektroradiométerrel megmérik a kibocsájtott fény jellemzőit is. A hibás LED lapkákat még a szeleten megjelölik, így darabolás után a selejtes lapkákat nem tokozzák.

Jellegzetes LED lapka konstrukció sémákat mutatunk be a 16. ábrán. Az egyik ilyen az ún. felületi sugárzó lapka (16a. ábra), ahol a többszörös kvantumvölgyes szerkezetű aktív régióhoz való egyenletes áramhozzávezetést egy átlátszó elektródával (ITO: *indium-tin-oxide*, azaz indium-ón oxid) biztosítják. A mechanikai stabilitás biztosítása végett a vegyületfélvezető rétegszerkezetet egy zafír hordozón hozzák létre. Tokozáskor ez a zafír hordozó lesz a tok belső, rézből készült hűtőfelületéhez rögzítve, így a LED lapka által termelt veszteségi hő a zafír hordozón keresztül távozik. Az elektromos hozzávezetést az anód és a katód tappancsokhoz kötött vékony aranyvezetékekkel biztosítják.

A másik tipikus konstrukció (16b. ábra) az ún. szilícium lapkára flip-chip technikával szerelt LED lapka. Itt a LED lapkát megfordítva, a lapka kontaktus felületeit felhasználva egy közbenső (szilícium hordozóra) apró forrasz gömbökkel szerelik. Itt az anód kontaktus egyben reflektor is, így a fény egy ilyen LED lapka konstrukció esetében a zafir hordozón keresztül távozik. Itt a vékony kikötő huzalok számára a kontaktus felületeket a szilícium hordozón alakítják ki (az ábrán ezt nem tüntettük fel). A veszteségi hő a forrasz gömbökön, majd a szilícium hordozón keresztül távozik a tok hűtőfelülete felé. Emiatt az ilyen lapka konstrukcióval kialakított LED-ek esetében az aktív régiójától a tok külső hűtőfelületéig terjedő ún. *junction-to-case hőellenállás* (jele: R_{thJC}, mértékegysége: K/W) általában nagyobb, mint a felületen sugárzó konstrukcióval kialakított LED-ek hasonló hőellenállása.



17. ábra – Egy tipikus, külső hűtőfelülettel ellátott, néhány Watt teljesítményű LED tok szerkezete.

1.7.2. Tokozott LED lapkák: a LED tokok

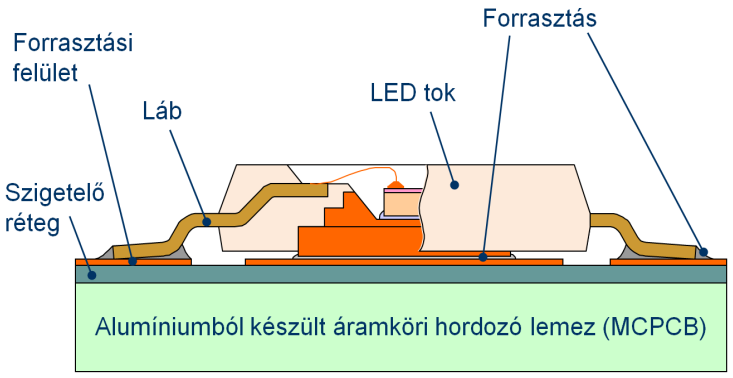
Maguk a LED lapkák a félvezető gyártósoron kívül gyakorlatilag kezelhetetlenek és a környezeti hatásokkal szemben is védtelenek, ezért alkalmas optikával és alkalmas hűtőfelülettel és külső elektromos csatlakozókkal ellátott tokba szerelik azokat. A kék fényt sugárzó LED lapkákat ebben a fázisban látják fényporral, hogy fehér LED-et kapjunk.

Tokozás után minden egyes LED példányt még a gyártósoron konstans nyitóárammal meghajtva megmérnek és nyitófeszültség, illetve fénytechnikai jellemzők (pl. színkoordináták, ill. csúcshullámhossz) szerint különböző csoportokba szortírozzák azokat. Ez a gyártósori osztályozás (a *binning*). Az ilyen gyártósori mérés igen gyors, néhányszor 10 milliszekundum alatt lezajlik. Az a LED gyártók feltételezése, hogy ilyen rövid idő alatt a lapka hőmérséklete nem változik számottevően, így a mérési eredményeket a legtöbb gyártó a tokozó üzem klimatizált, 25 °C-os környezetével egyenlőnek feltételezett lapkahőmérsékletre vonatkoztatva adja meg. (Ezzel az a gond, hogy a LED lapkák üzemi hőmérséklete valós alkalmazási környezetben ennél 50 vagy akár 100 °C-kal is magasabb lehet, így pl. a 15. ábra tanúsága szerint a LED által kisugárzott teljes fényárama a 25 °C-ra vonatkozó adatlapi értéknél számottevően kisebb lehet.)

Egy jellegzetes, külső hűtőfelülettel és fém lábakkal ellátott, műanyagból készült felület szerelt LED tok szerkezetét láthatjuk a 17. ábrán. Az ilyen LED tokok R_{thJC} hőellenállása néhány K/W, legfelejebb kb. 10 K/W nagyságrendű.

Ma már gyakoriak a nagyon apró, 1 – 2 mm befoglaló méretű ún. láb nélküli kerámia tokok is. Az ilyen tokok is rendelkeznek dedikált hűtő felülettel; az ilyen tokkal szerelt LED-ek hőellenállás csupán 1 K/W körüli.

A szilárdtest világítástechnikai iparban szokásos LED szerelvény hierarchiában a tokozott LED-ek képviselik a legalsó szintet, ezért a LED tokokat 1. szintű eszközöknek (*level 1 device*) is nevezik.



18. ábra – Egy áramköri hordozó lemezre szerelt LED tok.

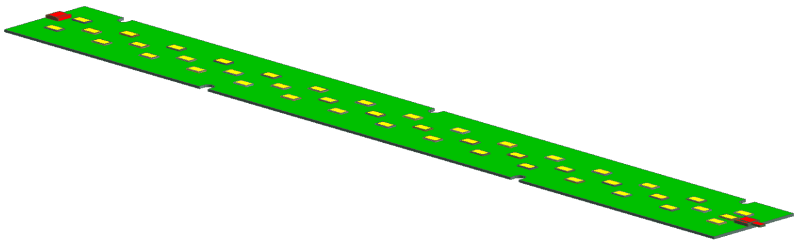
1.7.3. Áramköri hordozóra szerelt LED tokok

A LED szerelvény hierarchiában a következő szintet (*level 2*) az áramköri hordozóra szerelt LED tokok képviselik. Itt a hordozó gyakran egy jó hővezető-képességű ún. fém magvas nyomtatott huzalozású lemez, angol elnevezése (*metal core printed circuit board*) után az ún. MCPCB. Ez egy, a felületén egy vékony elektromos szigetelő réteggel és a LED-ek elektromos bekötését szolgáló réz fóliával fedett lemez (18. ábra). Gyakori a csillag alakú

