



Elektrotechnikai tagozat



Feladatalapú pályázati témák 2015

(Sorszám:20 / 2015/3.)

Újszerű technológiák a világításban - LED világítás a gyakorlatban

Alkalmazástechnikai segédlet

Szakmai segédlet tervezők, kivitelezők
és üzemeltetők számára

Magyar Mérnöki Kamara

Feladatalapú pályázati kiírás 2015

3. tématerület - Elektrotechnikai Tagozat

Tartalom

1.	Világító diódák működési elve, LED fényforrástól a LED világítótestig	3
1.1.	Történeti háttér	3
1.2.	Félvezető fizikai alap	4
1.3.	A pn átmenet	7
1.4.	Direkt és indirekt sávátmenet: fény és hő keletkezése a pn átmenetben	9
1.5.	Különböző színű LED-ek	11
1.6.	LED-ek hatásfok jellegű paraméterei	13
1.7.	Hőmérsékletfüggés	16
1.8.	A LED-es fényforrásoktól a LED-es világítótestekig	17
2.	Az üzemeltetés kritikus tényezői, biztonságtechnikai tényezők, LED élettartam	27
2.1.	Beltéri világítás biztonságtechnikai kérdései	27
2.2.	Kültéri világítás biztonságtechnikai kérdései	30
2.3.	LED élettartam, élettartamot befolyásoló tényezők	35
3.	A LED-es világítás hatásai: élettani hatások, színvisszaadás, káprázás	45
3.1.	Élettani hatások	45
3.2.	A színvisszaadás, mint a színminőség jellemzője	50
3.3.	Káprázás	55
4.	LED-es világítás tervezése során felmerülő kérdések	56
4.1.	LED-es beltéri világítás	56
4.2.	LED-es kültéri világítás	57
4.3.	LED-es közvilágítás	60
	Melléklet	71

1. Világító diódák működési elve, LED fényforrástól a LED világítótestig

Napjainkban kevés olyan műszaki újdonság van, amelyről annyi szó esnék, mint a fénykibocsájtó, vagy fényemittáló diódáról (angolul: *light emitting diode*, 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. Előjáróban 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.

1.1. Történeti háttér

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 fényjelenség 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.

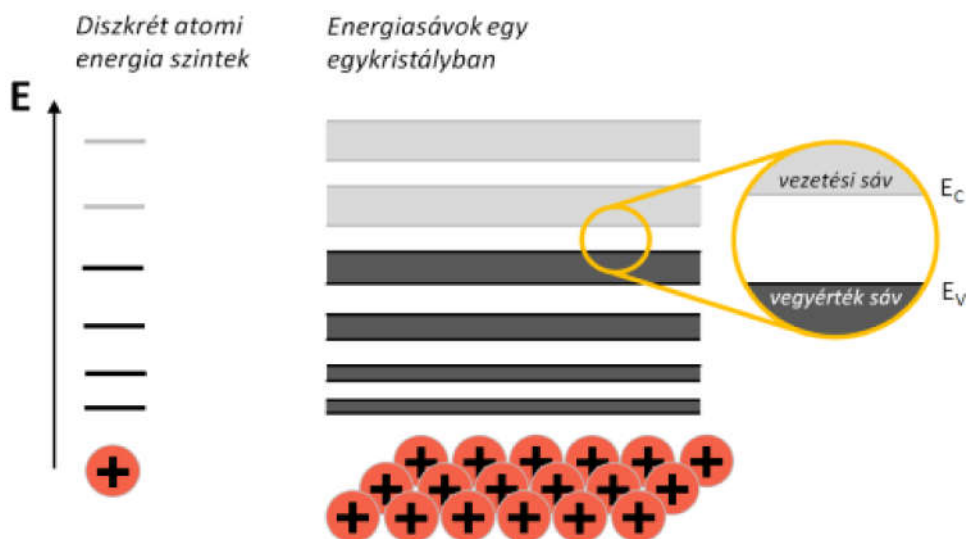
1.2. Félvezető fizikai alap

A LED-ek működését bizonyos szilárdtest fizikai ismeretek alapján tárgyalhatjuk[1],[2].

1.2.1. Energiasávok, tiltott sáv

Minden atom magja körül elektronok keringenek, amelyek ún. diszkrét energia szinteken helyezkedhetnek el. 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 bocsátanak 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. 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.



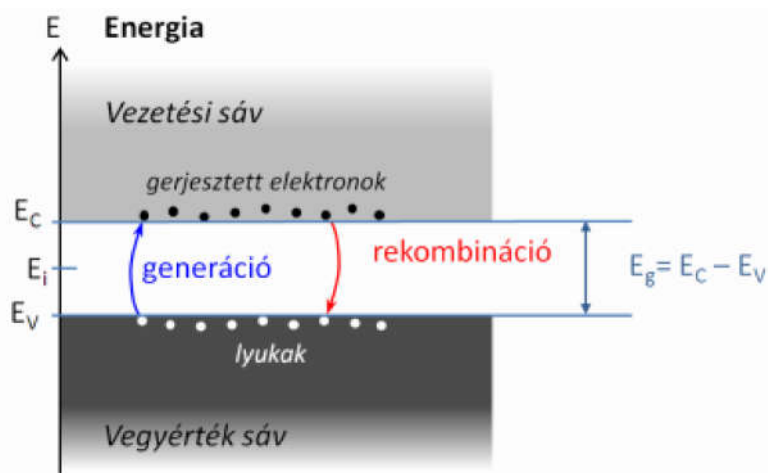
1.1. ábra - Diszkrét atomi energia szintek, illetve energiasávok egykristályokban: sötét szürkével a (szinte teljesen) betöltött, világos szürkével a (szinte) betöltetlen nívókat jelöltük ([1] nyomán).

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 kötések alkotják. Az ilyen elektronokat lényegében helyhez

kötöttek 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 nivójú, 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, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) jól jellemezhetőek a **szigetelők** (nagyon nagy sáv szélesség, pl. 10 eV), a **félvezetők** (nem túl nagy sáv szélesség, pl. szilícium esetében 1.12 eV, vagy gallium-arszenid 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.



1.2. ábra - Spontán generáció és rekombináció.

1.2.2. 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 (2. ábra). Ekkor egy helyi *elektronhiány* is keletkezik a kristályrácsban, ezáltal az atommagok és a vegyértékelektronokból álló felhő alkotta rendszer töltésszemlegessége 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 részecskéknél, azaz töltéshordozóknál 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 nevezzük, mert a pozitív töltésű lyukak képesek vezetni benne az elektromos áramot.

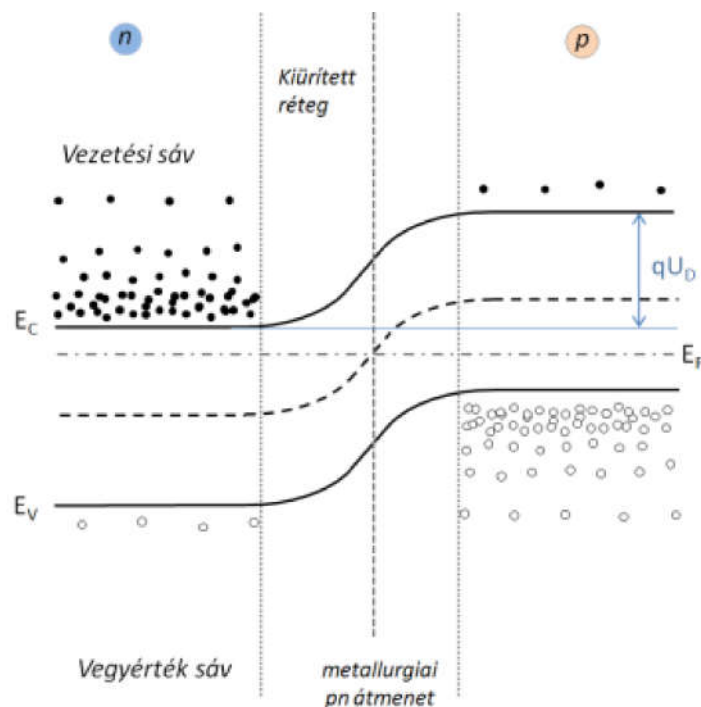
Az adalékolás hatását matematikailag is megfogalmazhatjuk. Az elektronok lehetséges energiahelyeinek betöltési valószínűségét az ún. Fermi függvény adja meg:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (1)$$

ahol k a Boltzman állandó, T a hőmérséklet, és E_F az ún. Fermi-szint, azaz az az energia szint, ahol a betöltési valószínűség értéke 0,5. Adalékolatlan félvezető anyag esetén a Fermi-szint a tiltott sáv közepén helyezkedik el. Ezt intrinsic Fermi-szintnek nevezzük és E_i -vel jelöljük. Donor adalékolás esetében az E_F Fermi-szint a tiltott sáv közepéhez képest a vezetési sáv felé tolódik el, ami azt jelenti, hogy mindenféle gerjesztés nélkül is számottevő mennyiségű elektron fog a vezetési sávban tartózkodni. Hasonlóképpen, akceptor adalékolás esetében a Fermi-szint a sávközéphez képest a vegyérték sáv felé tolódik el, aminek az a következménye, hogy többlet lyukak lesznek a vegyérték sávban.