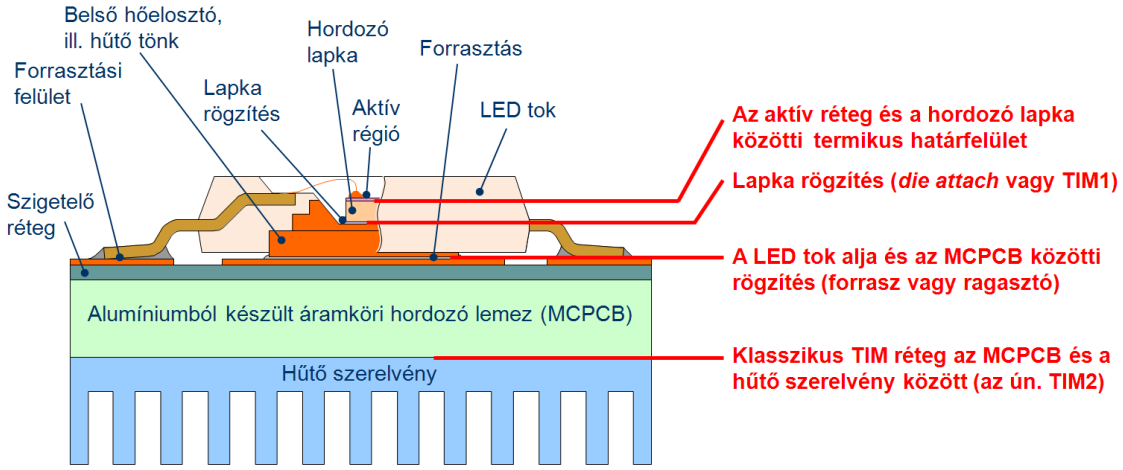
MCPCB-re szerelt LED tok, ami önálló alkatrészként is rendelhető egyes gyártóktól. Ezeknek a tipikus hőellenállása 15 K/W körüli.

A fémből készült áramköri hordozónak különös jelentősége van a LED hűtése szempontjából, hiszen a tok hűtőfelületén távozó hőt ez vezeti tovább a környezet (pl. egy hűtőborda, vagy a lámpatest ház) felé.

Az MCPCB hordozók relatíve drágák, ezért sok gyártó igyekszik azokat hagyományos, FR4 alapú (üvegszál erősítésű műgyanta) áramköri lemezzel helyettesíteni. Az FR4 hordozók rossz hővezető-képessége itt problémát jelent, ezért különös figyelmet kell fordítani ilyenkor arra, hogy a nyomtatott huzalozású lemez layout-jának kialakításakor kellő számú ún. termikus viát helyezzünk el a LED tok környezetében, különösen a tok hűtőfelülete alatt.



19. ábra – Egy számos LED tokot tartalmazó, MCPCB-n kialakított nagyobb LED szerelvény.



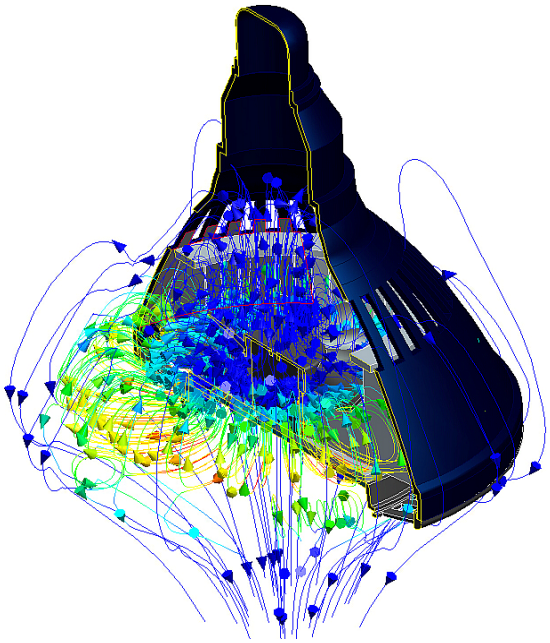
20. ábra – Egy hűtőszerelvénnyel ellátott MCPCB hordozón kialakított LED szerelvény és annak legjelentősebb termikus határfelületei.

Gyakori az is, hogy egy áramköri hordozón akár több tucat LED tokot is elhelyeznek és egy ilyen szerelvény kerül aztán egy LED-es fényforrásba (retrofit LED lámpába vagy LED csőbe) beépítésre. Egy ilyen szerelvényre mutat példát a 19. ábra. Az áramköri hordozóra szerelt LED tokok jelentik a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncában a 2. szintet; az ilyen eszközöket ún. *level 2 device*-nak nevezik.

A teljesítmény LED tokokra az jellemző, hogy "előre" sugároznak, legfeljebb 2π sr térszögben. Ez teszi lehetővé pl. azt, hogy hátoldalukra alkalmas hűtőszerelvényt lehessen illeszteni.

1.7.4. Hűtőszerelvénnyel ellátott LED szerelvények

A LED-ek jó hűtését, ezáltal azok hatékony működését és hosszú élettartamát hivatottak biztosítani a különféle hűtőszerelvények, hűtőbordák (20. ábra). A LED lapka aktív régiójától (a pn átmenettől) a hűtőszerelvényig a LED veszteségi hője hővezetéssel jut el, majd a hűtőszerelvény (pl. egy alkalmas hűtőborda) felületéről a környezetbe áramlással (konvekcióval) adódik át. A teljes hőátadási mechanizmus jóságát egy ilyen rendszer ún. *junction-to-ambient* (a pn átmenettől a környezetig terjedő), szokásosan R_{thJA}-val jelölt hőellenállás értéke jellemzi. Ezt a hőellenállást méréssel, vagy a teljes struktúra részletes, 3 dimenziós modelljét felhasználó számítógépes szimulációval lehet meghatározni (21. ábra). Ez tipikusan a LED alkalmazás gépész tervezőjének a feladata.



21. ábra – Egy retrofit LED lámpa hűtőszerelvényéről történő konvektív hőátadás szimulációja a LED lámpa részletes háromdimenziós modellje alapján. (Forrás: Mentor Graphics)

Az R_{thJA} hőellenállás konduktív részét legnagyobb mértékben az egyes anyagrétegek közötti termikus átmeneti ellenállás határozza meg, melyeket a 16. ábrán külön jelöltünk. A LED-es alkalmazások tervezésénél nagyon fontos, hogy a lehető legkevesebb termikus határfelületünk legyen, illetve az elkerülhetetlen határfelületek átmeneti hőellenállását a lehető legkisebbre csökkentsük. Ez utóbbi célt szolgálják a *termikus határfelületi anyagok*, az ún. TIM-ek (*thermal interface materials*). Ilyenek a különféle termikus zsírok, hővezető paszták, illetve a jó hővezető-képességű, elasztikus, ún. *thermal pad* anyagok. Ilyeneket az erre specializálódott gyártóktól lehet beszerezni.

A teljes R_{thJA} hőellenálláshoz a hűtőszerelvény felületéről konvekcióval történő hőátadás hozzájárulását a hűtőszerelvény alakjának, anyagának és felületi megmunkálásának jó megválasztásával lehet a lehető legkisebbre leszorítani. Általános irányelveket erre nehéz adni, mert a tervezéskor számos peremfeltételnek kell megfelelni. Ilyen peremfeltétel például egy retrofit LED lámpa kialakításakor az, hogy a hűtőszerelvény egy adott formafaktorba (pl. normál izzólámpák helyettesítésekor: A19) bele kell férjen. A hűtőszerelvénnyel is ellátott LED-es egységek a LED tokok és LED szerelvények utáni 3. integrációs szintet képviselik.

1.7.5. CoB LED-ek

22. ábra – CoB LED-ek.

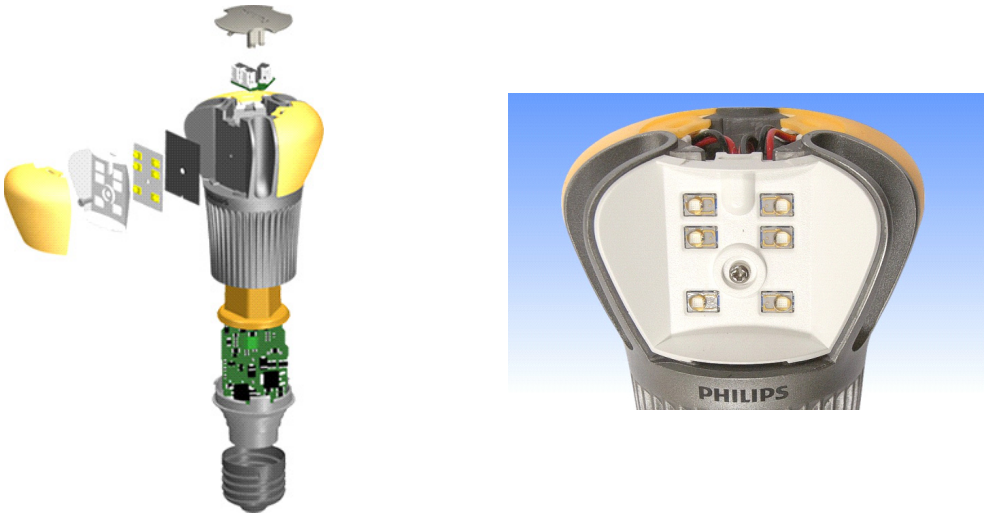
A termikus határfelületek számának csökkentésére jellegzetes példát az ún. CoB (*chip-on-board*) tokozású LED-ek jelentik (22. ábra), ahol az elektromosan sorba kötött LED lapkákat közvetlenül egy jó hővezető kerámiából készült áramköri hordozó lemezre ültetik be és a fényport erre a LED mátrixra viszik fel. Egy ilyen kész CoB LED-et aztán alkalmas hűtőszerelvényre szerelik. A LED-es fényforrások szerteágazó, gyors fejlődését jól illusztrálja, hogy pl. a CoB LED-ek nehezen sorolhatók be a LED szerelvények szokásos hierarchikus osztályozásába.

1.7.6. Teljes LED-es fényforrások és világítótestek

A LED-es fényforrások legismertebb fajtái az ún. retrofit LED lámpák. Ezekkel a legnagyobb probléma (a vásárlók által többnyire meg nem értett fénytechnikai és hatékonysági paramétereken túl) az, hogy egyáltalán nem definiált az, hogy milyen termikus környezetben kerülnek felhasználásra. Ugyanaz a LED lámpa típus (pl. egy halogén spot lámpát helyettesítő LED lámpa) kerülhet egy jól szellőző helyre, ahol a lámpa hűtőfelületéről a környezet felé jól biztosított a konvektív hőátadás, de kerülhet olyan helyre is (pl. egy szellőztetés mentes álmennyezetbe sűlyesztett lámpatestbe), ahol kifejezetten rossz a hőátadás. A kétféle alkalmazási környezetben a LED lámpa teljes fényárama és várható élettartama is jelentősen el fog térni egymástól.

Retrfit lámpák

A retrofit LED lámpák minden olyan jellegzetes rendszer összetevőt tartalmaznak, amit egy dedikált LED-es világítótest is: meghajtó elektronikát (tipikusan részben a lámpafejben, részben a hűtőszerelvény belsejében elrejtve), áramköri hordozó lemezt rajta a LED tokokkal, ami egy optikával és/vagy diffúzorral van körül véve. Léteznek ún. *távoli fényporos* (*remote phosphor*) megoldások (23. ábra) is, ahol a lámpa belsejében kéken világító LED-ek találhatók, amelyeket egy diffúzorként is szolgáló, sárga fényporral ellátott búra vesz körül. Az ilyen lámpák fényének térbeli eloszlása jól közelíti a klasszikus izzólámpák fényének térbeli eloszlását – közel a teljes térbe (majdnem 4π sr térszögben) sugároznak. A távoli fénypor alkalmazásának az is az előnye, hogy a fényporban keletkező konverziós veszteségből származó hő nem melegíti a lámpában található LED lapkákat.



23. ábra – A Philips ikonikussá vált, ún. *omnidirectional*, távoli fényporos E27-es fejű retrofit LED lámpája.

A legtöbb retrofit LED lámpa azonban nem távoli fényporos, a bennük alkalmazott LED-ek csak a fél térbe sugároznak ezért az ilyen lámpákra is az jellemző, hogy sugárzási térszögük legfeljebb 2π sr. Ez egyes alkalmazásoknál különösen zavaró. Egy ilyen tipikus eset a régi csillárok ún. gyertyaízzóinak helyettesítése (24a. ábra), ahol fontos, hogy a függőlegesen álló LED-es lámpa lefelé is világítson (24b. ábra).

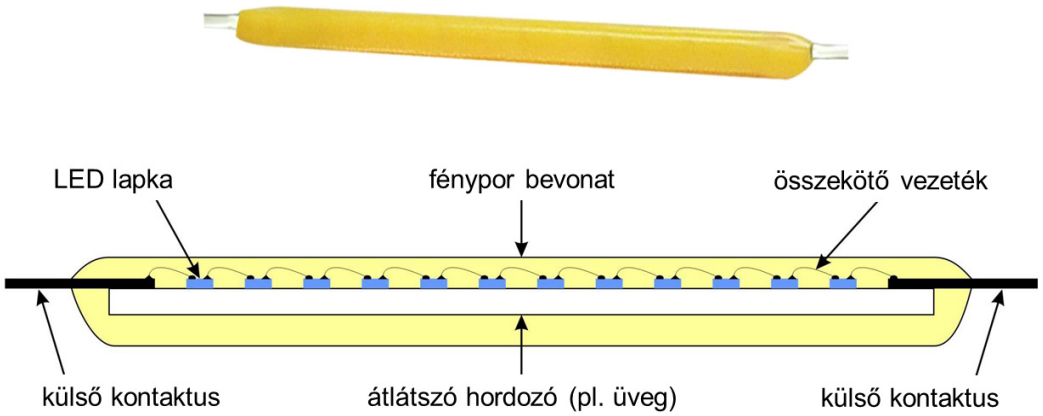
LED-szálas lámpák

A végső megoldást az ún. LED-szálas lámpa jelentette. Ez konstrukcióját tekintve az ún. nagyfeszültségű LED technológia és klasszikus ízzólámpa technológia keveréke. A megoldás lényege, hogy egy jó hővezető nemesgázzal töltött hagyományos lámpa ballonban egy olyan szerelvényt helyeznek el, amelyben az ízzószálat ún. LED-szálakkal helyettesítik. Egy LED szál nem más, mint egy üveg hordozó sorba kapcsolt sok apró, elemi (kék) LED,

amelyeknek az együttes nyitófeszültsége a hálózati csúcsértékével (Európában: 230 V) megegyező. Ezt a vékony szálat sárga fénypor réteggel vonják be, így az fehér fényt fog kibocsájtani.