1.3. A pn átmenet

Ha egyesítünk egy p és egy n adalékolású félvezetőt, kialakul az ún. *pn átmenet* vagy *félvezető dióda*. A Fermi-szint állandó, definíció szerint ez az energiaszint az, ahol $f(E_F) = 0,5$. Tudjuk ugyanakkor, hogy a Fermi-szint n típusú félvezetőben a vezetési sávhoz, p típusú félvezetőben a vegyérték sávhoz van közelebb. Ennek így kell lenni a pn átmenetet határoló n és p rétegben is, ha az átmenettől elég távol vagyunk. Ez csak úgy lehetséges, ha az n és p oldal megengedett sávjai az energiatengely mentén elcsúsznak egymáshoz képest, ahogy azt az 1.3. ábra szemlélteti.



1.3. ábra – A pn átmenet sávvázlata zero külső feszültség esetén.

Az energiasávok ilyen eltolódása azt jelenti, hogy az n és a p oldal közt egy kontakt-potenciál jellegű potenciállépcső alakul ki, amit U_D -vel jelöltünk a 3. ábrán. U_D az ún. *diffúziós potenciál*, ami az n és a p oldal adalékkoncentrációjától és a félvezető anyag ún. *intrinsic töltéshordozó koncentrációjától* függ.

Ahogy azt a 3. ábra is szemlélteti, az átmenet két oldalán a mozgásképes töltéshordozók koncentrációja közt hatalmas (a valóságban sok nagyságrendnyi) különbség van. Az így kialakuló koncentráció gradiens a töltéshordozók ún. *diffúziós áramát* gerjeszti, aminek a következtében az átmenet két oldalán egy pár mikrométer nagyságrendű ún. *kiürített réteg* alakul ki: az n oldalról elektronok diffundálnak a p oldalra, ahol azok ún. *kisebbségi töltéshordozók*, és viszont, a p oldalról lyukak vándorolnak az n oldalra, ahol azok szintén *kisebbségi töltéshordozók* lesznek.

Ha az átmenet két oldala között *zéró külső feszültség* van, makroszkopikus áramot természetesen nem tapasztalunk, ami azt jelenti, hogy a töltéshordozók *diffúziós áramával* egyensúlyt tart az átmenet két oldala közötti potenciállépcső keltette elektromos térerősség miatt fellépő ún. *sodródási áram*.

A p és az n oldal közé pozitív feszültséget kapcsolva a potenciál lépcső alacsonyabbá válik, ami által a *kisebbségi töltéshordozók* (imént említett, *zéró feszültség mellett jelentkező*) 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:

$$I(U) = I_0 \cdot [\exp(U / U_T) - 1] \quad (2)$$

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

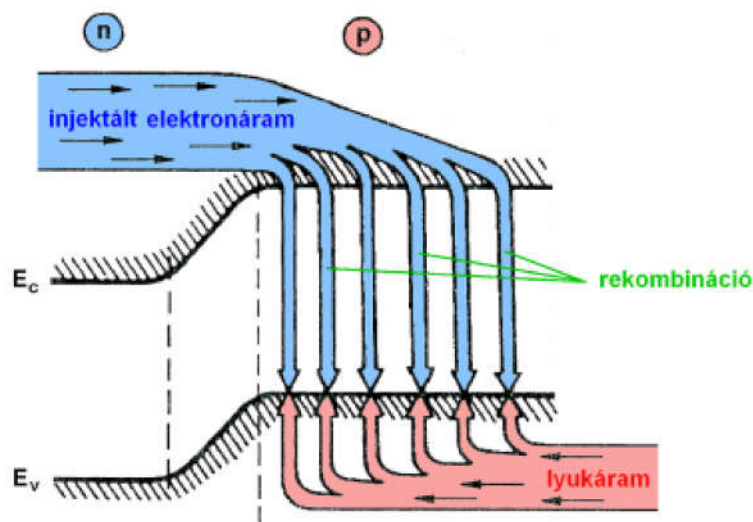
Ha a dióda *anódját* alkotó p oldalra a *katód*ot alkotó n oldalhoz képest pozitív feszültséget kapcsolunk, azt mondjuk, hogy a pn átmenet *nyitó irányban* előfeszített és a feszültséget *nyitófeszültségnek* nevezzük (angolul: *forward voltage*), amit U_F -fel (az angol nyelvű irodalomban V_F -fel) jelölünk. 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.

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

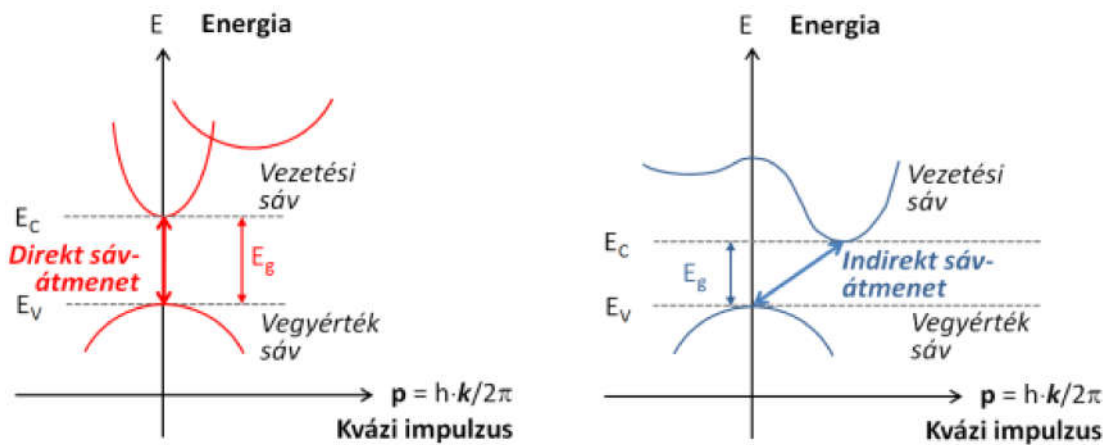
A dióda n oldalán elektronok vezetik az áramot, a p oldalon lyukak. Ez azt jelenti, hogy a pn átmenetben az elektronok át kell adják az áramvezetés "stafétabotját" a lyukaknak. Ez úgy történik, hogy pl. a p oldalra a kiürített réteg felől a nyitófeszültség hatására beinjektálódott többlet elektronok 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 1.4. 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 sáv szélességnek megfelelő energia átadódik a környezetnek.



1.4. 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.



1.5. ábra – Direkt és indirekt sávstruktúra ([3]nyomán).

A félvezető anyagok sávszerkezetének fontos jellemzője az, hogy miképpen alakul a vezetési sáv alja és a vegyérték sáv teteje a töltéshordozók kvázi-impulzusa függvényében (1.5. ábra) [2]. 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.

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 sáv szélességnek megfelelő többlet energiája egy foton emissziója révén szabadul fel, azaz **fénykibocsátás** történik, ezért a LED-eket ún. direkt sávú félvezető anyagból készítik. Az emittált foton frekvenciája

$$\nu = \frac{E_g}{h} \quad (3)$$

lesz, ahol h a Planck állandó. Innen a kibocsátott fény hullámhossza: $\lambda = h c / E_g$, ahol c a fény sebessége vákuumban. Az ilyen rekombinációt *sugárzásos rekombinációnak* is nevezzük.

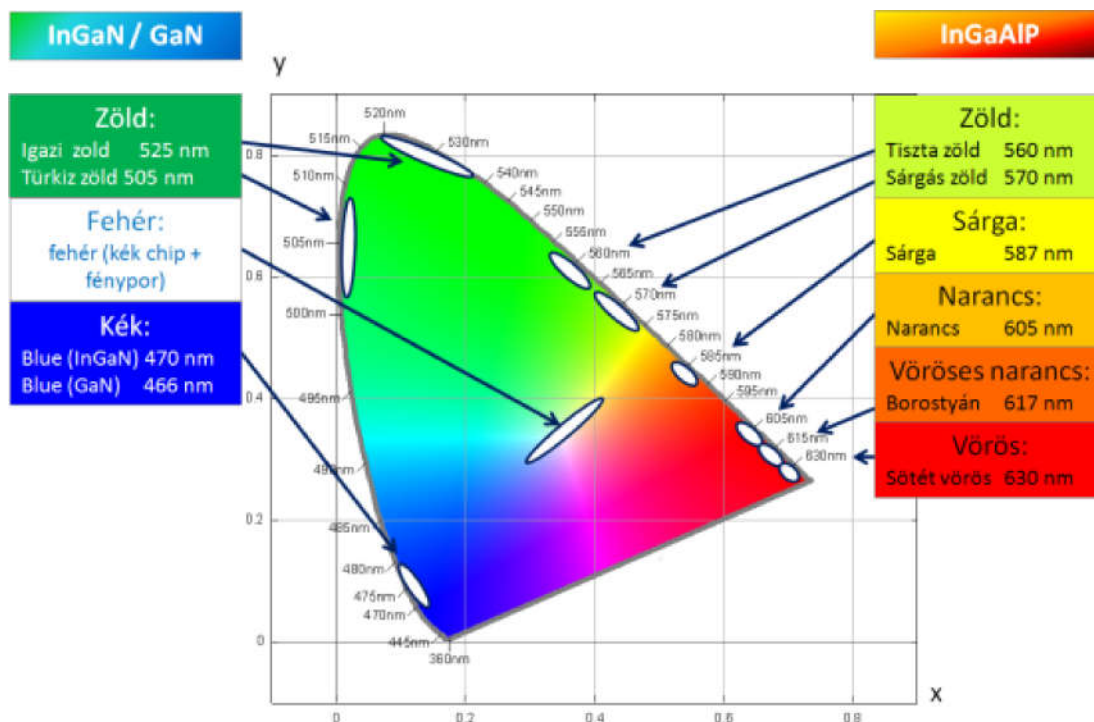
Indirekt sávátmenettel lezajló rekombináció (ún. indirekt rekombináció) esetében a rekombinálódó elektronnak mind az energiája, mind az impulzusa megváltozik. Ez a kristályrács rezgésének kvantumaival, az ún. *fononokkal* való kölcsönhatás révén lehetséges. Egy ilyen, ún. fonon-csatolt rekombináció során 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-átmenetes* (angolul: *multiple quantum-well hetero-junction*) struktúrákkal valósítják meg. E struktúrák tárgyalása jelen könyv kereteit jelentősen meghaladná, ezért ettől eltekintünk, de az érdeklődő olvasó figyelmébe ajánljuk a [3] és [4] jelű irodalmat.

1.5. Különböző színű LED-ek

A gyakorlatban a nagyobb tiltott sáv szélesség és a kisebb mértékű indirekt rekombináció elérése céljából nem elemi, hanem vegyület félvezetőket alkalmaznak. Megfelelő anyagpár választással elérhető, hogy a kristályrács-struktúrában a két szomszédos atom közötti kovalens-kötést biztosító elektronpár figyelembevételével minden atomban ugyanúgy 8 elektron tartózkodik a vegyértékhéjon, mint a szilíciumrácsban. Ez a feltétel természetesen érvényesül a III. és az V. oszlop elemeiből előállított vegyületeknél, így az első LED-ek gallium-arszenidből (Holonyak, 1962) ill. gallium-foszfidből (GaP) ill. ezek elegykristályjaiból 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 sáv szélességű 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).

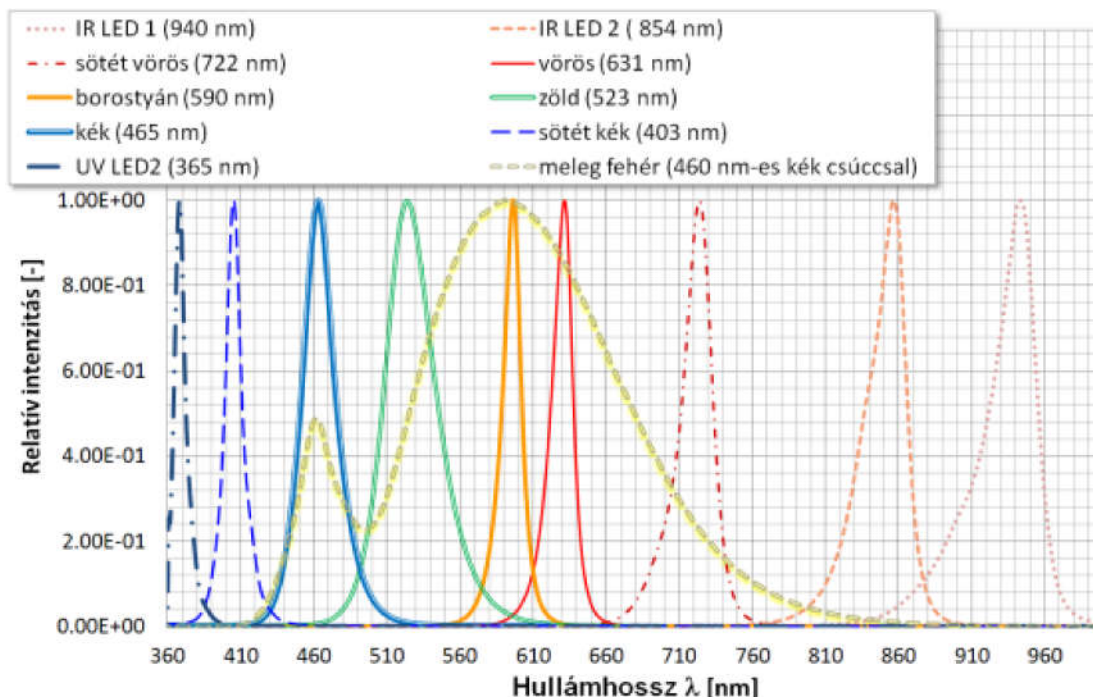


1.6. ábra – A kétféle, széles körben használatos vegyület-félvezető anyagrendszerrel előállítható LED-ek színekoordinátái és tipikus csúcshullámhossz értékei a CIE xy színdiagramban ([3]nyomán).

Mind a 3 vegyértékű, mind az 5 vegyértékű elemekből többféle is alkothatja a kristályt. Az ilyen $AaB1-aXxY1-x$ típusú elegykristályok esetében az $AaB1-a$ és az $XxY1-x$ arányok 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 színekoordinátáit mutatjuk be az 1.6. ábrán.

Fehér LED-ek 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 kék LED-re felvitt speciális fénypor a kéksínű elsődleges sugárzást hosszabb hullámhosszúvá alakítja, a kék és a sárgától a vörösig terjedő kiegészítő színek révén együttesen fehéret szolgáltatnak.

Amint az a 6. ábrán látszik, a színes LED-ek színekoordinátái majdnem a CIE színpatkó határvonalára esnek, ami azt jelenti, hogy a kibocsátott fényük közel monokromatikus. A színes LED-ek spektrális teljesítmény eloszlására valóban az jellemző, hogy számottevő sugárzás csak egy ún. csúcshullámhossz szűk, néhányszor 10 nm-es környezetében tapasztalható (1.7. ábra). A színpatkóban (6. ábra) az is látszik, hogy a fehér LED-ek színekoordinátái jellemzően a (0,33;0,33) koordinátájú ún. fehér pont közelébe esnek.



1.7. ábra – Különböző LED-ek relatív spektrális teljesítmény eloszlása.

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. Színvisszaadásuk jó, vagy kiváló lehet, egyes meleg fehér LED-ek színvisszaadási indexe már évekkal ezelőtt elérte a 85-öt.

1.6. LED-ek hatásfok jellegű paraméterei

1.6.1. 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 fotonemisszióval járó rekombinációban [4]:

$$\eta_{\text{belső}} = \frac{\text{az aktív régióban a fotonok generált fotonok száma}}{\text{az aktív régióban a fotonok injektált elektronok száma}} \quad (4)$$

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 [4]:

$$\eta_{\text{kicsatolás}} = \frac{\text{1 s alatt a szabad térbe kisugárzott fotonok száma}}{\text{az aktív régióban 1 s alatt generált fotonok száma}} \quad (5)$$

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

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

$$\eta_{\text{külső}} = \eta_{\text{belső}} \cdot \eta_{\text{kicsatolás}} = \frac{\text{1 s alatt a szabad térbe kisugárzott fotonok száma}}{\text{az aktív régióban 1 s alatt injektált elektronok száma}} \quad (6)$$

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.

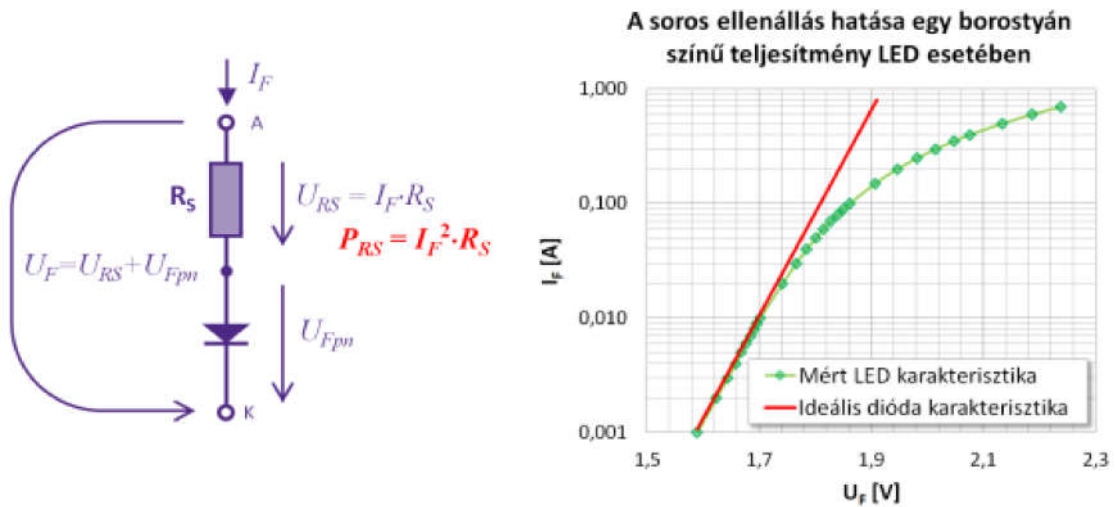
Egy LED **energiakonverziós hatásfoka** alatt a LED által kisugárzott optikai teljesítmény és a LED-be betáplált elektromos teljesítmény arányát értjük:

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P_{el}} \quad (7)$$

ahol Φ_e a *kisugárzott optikai teljesítmény* vagy más szóval a *teljes radiometria fluxus*, $P_{el} = I_F \Phi V_F$ 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 az 1.8. ábrát.

A soros ellenálláson eső $U_{RS} = I_F R_S$ 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 $P_{RS} = I_F U_{RS} = I_F^2 R_S$ 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 bocsát ki egy LED, mint kisebb nyitóáram esetében, de eközben sokkal több veszteségi hő keletkezik, azaz sokkal rosszabb lesz az η_e energiakonverziós hatásfoka.