a) b)

24. ábra – Gyertyaízzók helyettesítése retrofit LED lámpával: a) különböző próbálkozások, b) LED-szálas lámpa egy régi, karos csillárban



25. ábra – Egy LED-szál (filament) és belső szerkezete

A konstrukció lényege, hogy nincs szükség meghajtó elektronikára: a LED szálakat közvetlenül a hálózati AC feszültségről tápláljuk. Az emiatt fellépő villódzás (az ún. *flicker*) hatását ún. lomha, nagy utánvilágítási idejű fényporral lehet csökkenteni. Egy másik nagy előnye a LED szálaknak, hogy az elemi LED lapkák kis nyitóárammal (kb. 10 mA effektív érték) üzemeltethetők. Ennek az a hatalmas előnye, hogy kicsi lesz a LED lapkák áramsűrűsége (legalábbis a hasonló méretű, 350 mA körüli nyitóárammal üzemeltetett LED-ekhez képest), így a lapkák élettartama nagyobb lehet. Az egy ballonban elhelyezhető LED-szálak számát többek között az korlátozza, hogy a ballon felületére hogy lehet hatékonyan eljuttatni a veszteségi hőt és hogy az adott ballonfelületről az hogy adható tovább, a környezet felé. A megoldást a ballon megfelelő nemesgáz (pl. hélium) töltése jelenti, ugyanis a

nemes gázok fajlagos hővezetőképessége kifejezetten jó. Ezzel a technikával számos különböző formájú és teljesítményű (fényáramú) lámpát lehet készíteni (26. ábra).

26. ábra – Különböző formájú és teljesítményű LED-szálas lámpák

A LED-szálas lámpák fényeloszlása a geometriai hasonlóság miatt nagyon hasonlít a hagyományos ízzólámpák fényeloszlására. Emiatt nem csak a háztartási alkalmazásokban váltak népszerűvé, hanem laboratóriumi etalon lámpaként való alkalmazásuk is felmerült.

Dedikált LED-es világítótestek

A dedikált LED-es világítótestek lényege az, hogy a LED-eket nem oldható kötéssel rögzítik bennük. Ez, figyelemmel a LED-ek hosszú élettartamára, nem szabad, hogy a felhasználó számára gyakorlati problémát jelentsen, hiszen szinte egy teljes generációt ki tudnak szolgálni az ilyen világítótestek anélkül, hogy a fényforrást cserélni kéne bennük. Ez, tekintettel a LED tokok rövid termék-életciklusára, azzal az előnnyel jár, hogy a világítótest hasznos élettartama alatt nem kell foglalkozni a tönkrement fényforrást alkalmasan helyettesítő új fényforrás megtalálásának és beszerzésének a problémájával. Egy LED-es világítótest egy egységként való tervezése azt is jelenti, hogy a teljes világítótestet mind optikai, mind termikus szempontból együttesen lehet optimalizálni, miközben a tervező még esztétikai szempontokra is figyelemmel lehet. Ezt egy általános világítást szolgáló beltéri LED-es világítótest példáján keresztül jól szemlélteti a 27. ábra: a jó hűtést szolgáló kialakítás egyben a világítótest egyik meghatározó design motívuma is. Fontos, hogy az ilyen világítótestekben nagy megbízhatóságú, hosszú élettartamú LED-ek kerüljenek beépítésre és az üzemeltetés során folyamatosan biztosítva legyen pl. a jó hűtés. Más megoldásokhoz képest hátrány viszont, hogy egy LED-es világítótest életciklusa alatt a felhasználó nem részesülhet a LED technológia fejlődésének újabb eredményeiből, pl. az egyre javuló fényhasznosítású LED-ek előnyeiből.

27. ábra – Egy általános világítást szolgáló beltéri LED-es világítótest: a világítótest meghatározó design motívuma egyben a beépített LED-ek megfelelő hűtését is biztosítja.

1.7.7. Szabványos csatlakozó felületekkel ellátott cserélhető LED modulok

Az ilyen LED modulok (28. ábra) egy jó gyakorlati kompromisszumot jelentenek a fixre szerelt LED-ekkel kialakított LED-es világítótestek és az ismeretlen termikus és optikai paraméterekkel bíró hagyományos lámpatestekben való használatra szánt retrofit LED lámpák között.

28. ábra – Példa egy cserélhető, egy adott Zhaga specifikációnak [10] megfelelő LED modulra. A baloldali képen a szabványnak megfelelő optikai modul csatlakozó felülete látszik, a jobboldali fotón pedig a modul szabványos elektromos és termikus csatlakozó felületét láthatjuk.

A szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának számos szereplője által létrehozott Zhaga konzorcium megalakulásakor azt tűzte ki célul, hogy olyan ipari szabványokat dolgozzon ki, amelyek az egyes termékek közötti csereszabatosságot garantálja. Ennek értelmében különféle LED modul specifikációkat készítettek, amelyek definiálják a modulok mechanikai csatlakozó felületeit (mechanikus illeszkedés egy Zhaga aljzatba, illetve egy Zhaga optikához), elektromos csatlakozó felületét (feszültség szint, elektromos kontaktusok elhelyezkedése), termikus csatlakozó felületét (pl. a hűtőbordához illeszkedő felület mérete, a modulról elvezetendő hőteljesítmény) és optikai csatlakozó felületét (*LES – light emitting surface*; az a felület, amelyen belül a modul fény bocsájt ki).

A Zhaga szabványoknak való megfelelés lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy az "A" gyártó LED modulját a "B" gyártó foglalatában, a "C" gyártó optikájával és a "D" gyártó hűtőbordájával használhassa. A csereszabatosság megoldást jelent a modulokba beépített LED tokok rövid élet-

ciklusára is. Egy adott világítástechnikai specifikációnak megfelelő Zhaga LED modul gond nélkül kicserélhető egy ilyen LED modul újabb generációs LED tokokkal szerelt változatára: a felhasználó legfeljebb azt tapasztalja, hogy az újabb LED modul fényhasznosítása jobb, esetleg elegendő egy kisebb hűtőborda alkalmazása is. A Zhaga konzorcium többfajta LED modul típust definiált [11], a 28. ábrán bemutatott modulfajta csak egy példa a számos lehetőség közül.