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

1.6.2. Fényhasznosítás

Ha ismert egy LED $S(\lambda)$ ún. spektrális teljesítmény eloszlása (azaz hogy mely hullámhosszakon mekkora intenzitással sugároz – lásd később a 10. ábrát), akkor a λ_e teljes radiometriai fluxus egyszerűen meghatározható:

$$\Phi_e = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

A Φ_e kisugárzott optikai teljesítménnyel tehát energetikailag tudjuk jellemezni egy LED fénykibocsátását. A világítástechnikai alkalmazásoknál azonban a legfontosabb az, hogy a kibocsátott 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 λ_v , mértékegysége a lm (lumen). Számítási módja:

$$\Phi_v = K_{\max} \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

ahol $K_{\max} = 683 \text{ lm/W}$, 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 [5]:

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} \quad (10)$$

K értéke pusztán a LED $S(\lambda)$ spektrális teljesítmény eloszlásától függ.

A különböző fényforrások összehasonlítására leggyakrabban használt mennyiség a fényhasznosítás (angolul: luminous efficacy), amely a fényforrás (pl. LED) által kibocsátott

teljes fényáram és a betáplált elektromos teljesítmény hányadosa, jele λ_v , mértékegysége lm/W:

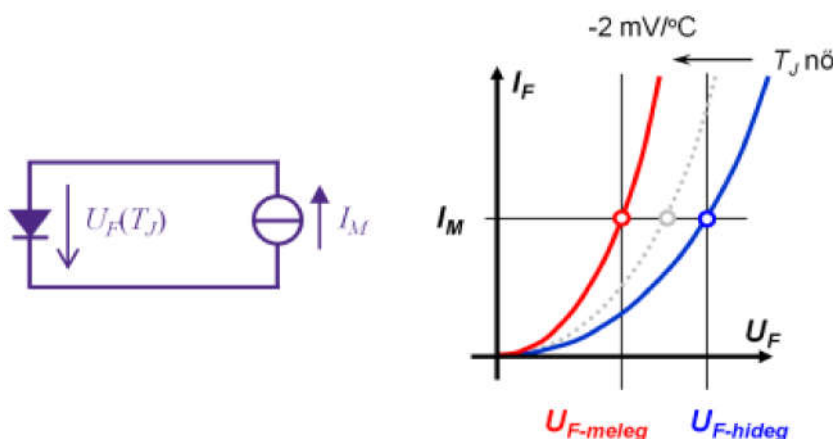
$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P_{el}} = K \cdot \eta_e \quad (11)$$

ahol LED-ek esetében a már ismert módon $P_{el} = I_F \eta V_F$. A fényhasznosítás elvi maximuma a (9) 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 hasonlóképpen függ az üzemeltetés körülményeitől, azaz az alkalmazott nyitóáramtól és a hőmérséklettől, mint az energiakonverziós hatások: a nyitóáram és a hőmérséklet növekedtével a fényhasznosítás is romlik.

1.7. Hőmérsékletfüggés

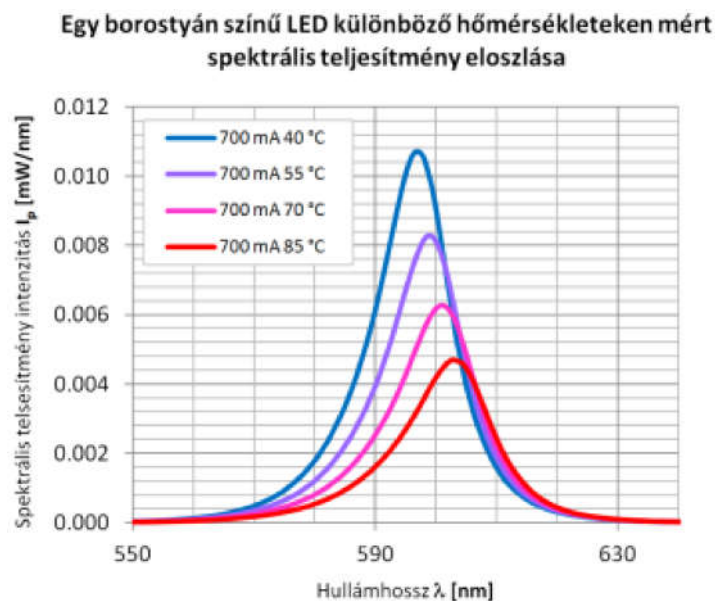
A (2) egyenlet szerinti dióda karakterisztika I_0 áramegyütthatója a pn átmenet T_j hőmérsékletétől erősen függ; akár 10 – 20%-kal is növekedhet, ha az átmenet hőmérséklete 1°C-kal megemelkedik. (A karakterisztika további hőmérsékletfüggését jelenti az exponenciális tagban szereplő termikus feszültség is, de ennek hatása I_0 hőmérsékletfüggéséhez képest kisebb.)



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

Tekintettel arra, hogy a teljesítmény LED-eket a világítástechnikai alkalmazásokban jellegzetesen konstans áramú meghajtással üzemeltetik (ahogy azt az 1.9. 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. 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 kibocsátott fény spektrumának megváltozása, ahogy az az 1.10. 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.



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

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

1.8. 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 [7] követő ún. *LED modulok*.

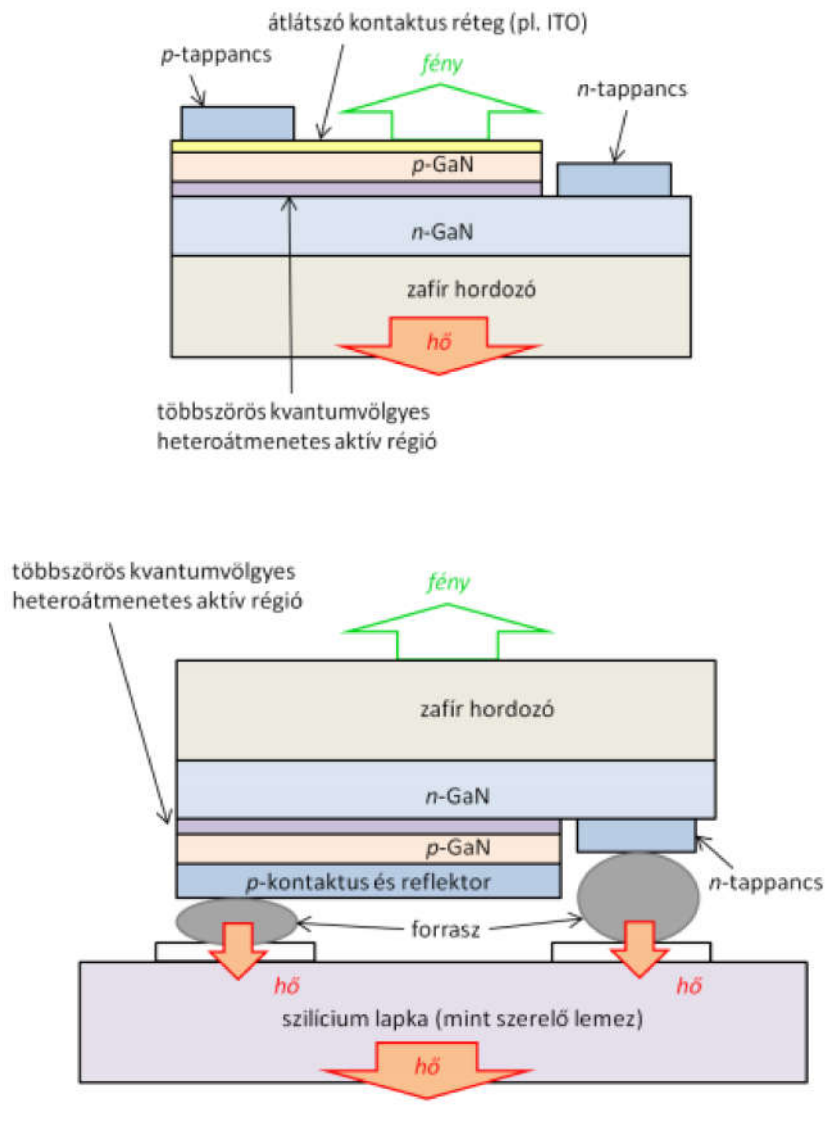
Egy külön kategóriát jelentenek az ún. *LED-es retrofit lámpák* (a hagyományos normál, ill. halogén izzólámpák helyettesítésére), illetve a *retrofit LED csövek* (egyes fénycső típusok helyettesítésére): Ha egy ilyen LED-es retrofit fényforrást helyezünk el egy klasszikus lámpatestben, attól az nem válik 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 hordozón kialakított LED szerelvényen keresztül egy adott világítástechnikai feladat megoldására alkalmas termékig tárgyaljuk a főbb konstrukciós elveket, megfontolásokat.

1.8.1. LED lapkák

A LED lapkák a LED-eket előállító félvezető 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, vákuumpárolgatás). A félvezető szeleten kialakított, elektromos kontaktusokkal ellátott LED lapkákat a darabolás előtt, még a szeleten tesztelik: egy tűs mérőfejjel rácsatlakozik a tesztelő automata és a lapka által kibocsátott fényt egy spektrométerbe alkalmas módon becsatolva (pl. száloptikával vagy alkalmas apertúrával ellátott kisméretű integráló gömböt felhasználva) megméri annak elektromos és optikai jellemzőit. A hibás LED lapkákat még a szeleten megjelölik, így darabolás után a selejtes lapkákat nem tokozzák.

Jellegzetes LED lapka konstrukció sémákat mutatunk be az 1.11. ábrán. Az egyik ilyen az ún. felületi sugárzó lapka (11.a. ábra), ahol a többszörös kvantumvölgyes szerkezetű aktív régióhoz való egyenletes áram-hozzávezetést 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.



b)

1.11. ábra – Jellegzetes LED lapka konstrukciók ([10]3) nyomán): a) felületen sugárzó kivitel, b) reflektoros, közbenső hordozóra flip-chip szerelt kivitel.

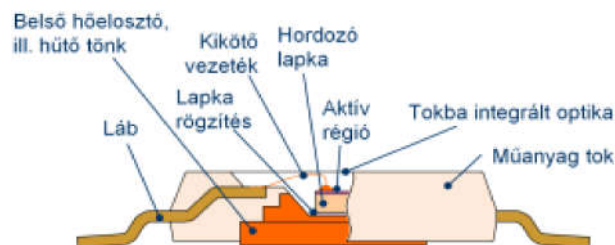
A másik tipikus konstrukció az ún. szilícium lapkára flip-chip technikával szerelt LED lapka. Itt a LED lapkát megfordítva, a lapka kontaktus felületeit felhasználva egy közbenső (szilícium hordozóra) apró forrasz gömbökkel szerelik. Itt az anód kontaktus egyben reflektor is, így a fény egy ilyen LED lapka konstrukció esetében a zafír 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.

1.8.2. Tokozott LED lapkák: a LED tokok

Maguk a LED lapkák a félvezető gyártáson 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 gyártáson konstans nyitóárammal meghajtva megmérnek és nyitófeszültség, illetve fénytechnikai jellemzők (pl. színkoordináták, ill. csúcshullámhossz) szerint osztályozzák azokat. Ez a gyártási 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 üzemi 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 10. ábra tanúsága szerint a LED által kisugárzott teljes fényárama a 25 °C-ra vonatkozó adatlapú értéknél számottevően kisebb lehet.)

Egy jellegzetes, külső hűtőfelülettel és fém lábakkal ellátott, műanyagból készült felület szerelt LED tok szerkezetét láthatjuk az 1.12. ábrán. Az ilyen LED tokok R_{thJC} hőellenállása néhány K/W, legfeljebb kb. 10 K/W nagyságrendű.



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

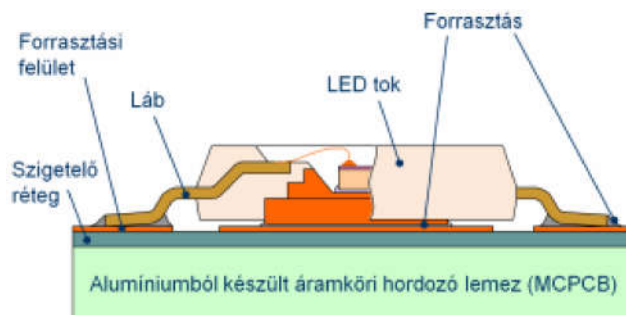
Ma már gyakoriak a nagyon apró, 1 – 2 mm befoglaló méretű ún. láb nélküli kerámia tokok is. Az ilyen tokok is rendelkeznek dedikált hűtő felülettel; az ilyen tokkal szerelt LED-ek hőellenállás csupán 1 K/W körüli.

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.

1.8.3. 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 (1.13. ábra). Gyakori a csillag alakú MCPCB-re

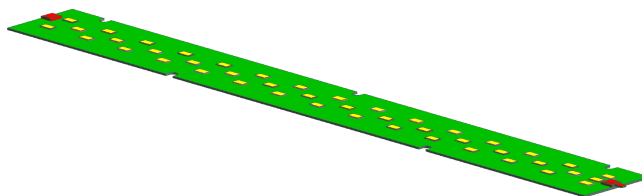
szertelt LED tok, ami önálló alkatrészként is rendelhető egyes gyártóktól. Ezeknek a tipikus hőellenállása 15 K/W körüli.



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

A fémből készült áramköri hordozónak különös jelentősége van a LED hűtése szempontjából, hiszen a tok hűtőfelületén távozó hő 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 helyezünk el a LED tok környezetében, különösen a tok hűtőfelülete alatt.

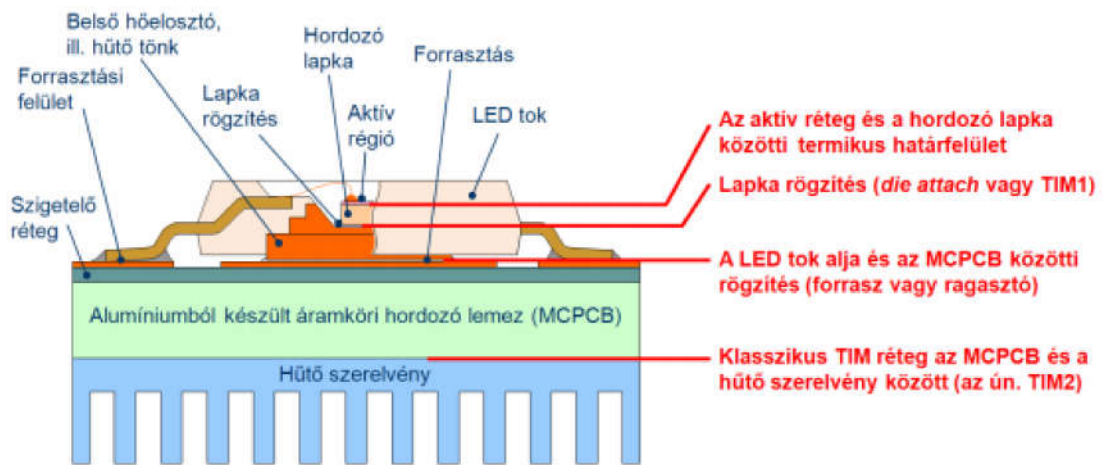


1.14. ábra – Egy számos LED tokot tartalmazó, MCPCB-n kialakított nagyobb LED szerelvény.

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 az 1.14. ábra.

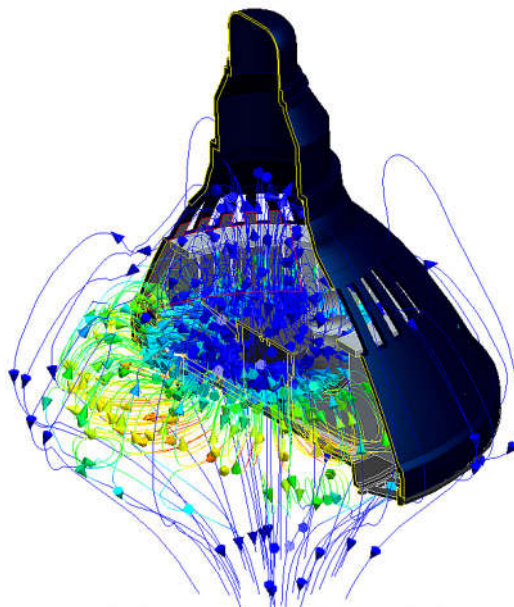
1.8.4. Hűtőszelvényvel ellátott LED szerelvények

A LED-ek jó hűtését, ezáltal azok hatékony működését és hosszú élettartamát hivatottak biztosítani a különféle hűtőszelvények, hűtőbordák (1.15. ábra). A LED lapka aktív régiójától (a pn átmenettől) a hűtőszelvényig a LED veszteségi hője hővezetéssel jut el, majd a hűtőszelvény (pl. egy alkalmas hűtőborda) felületéről a környezetbe áramlással (konvekcióval) adódik át.



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

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 (1.16. ábra). Ez tipikusan a LED alkalmazás gépész tervezőjének a feladata.



1.16. 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 az 1.15. 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 csökkentjük. 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 hűtőszervény felületéről konvekcióval történő hőátadás hozzájárulását a hűtőszervény alakjának, anyagának és felületi megmunkálásának jó megválasztásával lehet a lehető legkisebbre lecsökkenteni. Általános irányelveket erre nehéz adni, mert a tervezéskor számos peremfeltételnek kell megfelelni. Ilyen peremfeltétel például egy retrofit LED lámpa kialakításakor az, hogy a hűtőszervény egy adott formafaktorba (pl. normál izzólámpák helyettesítésekor: A19) bele kell férjen.

1.8.5. CoB LED-ek

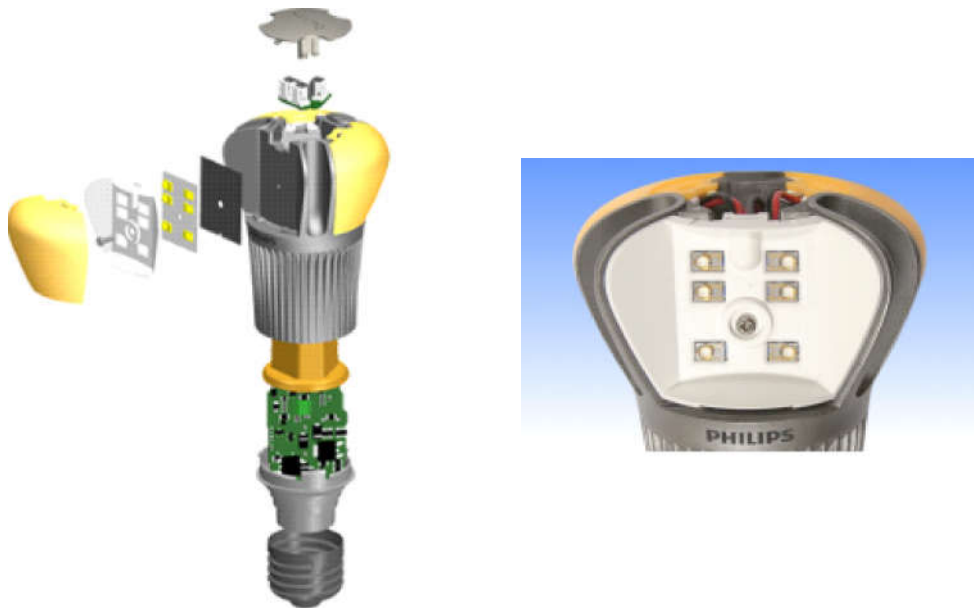


1.17. ábra – CoB LED-ek.