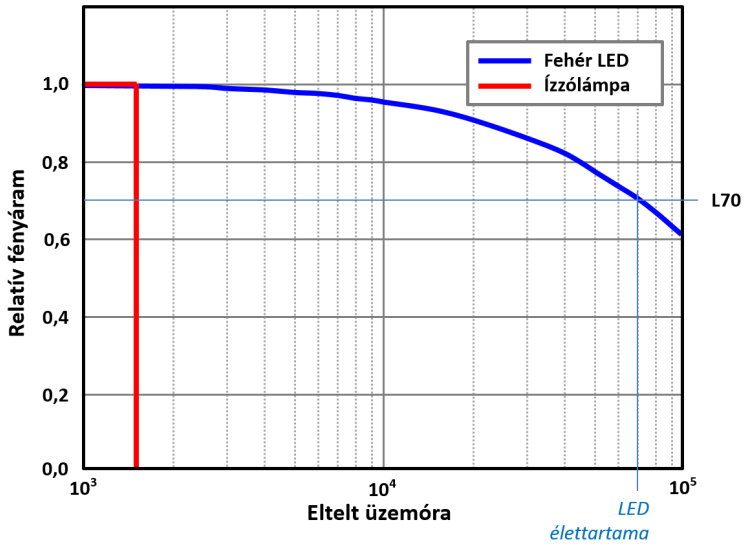
2.3. *LED élettartam, élettartamot befolyásoló tényezők*

A LED-ek egyik nagy előnye más fényforrásokkal szemben a nagy megbízhatóságuk és hosszú élettartamuk. Első lépésként azt érdemes tisztázni, hogy mit nevezünk az élettartam végének.

2.1.1. A LED-ek élettartamának a fogalma

Fényforrások élettartamát többféleképpen is definiálhatjuk. Az értelmes definíció nagyban függ a fényforrás fajtájától. Egy ízzólámpa esetében az élettartam végét többnyire egy drámai hibaesemény jelzi: kiég a lámpa, azaz elszakad benne az ízzószál. (Normál ízzólámpáknál sokszor egy folyamatos degradáció is megfigyelhető: "feketedik" az üvegbúra, miáltal valamelyest csökken a lámpa fényárama.)

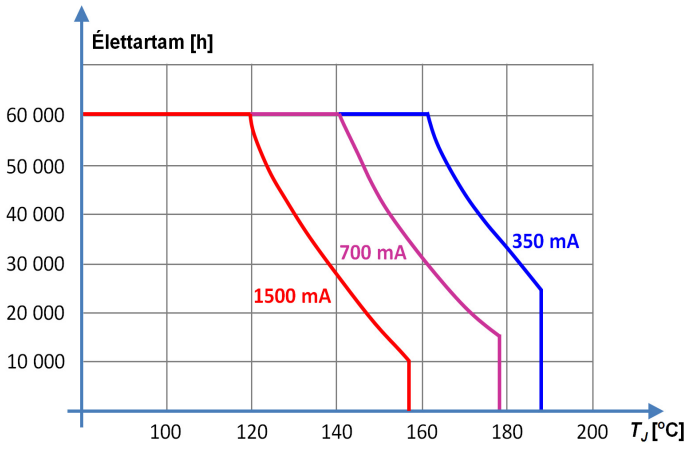
LED-ek esetében a korai katasztrófális hibák (pl. "kiég a LED") nagyon gyakran a gyártásközi tesztelésnél kiszűrhetők, így a LED-ekre sokkal inkább a folyamatos, egy exponenciális modellel leírható degradáció a jellemző. E kétféle fényforrás jelentősen eltérő viselkedését az 29. ábra szemlélteti. Az ábrán jól látszik, hogy a LED-eknél a fényáram folyamatosan csökken, így az élettartam végének például azt az időpontot tekinthetjük, amikor a LED fényárama a kezdeti érték 70%-ára csökken.



29. ábra – Egy fehér LED és egy ízzólámpa jellegzetes fényáram változása az eltelt üzemidő függvényében ([12] nyomán).

Azt, hogy egy fényforrás mennyire képes eredeti fényáramát megőrizni, ***fényáram tartásnak*** nevezzük. Az angol szaknyelv ezt pongyola módon *lumen maintenance*-nek nevezi (a helyesen kifejezés *luminous flux maintence* lenne, hiszen a *lumen* a fényáram SI mértékegysége).

A LED-ek élettartama nem egy olyan determinisztikus paraméter, amit egyetlen LED példány öregedése alapján lehetne megállapítani. LED-ek vonatkozásában többféle ***élettartam definíció*** szokásos. Mindegyik esetben élettartamnak azt az időt tekintik, amikor a vizsgált LED populáció adott hányada esetében a fényáram a kezdeti érték egy adott százalékára csökken. A legelterjedtebb az ún. *B50-L70-es élettartam*. E szerint az élettartam vége akkor következik be, amikor a vizsgált LED populáció felénél a fényáram a kezdeti érték 70%-ára csökken. A konkrét várható élettartam a LED üzemi áramától és üzemi hőmérsékletétől függ, ezért az élettartamot sokszor egy görbesereggel adják meg a gyártói termék adatlapok (B50-L70 diagramok, vagy általában: Bxx-Lyy diagramok). Egy ilyen görbesereget mutat a 30. ábra. (Ennél jóval szigorúbb a B10-L90 élettartam, ami azt mondja meg, hogy mikor csökken a vizsgált LED populáció 10%-a esetében a fényáram a kezdeti érték 90%-ára.) Az élettartam végére általános világítási feladatokra szánt LED-es fényforrások esetében az L70-es, míg indikátor vagy dekorációs célokat szolgáló LED-ek esetében az L50-es kondíciót szokták használni.



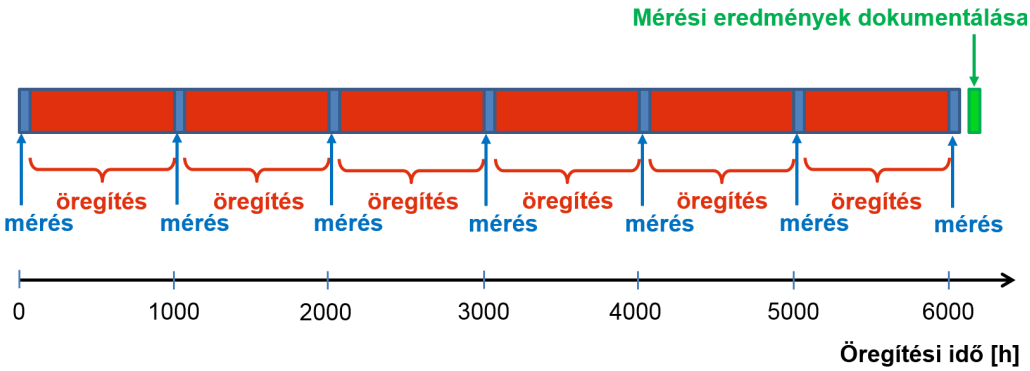
30. ábra – LED-ek jellegzetes B50-L70 élettartam diagramja különböző meghajtó áramok esetére: a görbeseregről leolvasható, hogy egy adott pn átmenet hőmérséklet mellett mekkora a várható élettartam.

2.1.2. A LED-ek öregítéses vizsgálata

Különböző LED típusok hosszú távú viselkedésének korrekt, egyértelmű összehasonlíthatósága érdekében az USA-beli LED gyártók létre hoztak egy világszerte elfogadott szabványt, amely segítségével minden gyártó azonos körülmények közt öregítheti a LED-jeit és mérheti azok kibocsájtott fényének paramétereit. Ez az ***IES LM-80-as szabvány*** [13]. A komoly, megbízható LED gyártók az IES LM-80-as szabványnak megfelelő eljárással mindig nagyobb LED populációt (~100 db LED-et) öregítenek és vizsgálnak.