A termikus határfelületek számának csökkentésére jellegzetes példát az ún. CoB (*chip-on-board*) tokozású LED-ek jelentik (17. 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 hűtőszervényre 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.

1.8.6. 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 sülyesztett lámpatestbe), ahol kifejezetten rossz a hőátadás. A kétféle alkalmazási környezetben a LED lámpa teljes fényárama és várható élettartama is jelentősen el fog térni egymástól.



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

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 hűtőszerelvénnyel 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 (1.18. ábra) is, ahol a lámpa belsejében kéken világító LED tokok 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. A távoli fénypor alkalmazásának az is az előnye, hogy a fényporban keletkező konverziós veszteségből származó hő nem melegíti a lámpában található LED lapkákat. (A 18. ábrán bemutatott, ikonikussá vált távoli fényporos LED lámpa egyik nagy hátránya a bonyolult szerkezete és az alkalmazott drága szerelvényei miatti magas ára.)

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-élelciklusára, 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 az 1.19. 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.



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

1.8.7. Szabványos csatlakozó felületekkel ellátott cserélhető LED modulok

Az ilyen LED modulok (1.20. 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.



1.20. ábra – Egy cserélhető, egy adott Zhaga specifikációnak [9] megfelelő LED modul. 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 csereszabotosságot 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 csereszabotosság megoldást jelent a modulokba beépített LED tokok rövid életciklusára 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.

Irodalom

- [1] Székely Vladimír, "Elektronika I – félvezető eszközök", BME VIK 55054. sz. egyetemi jegyzet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001.
- [2] Simonyi Károly: "Elektronfizika" (4. kiadás), Tankönyvkiadó, Budapest, 1981. ISBN 9631744922
- [3] 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
- [4] E. F. Schubert, "Light-emitting diodes" (2. kiadás), Cambridge University Press, 2006, ISBN 0511344767
- [5] CIE S 017/E:2011 ILV "International Lighting Vocabulary" (Nemzetközi Világítástechnikai Szótár) 17-730 sz. definíció, <http://eilv.cie.co.at/term/730>
- [6] 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)
- [7] Zhaga Interface Specification Book 1: Overview and Common Information, <http://www.zhagastandard.org/specifications/book-1.html>
- [8] Clemens J. M. Lasance, András Poppe (szerk.), "Thermal Management for LED Applications", Springer, 2014. ISBN: 9781461450900
- [9] Zhaga Book 5: Interface Specification for Socketable LED Light Engine with Separate Electronic Control Gear, <http://www.zhagastandard.org/specifications/book-5.html>

2. Az üzemeltetés kritikus tényezői, biztonságtechnikai tényezők, LED élettartam

2.1. Beltéri világítás biztonságtechnikai kérdései

2.1.1. Irodai környezet

A villamos biztonságtechnika elsődleges célja a személyi balesetek és súlyos anyagi károkat okozó tüzesetek, katasztrófák megelőzése, másodlagos célja pedig a berendezések megbízható működésnek biztosítása. A villamos szakemberekről – szaktervezők, villanyszerelők, műszaki ellenőrök –, az előírások nemcsak a kellő szakismereteket feltételezik, hanem a gondosságot is. A villamos biztonsági szabályzat általános alapelve szerint a mesterséges belsőtéri világítás létesítését és üzemeltetését is a vonatkozó szabványok és biztonsági előírások szerint kell végezni. Ez egyaránt vonatkozik a gyártmány kiválasztására (tervezés), beépítésére (villanyszerelés) és üzemeltetésére (karbantartás). A világítási berendezés létesítése során alkalmazhatunk gyárilag összeszerelt terméket (lámpatest), ill. elemekből a helyszínen összeszerelendő rendszert. Mindkét esetben fontos, hogy a gyártmányról minden kétséget kizáróan kiderüljön a származási helye. Erre szolgál pl. a CE jelölés; de vigyázat! A Kínából származó termékeken is van CE jelölés, de ennek jelentése China Export! További követelmény, hogy a termékhez mellékelt szerelési útmutató (Gebrauchsanweisung / Instruction for use) egyértelműen jelezze, milyen beépítési és üzemelési viszonyokra készült a termék.

A LED-es belsőtéri világítás az utóbbi néhány év fejlesztéseinek köszönhetően az irodai környezetben is megjelent. A LED talán az első, valóban „zöld” fényforrás, melynek előnyei akkor mutatkoznak, ha a berendezés minden eleme – LED, modul, tápegység, lámpatest - kiváló minőségű, és az üzemelés során figyelembe vesszük annak speciális tulajdonságait. Első helyen említendő a LED melegeddel szembeni érzékenysége. Jóllehet nem hőmérsékletsugárzó, azaz fényének nincs IR-hányada, mégis a fénykeltés folyamata során a kristályban hő keletkezik, s ezt el kell vezetni. Különösen igaz ez, ha az irodai világításhoz pl. álmennyezeti sugárzót (downlight / Einbauleuchte) használunk, melybe a típustól függően több nagyteljesítményű (ún. COB = Chip on Board) LED van beépítve. A hőelvezetésről gyárilag beépített alumínium hűtőnk (heat sink / Kühlkörper) gondoskodik, a passzív hűtés (konvekció) elve alapján: az alumínium test környezetében felmelegedő levegő felszáll, és helyébe hideg levegő áramlik. Ezért a helyszíni szerelés során mindenképp ügyelni kell arra, hogy ezt a folyamatot ne akadályozza pl. hőszigetelés, belsőépítészeti takarás. Hiszen a túlmelegedés lerövidíti a LED élettartamát, s extrém esetben tüzet okozhat. Az irodavilágítás hangulatos kiegészítője a rejtett világítás, mely készülhet ún. LED-szalagból (strip, Band) is. A rendszer elemeit – LED-tekercs, betáp- és összekötő elemek, tápegység, diffúzor – helyszínen szerelik össze. Itt is elsődleges követelmény a beépítendő termékek kiváló minősége. A tekercsben kapható LED-szalagot a helyszínen méretre vágják, és öntapadós felületével felragasztják a kijelölt felületre, alakzatnál a szükséges összekötő elemekkel együtt. Rossz hővezetőjű felületek – pl. gipszkarton, fa, műanyag - esetén alumínium profil alkalmazása

szükséges, mely a lámpatestekhez hasonlóan a hőelvezetést végzi. A LED pontszerű fényét profilba pattintható műanyag diffúzorral komfortosítják. Kerülni kell a kültéri, IP65/68 védettségű LED-szalag belsőtéri alkalmazását (száraz üzem), mert a műanyagba öntött LED hőhártyartását a kültér jobb hűtőközegére (pl. víz, épülethomlokzat) méretezik. A LED-es világítási berendezés érintésvédelme I. vagy II. érintésvédelmi (év) osztályú lámpatest, ill. 12 vagy 24 V-os (SELV) LED-szalag alkalmazásával oldható meg. (Kerüljük kereskedelemben „LED-slag, „LED-kábel” stb. elnevezéssel futó, hálózati feszültséggel működő termékeket) A LED-es működtető egység (driver/Treiber) általában műanyag tokozású (II. év osztály). Növeli a biztonságot, ha a törpefeszültségű (SELV) és a primer (230V 50Hz) tekercs galvanikusan is el van választva (III. év. osztály). Éghető felületre csak a tűzvédelmi előírásoknak megfelelő, MM-jelzéssel ellátott típus szerelhető. Végül megemlítendő, hogy a LED-szalag elektronikai termék, tehát érzékeny a statikus feltöltődésre. Ezért a szerelésnél célszerű elektrosztatikus földelés alkalmazása.

2.1.2. Ipari környezet

Az utóbbi néhány évben elképesztő ütemben megnőtt a LED-es világítótestek iránti igény a világítástechnika minden területén, így az ipari környezetben alkalmazni kívánt berendezések vonatkozásában is. A LED-es berendezések betervezése a fénytechnikai számítások mellett a tervezőtől számos egyéb paraméter vizsgálatát is megköveteli, amelyek alapján eldönthető a kiválasztott berendezés alkalmazhatósága.

Természetesen alapvető követelmény velük szemben, hogy valamennyi rájuk vonatkozó szabványnak megfeleljenek. (Lámpatestszabvány, fotobiológiai biztonság, EMC..)

Ipari terekben, csarnokokban is az egyik alapvető követelmény a lámpatesttel szemben a megfelelő IP védettség, és mivel beltérben (általában) vízbehatolásra nem kell számítani, a valószínűleg poros környezet miatt a porbehatolás elleni védelem kiemelt fontosságú. Mivel a LED-es berendezésektől igen magas élettartamot várunk el (50 vagy akár 80 000 órát is), ha folyamatos bekapcsolási időt számítunk, ez 6-9 év üzemidőt jelent. Természetesen elvárt szempont a karbantartás mentesség is. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a világítótesteket nem kell legalább évenként portalanítni és ellenőrizni a belső szerelvények, vezetékkötések épségét.

A LED-es világítási berendezések- tekintve, hogy gyakorlatilag kizárólag elektronikus elemekből épülnek fel, jóval érzékenyebbek a környezeti behatásokkal szemben, mint a hagyományos lámpatestek. A LED gyártók igen precízen meghatározzák a LED-ek maximális üzemi hőmérsékletét (pn átmenet hőmérséklet).

A másik meghatározó elektronikus elem a tápegység, amely a működéshez szükséges tápáramot állítja elő. A gyártók ennek az elemnek is meghatározzák a maximális működési hőmérsékletét.

Ipari környezetben alkalmazott LED-es világítótestek -egységteljesítménye magas, általában 100-150 W-ot is meghaladó - tekintve, hogy az alkalmazási környezet geometriai kiterjedése általában nagy.

Ez a működési hőmérséklet szempontjából igénybe veszi a beépített alkatrészeket.

Van még egy igen lényeges működési biztonságot befolyásoló elem: a környezeti hőmérséklet. A csarnokok, raktárak világítótest magasságban levő környezeti hőmérséklete általában elérheti a 30-40 °C-ot. Emellett igen sokat számít a tető hőszigetelése, vagy pl. lapos tető alkalmazása. A hátrányos körülmények összegződése esetén előfordulhat, hogy a világítótestek környezeti alaphőmérséklete 50-60 °C is lehet, különösen meleg napsütéses nyári délutánokon.

Alapvető annak ismerete a tervezéskor, hogy a világítótestek napközben is folyamatosan működnek, vagy csak sötétedéskor kapcsolják be őket.

Folyamatos működés esetén a tervezési hőmérséklet nyilván jóval magasabb, mint abban az esetben, ha csak sötétedéstől működnek a világítótestek. A gyártók általában megadják a világítótestek maximális működési környezeti hőmérsékletét.

A biztonság érdekében, a csak esti, éjszakai bekapcsolásra tervezett világításra a berendezések táphálózatába be kell építeni olyan biztonsági elemeket, amelyek a napközbeni bekapcsolást teljes biztonsággal megakadályozzák. Emellett tiltani kell a napközbeni karbantartási célú bekapcsolást is, mivel ugyanolyan káros következménnyel járhat, mint hiba miatti nappali bekapcsolás.

A korszerű működtető elektronikák nagy része már olyan saját beépített hőmérsékletvédelemmel rendelkezik, amely érzékeli a működtető elektronika hőmérsékletét és amennyiben az meghaladja a beállított megengedett értéket, elkezdi leszállítani a teljesítményt, ami a működési hőmérséklet csökkenésével jár. A leszállítás addig a teljesítményig történik, amelynél a tápegység hőmérséklete visszaáll a megengedett értékre. Előfordulhat az is, hogy a hőmérséklet olyan magas, hogy a tápegység csak teljes kikapcsolással tud védekezni.

A másik kritikus elem a LED modul, illetve a rajta levő LED-ek működési hőmérséklete. Mivel ez a maximális érték is meghatározott (PI: a pn átmenet maximális üzemi hőmérséklete általában 150 °C), szükséges lehet a LED-ek túlmelegedés elleni védelme is. Ezt a feladatot is a működtető elektronikák tudják ellátni.

Korszerű elektronikákba beépítenek olyan védelmet, is amelynek meghatározó eleme a LED modul megfelelő helyére beépített hőmérséklet érzékelő elemből áll, (általában NTC ellenállás) és ezt kell a működtető elektronika e célra kialakított kapcsaiba bekötni. Ennek segítségével az elektronika tudja érzékelni a LED modul, illetve a LED-ek működési hőmérsékletét is, és amennyiben az meghalad egy beállított értéket, ugyanúgy leszállítja a teljesítményt, mint az előzőekben vázolt esetben.

Beltéri csarnokokban, raktárakban légköri eredetű túlszűrés viszonylag ritkán alakulhat ki, azonban kapcsolási eredetű túlfeszültség gyakran előfordulhat. (Nagy teljesítményű villamos berendezések, be, illetve kikapcsolása, zárlat, stb)

A LED-es világítótestekbe épített elektronikus működtető elemek igen érzékenyek a túlfeszültségre, illetve a túlfeszültség impulzusokra.

Az előtétek többsége tartalmaz túlfeszültség védelmet, ennek értékeit, levezető képességét általában megadják a gyártók.

Sokszor azonban előfordul, hogy ezek az értékek nem érik el a biztonságos védelmi szintet. Ez esetben vagy a világítótestekbe kell beépíteni egy kiegészítő védelmet, vagy a táphálózatba kell beépíteni egy megfelelő túlfeszültségvédelmet.

Mivel a csarnokokban, raktárakban általában nagyszámú és nagy teljesítményű LED-es berendezés kerül felszerelésre, gondot kell fordítani a bekapcsolás módjára. Ugyanis a működtető egységek bekapcsoláskor meglehetősen nagy értékű tranziens áramlökést hoznak létre. Nagyszámú világítótest egy időben történő bekapcsolásakor előfordulhat, hogy a védelem működésbe lép, anélkül hogy ténylegesen hibajelenség fordult volna elő.

Az előtétgyártók általában megadják a fellépő maximális bekapcsolási áramot, illetve azt, hogy pl. egy 16 A-es kismegszakítóra maximálisan hány egység köthető.

A probléma megoldható több lépcsőben történő bekapcsolással, több fázisra, áramkörre történő osztással.

Tervezéskor ellenőrizni kell, hogy csak olyan előtéttel rendelkező világítótestek kerüljenek beépítésre, amelyekben megfelelő felharmonikus szűrés van. (A felharmonikus áramok értékének összegét THDi értéknek nevezik, és megengedett maximális értéke 20 %)

A tervezést könnyebbé teszi, hogy a legtöbb előtét teljesítmény stabilizált, és általában 190-260 V közötti hálózati tápfeszültséggel üzemeltethető, anélkül, hogy a kimenő teljesítménye 1-2 %-nál nagyobb mértékben változna.

További előnye a LED-es világítótestek alkalmazásának, hogy érzéketlenek a be és kikapcsolás gyakoriságára, valamint bekapcsoláskor azonnal teljes intenzitással világítanak.

Sok előtét alkalmas egyenáramú táplálásra is, ezek alkalmazásával egyszerűen kialakítható tartalék, illetve vészvilágító rendszer.

2.2. Kültéri világítás biztonságtechnikai kérdései

A kültéri világítási berendezések alatt általában a közvilágítást, ipari, mezőgazdasági terek, szabadtéri tárolók, raktárak világítását, a díszvilágítást, (és a sportvilágítást) értjük.

E berendezések biztonságos üzemelésének meghatározó tényezője a védettség. Ez alatt a por és vízbehatolás elleni védettséget értjük. A védettség két számjegyből áll, az első a porbehatolás elleni védelmet, a második a vízbehatolás elleni védettséget jelöli. Kültéri lámpatestek esetében jelenleg, főleg LED-es világítótestek esetén minimálisan az IP 65 védettségi szintet tartják megengedhetőnek. Azonban az új fejlesztésű LED-es berendezések már általában IP 66 védettségi szintűek. A burkolatba süllyesztett berendezések, víz alatti berendezések védettsége természetesen ennél magasabb. Természetesen minden

világítótesttel szemben alapvető követelmény a vonatkozó szabványoknak történő megfelelés.

IP védeettségek			
Első számjegy		Második számjegy	
Érték	Jelentés	Érték	Jelentés
0	Nem védett	0	Nem védett
1	>50 mm átmérőjű testek ellen védett (kézféj)	1	Függőlegesen csepegő víz ellen védett
2	>12 mm átmérőjű testek ellen védett (ujj)	2	Függőlegestől 15°-ig eltérő csepegő víz ellen védett
3	>2,5 mm átmérőjű testek ellen védett (szerszám)	3	Esővíz ellen védett. A függőlegeshez képest legfeljebb 60°-os szögben érkező permetező víz ellen védett.
4	>1 mm átmérőjű testek ellen védett (vezeték)	4	Fröccsenő víz ellen védett (minden irányból)
5	Porlerakódás ellen védett. A por behatolását teljesen nem akadályozza meg, de a bejutás mértéke a működést nem akadályozza.	5	Vízszugár ellen védett (minden irányból)
6	Por behatolása ellen védett	6	Erős vízszugár ellen védett
		7	Időszakos vízbe merítés ellen védett
		8	Tartós vízbe merítés ellen védett
		9K*	Fokozott védetség vízbe merítés, és nagynyomású tisztítás hatásai ellen.

A LED-es világítótestek, ellentétben a hagyományos gázkisüléses fényforrással, induktív előtétrel működő lámpatestekkel, mivel gyakorlatilag minden egységük elektronikus elem, sokkal érzékenyebbek a kültéri behatásokra, mint elődjeik.

A LED-es berendezéseknek két fő eleme van. Természetesen a világítótest burkolat mellett. Az egyik meghatározó elem az elektronikus előtét (tápegység), amely előállítja LED-ek működéséhez szükséges tápáramot, a másik meghatározó elem maga a világító egység, a LED modul, a LED-ekkel.