Természetesen az öregítés nem tarthat 50 000 órát, az ilyen vizsgálatok 6-8 ezer órásak (31. ábra); az ezen időtartam alatt bekövetkezett változások alapján becslik a gyártók a LED-ek várható élettartamát.

A szabvány előírásokat tartalmaz az öregítésnek kitett LED-ek minimális számára, az öregítés körülményeire, valamint arra vonatkozólag, hogy az öregítés során milyen gyakorisággal kell a LED-ek egyes paramétereit megmérni.



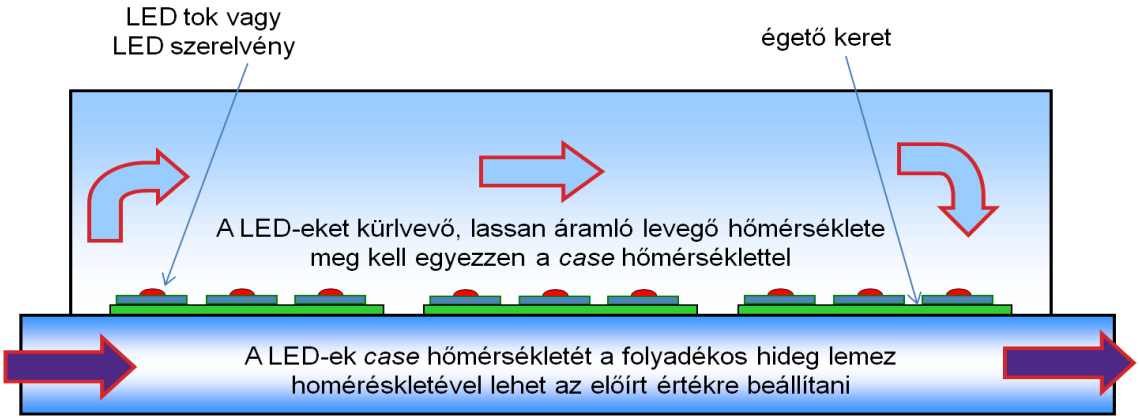
31. ábra – Az LM-80-as szabvány szerinti LED öregítési vizsgálatok menetének globális sémája.

A legfontosabb előírások a következőek:

- alkatrész szintű öregítés történik, azaz LED tokok és LED szerelvények (egy LED vagy LED tömb/mátrix egy áramköri hordozón) képezik a vizsgálat tárgyát;
- minden LED-et egyedileg azonosítani kell és követni kell a paramétereinek változását az öregítés során;
- az öregítés során a fényáramot (és a szabvány legújabb változata értelmében a színkoordinátákat) mérjük rendszeres időközönként; elegendő csupán ezen jellemzők relatív értékének változását monitorozni;
- az öregítés konstans egyenáramú táplálás mellett történik, egy segéd tápegység felhasználásával, legfeljebb ± 3% ingadozással, mérés során legfeljebb ± 0,5% ingadozással;
- az öregítés konstans hőmérsékleten történik (55 °C-on, 85 °C-on és a LED gyártó által választott tetszőleges, harmadik hőmérséklete); a vizsgált LED-ek hőmérséklet monitorozó pontján (pl. *forrasztási pont, tokozás*) mérve, legfeljebb $\pm$2 °C eltéréssel a nominális hőmérséklet értéktől;
- az öregítés közben végzett elektromos és fotometriai mérések 25±2 °C-on történjenek, 1000 óránként;
- az öregítés legalább 6000 óráig tartson.

Mint látható, ez a szabvány csak az öregítéses vizsgálatok menetét (31. ábra) és körülményeit (32. és 33. ábra) rögzíti, magáról az élettartam becslésről nem szól. Az LM-80-as szabványnak megfelelő vizsgálatok igen drá-

gák és hosszadalmasak (nagy LED populáció öregítése három hőmérsékleten, legalább 6000 óra hosszat, közben minden egyes LED példány mérése 1000 óránként). Ennek ellenére a megbízható, vezető LED gyártók az egyes LED típusaik LM-80-as mérési eredményeit a honlapjaikon általában nyilvánossá teszik, a szükséges vizsgálati jelentéseket (az ún. *test report*-okat) bárki letöltheti.



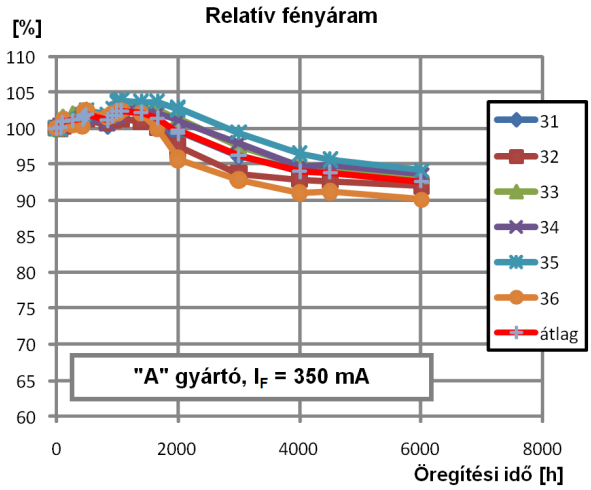
32. ábra – Egy, az LM-80-as szabvány környezeti követelményeinek eleget tevő LED öregítő kamra elvi vázlata.

33. ábra – Egy LM-80-as szabvány szerinti LED öregítésre szolgáló kamra, benne égető keretre szerelt LED-ekkel egy vezető gyártónál nyitott és zárt állapotban. (Fotók a Mentor Graphics MicReD szívességéből.)

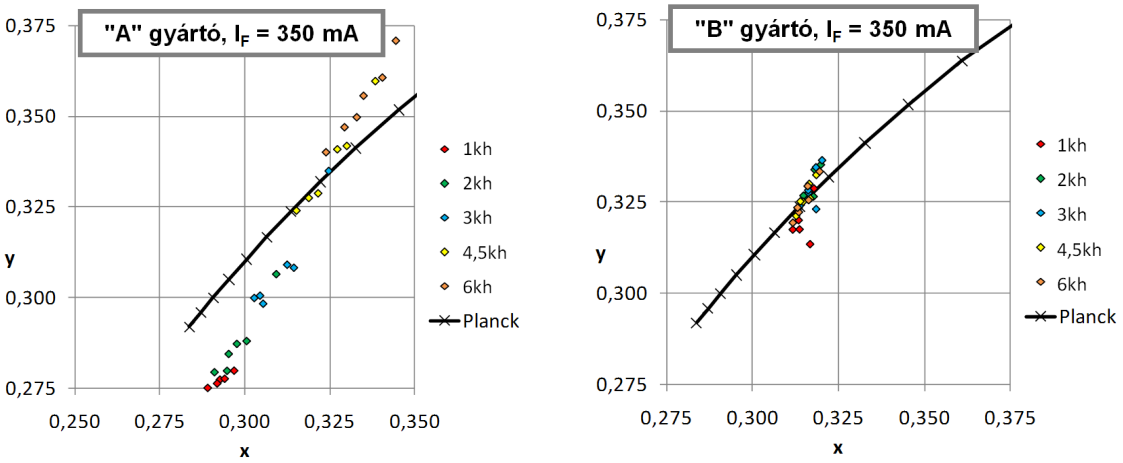
Illusztrációképpen egy LED öregítéses kísérlet néhány eredményét mutatjuk be a 34. és 35. ábrán, a [14] publikáció nyomán. E vizsgálatok tanúsága szerint nem csak a fényáram tartás tekinthető jó öregedés jelzőnek. Például a teljes R_{thJC} (a pn átmenettől a tokozásig mért (junction-to-case) hőelenállás, illetve annak egyes rész-hőellenállásai egyes specifikus meghibásodások jó indikátorai lehetnek. A LED-ek áram-feszültség karakterisztikái is jól észrevehető változásokat szenvednek az öregítés során (36. ábra) [15].

Sokan tévesen úgy vélik, hogy az 55, ill. 85 oC-os öregítési hőmérséklet miatt egy LM-80-as vizsgálat ún. gyorsított öregítés (*accelerated aging*). Le

kell szögezzük, hogy ezen vizsgálatoknál nincs szó gyorsításról, ugyanis ezen előírt kamrahőmérséklettel érhető el az, hogy a LED tok jellemző pontjainak a hőmérséklete a valós üzemi körülmények közt fellépő hőmérsékletekhez essenek közel, így emulálva az alkalmazás során fellépő üzemi körülményeket.

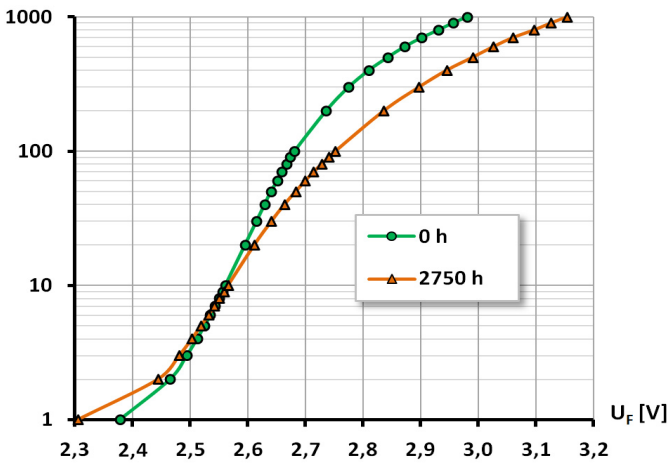


34. ábra – Egy neves gyártó fehér LED-jének fényáram tartása ([14] nyomán): az első 1500 órában a relatív fényáram enyhe növekedése, ezt követően lassuló ütemű degradációja figyelhető meg.



35. ábra – Egy-egy neves gyártó fehér LED-jének színkoordináta változásai 6000 óra öregítés során ([14] nyomán): az "A" gyártó esetében sárgulás figyelhető meg.

Mivel a tokozott LED-ek esetében a legtöbb hibafolyamat ún. *termikusan asszisztált* folyamat, így érhető el az, hogy az élettartam vizsgálatok során nagyjából azok a degradációs folyamatok menjenek végbe és olyan sorrendben, amelyek a valós működés során is bekövetkeznek. Természetesen a magasabb hőmérsékleten a hibafolyamatok is gyorsabbak, így magasabb hőmérsékleten rövidebb LED élettartam várható – ahogy ez a 30. ábrán is jól látszik.



36. ábra – Egy fehér LED nyitó irányú elektromos karakterisztikája közel 3000 óra öregítés után [15].

2.1.3. A LED-ek élettartam becslése

A LED tokok és LED szerelvények élettartam becslési módszerét is egy általánosan elfogadott USA ajánlás rögzíti: az IES TM21 dokumentum [16].

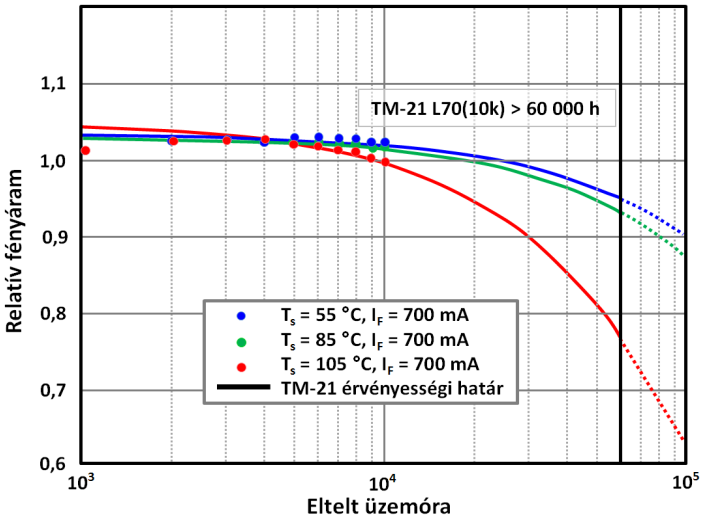
Ez egy olyan exponenciális fényáram tartási modellt definiál, amely a tényleges LM-80-as mérési eredményekhez való illesztés után alkalmas arra, hogy becslést adjon a relatív fényáram értékére az LM-80-as öregítés során eltelt üzemidő többszörösére. A TM 21-11-es dokumentum szerint a javasolt populáció méret legalább 20 db LED. Ha 20, vagy annál több LED került öregítésre, akkor a modellel a ténylegesen eltelt üzemidő 6-szorosáig adható becslés a fényáram változására. 10 és 19 közötti mintaszám esetén az öregítés során eltelt üzemidő 5,5-szereséig alkalmazható a modell; 10 alatti mintaszám esetében nem alkalmazható a modell a fényáram változás extrapolációjára. A modell használata során az LM-80-as mérési eredmények első 1000 órára vonatkozó adatait figyelmen kívül kell hagyni, mert az ezen idő alatt tapasztalható változások tipikusan nem az öregedést okozó folyamatok következményei. Az 1000 óra utáni időszakra a modellt az összes LED relatív fényáram változásából számolt átlagos relatív fényáram változására kell alkalmazni. (A relatív fényáram az öregítés megkezdése előtt mért fényáramra normalizált mennyiség.) A modell a következő:

$$D(t) = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot t) \tag{11}$$

ahol $D(t)$ az átlagos relatív fényáram a t időpontban, α és β illesztési paraméterek. Ezekkel az "Lyy" élettartam (lásd a 2.1.1 szakaszt):

$$L_p = \frac{\ln\left(\frac{100\alpha}{p}\right)}{\beta} \tag{12}$$

módon számolható, ahol p a kérdéses yy százalék érték. A TM-21-es dokumentum szerinti élettartam számításokat egy bárki által szabadon használható kalkulátor alkalmazás is segíti [17], [18] – igaz ugyan, hogy ehhez angol nyelvismeret is szükséges.



37. ábra – Tipikus LED fényáram tartási görbék 10 000 órás LM-80-as mérési eredményei alapján a TM-21 szerinti extrapolációval számolva ([12] nyomán).

Az elmúlt években a gyártói adatlapokon a Bxx-Lyy diagramokat kezdik felváltani a TM-21-es módszerrel becsült élettartam görbék. Ilyen görbéket láthatunk a 37. ábrán: mivel 10 000 órányi öregítésből származó adatok alapján történt az extrapoláció, csak 60 000 óráig érvényes a becslés. Az ábrán látható görbék alapján az mondható, hogy a vizsgált LED élettartama 105 °C-os referencia hőmérsékletig L70 értelemben 60 ezer óránál biztosan nagyobb.

2.1.4. A LED-ek élettartamát befolyásoló tényezők

Az élettartamot több tényező is befolyásolja. A vonatkozó tudományterület nagyon szerteágazó, ezért itt csak néhány aspektust tudunk megemlíteni. A LED-ek megbízhatósági kérdéseinek részletei iránt érdeklődő olvasó figyelmébe egy angol nyelvű könyvfejezetet [21], illetve egy teljes angol nyelvű monográfiát [22] ajánlunk.

A világítástechnika szempontjából releváns, nagyobb teljesítményű LED-eknél a nem kielégítő hűtés okozza a legtöbb meghibásodást. Fehér LED-ek esetén, ha a rövid hullámhusszúságú sugárzás hosszabb hullámhosszúra való konvertálását végző fényport valamilyen műanyag mátrixba kevert formában közvetlenül a LED felületére viszik fel, akkor ez a fénypor keverék is öregedhet. Jellemző öregedés a LED tokba integrált optika homályosodása vagy sárgulása. Más esetekben a LED lapka kristályszerkezetében következhet be a hő hatására vissza nem fordítható változás (kontaktusok leválása, a kristályhibák elmozdulása - ún. diszlokáció vándorlás) stb. Ezek mind hatással vannak a LED-ek működési jellemzőinek (elektromos karakterisztika, hőellenállás, a spektrális teljesítményeloszlás és ezen keresztül az összes fénytechnikai paraméter) változásaira.

A fentiek erősen függenek a gyártási technológiától, így azonos induló fényhasznosítású és teljesítményű LED-ek esetén, azonos hűtési körülmények között is lehetnek gyártmányok, melyek csak néhány ezer órát működnek, míg más típusok akár több tízezer órán át is használhatók maradnak.

Összefoglalva elmondható, hogy adott minőség esetén a felhasználás körülményei szabják meg az élettartamot: a LED-eket általában tág áramtartományban lehet használni, de azonosan jó hűtés esetén is rövidül az élettartam az áramerősség növelésével.

Fentiekre való tekintettel célszerű, ha a felhasználó tájékozódik, hogy a gyártó – valós mérési adatok alapján – milyen élettartamot garantál a termékre. Ezt követően meg kell határozni, hogy a tervezett felhasználási körülmények között milyen pn átmenet hőmérséklet várható. Végül ellenőrzendő, hogy a LED és a környezet közötti hőellenállás a valóságban mekkora. Így pl. azt, hogy a LED milyen formában került rögzítésre a hőátadást szolgáló alaplemezre (forrasztás vagy hővezető paszta felhasználásával, utóbbi öregszik, hőellenállása nő).

2.1.5. LED lámpák, modulok és LED-es világítótestek élettartama és megbízhatósági kérdései

Hasonlóan a LED alkatrész szintű LM-80 – TM-21 dokumentum pároshoz, összetett LED-es rendszerek (LED lámpák, modulok, LED-es világítótestek) esetében az IES LM-84-14 jelű szabvány [19] fogalmaz meg követelményeket az öregítésre és az öregítés közbeni fényáram tartás mérésére. Az IES TM-28-14 jelű dokumentum [20] pedig arra ad ajánlást, hogy az LM-84-es mérési eredmények alapján miképpen adható becslés a LED lámpák, modulok, illetve világítótestek várható élettartamára. Ezek ismertetésére terjedelmi korlátok miatt nem térünk ki.

1.8. Irodalom

[1] A hőmérsékleti sugárzásról:
https://hu.wikipedia.org/wiki/Hőmérsékleti_sugárzás
A feketetest sugárzésról:
https://hu.wikipedia.org/wiki/Feketetest-sugárzás

[2] Székely Vladimír, "Elektronika I – félvezető eszközök", BME VIK 55054. sz. egyetemi jegyzet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001.

[3] Simonyi Károly: "Elektronfizika" (4. kiadás), Tankönyvkiadó, Budapest, 1981. ISBN 9631744922

[4] Jinmin Li, Junxi Wang, Zhe Liu, András Poppe, "Solid state physics fundamentals of LED thermal behavior", In: Clemens J. M. Lasance, András Poppe (szerk.), "Thermal Management for LED Applications", Springer, 2014. ISBN: 9781461450900

[5] E. F. Schubert, "Light-emitting diodes" (2. kiadás), Cambridge University Press, 2006, ISBN 0511344767
[6] CIE S 017/E:2011 ILV "International Lighting Vocabulary" (Nemzetközi Világítástechnikai Szótár) 17-730 sz. definíció, http://eilv.cie.co.at/term/730
[7] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", MICROELECTRONICS JOURNAL, DOI: 10.1016/j.mejo.2015.09.013. (2015)
[8] Zhaga Interface Specification Book 1: Overview and Common Information, http://www.zhagastandard.org/specifications/book-1.html
[9] Clemens J. M. Lasance, András Poppe (szerk.), "Thermal Management for LED Applications", Springer, 2014. ISBN: 9781461450900
[10] Zhaga Book 5: Interface Specification for Socketable LED Light Engine with Separate Electronic Control Gear, http://www.zhagastandard.org/specifications/book-5.html
[11] Overview of Zhaga Books, http://www.zhagastandard.org/books/overview/
[12] Lumileds, "Lumen maintenance and reliability", http://www.lumileds.com/technology/luxeon-technology/lumen-maintenance-and-reliability
[13] IES-LM-80-15 szabvány, "IES Approved Method: Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Packages, Arrays and Modules", ISBN 9780879953157 (2015)
[14] A. Poppe, G. Molnár, P. Csuti, F. Szabó, J. Schanda, "Ageing of LEDs: A Comprehensive Study Based on the LM80 Standard and Thermal Transient Measurements", In: CIE 27th Session - Proceedings, CIE 197:2011: (1. kötet), 2011. július 10-15, Sun City, Dél-Afrika, CIE, Bécs, pp. 467-477
[15] Hegedűs János, "Multi-domain circuit modeling of LEDs reflecting device aging", MSc diplomadolgozat, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest, 2015.
[16] IES-TM-21-11 dokumentum, "Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources", ISBN: 9780879952594 (2011)
[17] Peters L., "EPA introduces TM-21 calculator", LEDs Magazine, http://ledsmagazine.com/news/9/2/8
[18] Az USA Környezetvédelmi Ügynökségénel TM-21 kalkulátora, http://www.energystar.gov/TM-21calculator
[19] IES LM-84-14 szabvány, "Approved Method for Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Lamps, Light Engines, and Luminaires",
[20] IES TM-28-14 dokumentum, "Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires", ISBN: 9780879952969 (2014)
[21] Michael Pecht, Diganta Das, Moon-Hwan Chang, "Introduction to LED Thermal Management and Reliability", In: Clemens J. M. Lasance,

András Poppe (szerk.), "Thermal Management for LED Applications", Springer, 2014. ISBN: 9781461450900

[22] Wilem .D. van Driel, Xuen J. Fan (szerk.), "Solid State Lighting Reliability", Springer, 2013. ISBN: 9781461430667