A kültéren üzemelő berendezések általában napközben nincsenek bekapcsolva, működési időtartományuk általában nem azonos a nap legmelegebb időszakával. A LED-es berendezések mindkét meghatározó elektronikus eleme igen érzékeny a működési hőmérsékletre. Viszont a kapcsoló-berendezés, alkonykapcsoló meghibásodása esetén előfordulhat, hogy a berendezés bekapcsolt állapotba kerül a nappali időszakban, és ez nyári meleg délutánokon jelentős túlhőmérsékletet eredményez az egységekben, akár olyan mértékűt is, amely károsíthatja az előtétet és a LED-eket. Nyilvánvaló, hogy a berendezést úgy kell méretezni, hogy károsodás nélkül elviselje -akár hosszabb időn keresztül is. A

korszerű meghajtóegységek rendelkeznek saját hőmérsékletvédelemmel. Ez akkor lép működésbe, amikor az előtét hőmérséklete eléri azt az értéket, amely már károsodást idézne elő. Általában ilyen esetben az előtét leszabályozza a tápáramot, ezzel a teljesítményt, de ha ez nem elegendő, kikapcsolja a berendezést. Természetesen ez a védelem automatikusan visszakapcsol, amennyiben a hőmérséklet értéke lecsökken a normál működési tartományba. A legtöbb esetben az előtét mellett a LED-ek káros túlmelegedését is meg kell akadályozni.

Mind az előtétek, mind a LED-ek maximális üzemi hőmérséklete a gyártók által igen pontosan meg van határozva. A világítótestek biztonságos és tartós működéséhez ezeket a határértékeket gondosan be kell tartani. Alattomos jelenség, hogy a megengedett hőmérsékletértékek túllépésekor nem biztos, hogy azonnal meghibásodik a berendezés, viszont lecsökken az előtét és LED-ek élettartama. Míg az előtét meghibásodása szembetűnő, működésképtelenséget okoz, a LED-ek esetében felgyorsul az öregedési folyamat, gyorsabban csökken a fényhasznosítás a tervezett, prognosztizált értéknél.

A LED modul, illetve a LED-ek hőmérsékletvédelmét is az előtét látja el. A LED modul megfelelő helyére egy hőmérséklet változás hatására értékét változtató ellenállást elhelyezve (Pl.: NTC) és az előtét erre kiképzett csatlakozóiba kötve az előtét érzékeli a LED modul hőmérsékletét is, és a beállított határtérték elérésekor elkezd szabályozni a berendezést a tápáram csökkentésével. (Szükség esetén teljesen lekapcsolja a világítótestet.)

Kültéri berendezéseknél igen nagy mértékben befolyásolja a működési körülményeket. a környezeti hőmérséklet, illetve a napsütés. Jelenleg kedveltek a sötét, grafit színű világítótestek, ezek felületi, illetve belső hőmérséklete viszont bekapcsolás nélkül is elérheti az 50-60 °C-ot.

A túlmelegedés ellen hatásos lehet a lámpatestek konstrukciós felépítése is. Mivel a LED-ek a keletkező veszteséghőt nem a fénykibocsátás irányába, hanem hátrafelé, a jó hővezetés érdekében alumíniumból készült "nyák" irányába bocsátják ki, ezért ehhez kell igazítani a hűtési rendszert. A legtöbb LED-es világítótest LED modult tartalmazó oldala igen lapos és gyakorlatilag mindig alumínium öntvényből készül. Ennek belső oldalára helyezik (ragasztják, vagy csavarozzák) a LED-eket, ezáltal a hőátadás, illetve a hűtés igen jó hatásfokú. A szokásos megoldások: hővezető paszta csavarozással, vagy kétoldalas hővezető ragasztó. Előforduló és a legegyszerűbb megoldás, ha csak közvetlen csavarozással helyezik fel a hűtőfelületre a LED modulokat, ehhez azonban viszonylag nagy modulfelület szükséges, hogy a hőátadás mértéke megfelelő legyen.

Kültéren alkalmazott világítótestek esetén a táphálózaton egyaránt előfordulhatnak légköri eredetű (villámcsapás) és kapcsolási túlfeszültségek. Ezek értéke a több kV értéket is elérheti. Nyilvánvaló, hogy a LED-es világítótestek elektronikus tápegységeit ezen túlfeszültségek ellen védeni kell. A legtöbb korszerű előtét tartalmaz túlfeszültségvédelmet. Ennek védelmi szintjét a gyártók általában katalógusaikban megadják. Ennek mértéke nem minden esetben elegendő, ekkor szükséges kiegészítő túlfeszültség védelem.

Különösen a szabadvezetékes hálózatokon üzemelő közvilágítási világítótestek vannak kitéve a légköri eredetű túlfeszültségnek. Általában az előtétgyártók a közvilágításban alkalmazott előtéttekbe 6 vagy 10 kV-os túlfeszültségvédelmet építenek be. Ezekben a hálózatokban nem elegendő a központi kapcsolóegységben elhelyezett központi védelem, mivel nem biztos, hogy a túlfeszültség hullám a táppontból, illetve a táppont felől halad végig a tápvezetéken. Nyilvánvaló, hogyha közeli villámcsapás a hálózat közepe táján következik be, a tápvezetékbe átindukálódó túlfeszültség hullám innen indul el a tápvezeték mindkét irányába. Ekkor természetesen a központi kapcsoló-berendezésben elhelyezett védelem hatástalan.

Főleg közvilágítási berendezések esetében fordul elő, hogy bekapcsolt állapotban akarják javítani a világítótesteket. Természetesen ha a berendezés nem világít, nem látszik, hogy feszültség alatt van. Ezért gyakran helyeznek el a világítótestekben egy késes bontókapcsolót, amely a világítótest nyitásakor annak egységeit egészen a hálózati csatlakozópontig feszültségmentesíti. Ennek nyilvánvaló módon életvédelmi célja van, mivel a feszültség alatti szereléskor előfordulnak áramütéses balesetek.

Szót kell ejteni a világítótestek túláram, illetve zárlatvédelméről.

Kábeles hálózat esetén az oszlop aljában elhelyezett kábelcsatlakozó doboz tartalmaz olvadóbiztosítót, amely ellátja az oszlopon levő világítótest egyedi védelmét.

Szabadvezetékes hálózaton telepített világítótestek esetén más a helyzet. Ebben az esetben is szükséges egyedileg biztosítani a világítótesteket, mivel ennek elhagyása esetén egy berendezésben fellépő hiba esetén a szakaszvédelem lép működésbe, ezáltal teljes utcák borulhatnak sötétbe, emellett a hibás egység megtalálása is nehézkes. Szokásos megoldás a lámpatest leágazásba külső függőbiztosítót elhelyezni, vagy ami praktikusabb megoldás, minden világítótestbe egyedi biztosítót kell elhelyezni.

A LED-ek alkalmazásával ugrásszerűen megnőtt a díszvilágítási berendezések választéka, és alkalmazhatósági lehetősége.

A LED-ek színválasztéka, a színvezérlés gyakorlatilag végtelen lehetősége megsokszorozta a felhasználási területet.

Ezek a díszvilágítási berendezések általában olyan helyeken vannak felszerelve, amelyek általában igen nehezen megközelíthető helyeken vannak felszerelve.

Ezek alkalmazásával kapcsolatban az alapvető követelmények: igen megbízható, hosszú élettartam, magas szintű üzembiztonság, biztonságos rögzítés, és megbízható, megfelelő védettség.

A színes LED-ek alkalmazásával nagymértékben megnőtt a burkolatba süllyesztett LED-es világítótestek alkalmazási lehetősége.

E berendezések tervezésekor igen gondosan kell eljárni. Ugyanis a tápfeszültség ebben az esetben is 230 V-os primer feszültségű tápegység és ennek szekunder törpefeszültségével táplálják a LED-es egységeket. A 230 V-os tápegységet igen gondosan, csak arra alkalmas tokozatban és megbízhatóan zárható helyen kell elhelyezni. Fokozott gondot kell fordítani a

talajszint alatt levő vezetékkötésekre. Ezeket általában IP 68 védetségű, zárt csatlakozódobozban helyezik el.

Mivel a világítótestekben levő LED-eket számos helyről be lehet szerezni, és mivel vannak olyan LED típusok, amelyek UV tartományban is sugároznak, szükséges annak ellenőrzése, hogy az alkalmazni kívánt világítótest nem sugároz-e UV tartományban, amely károsíthatja a látást. Megbízható LED gyártók megadják az egyes LED típusokra vonatkozó fotobiztonsági adatokat. Másik lehetőség megfelelő műszerezettséggel ellátott fénytechnikai laboratóriumok igénybevétele.

Megbízható világítótest gyártók nem használnak UV tartományban sugárzó LED-eket.

Veszélyes biztonságtechnikai problémája a LED-es világítótesteknek a működtető egység szekunder feszültsége.

Kisebb teljesítményű világítótestekben, amikor viszonylag kisszámú LED-et kötnek sorba, ezek eredő feszültsége nem haladja meg a törpefeszültség biztonsági értékét, azaz nem okozhat áramütést. Ezek az úgynevezett SELV rendszerű előtétek. Ezek burkolatán minden esetben feltüntetik a "SELV" feliratot.

Az egyre nagyobb teljesítményű és ezzel együtt egyre több LED sorba kötésével kialakított világítótest típusokban a nagyszámú sorba kötött LED miatt az eredő feszültség meghaladhatja a megengedett biztonsági törpefeszültség értéket, azaz a világítótest szekunder oldalán levő feszültség áramütést okozhat. Az ilyen típusú előtéteken nem tüntetik fel a "SELV" feliratot.

Ezekben a világítótestekben már normál szigeteléssel kell ellátni a LED tápvezetéseket, és megfelelően kell szigetelni a LED-eket, illetve a LED-eket tartalmazó paneleket is.

Az egyes modulok csatlakozói (amelyek általában bontható kivitelűek) is csak olyan típusúak lehetnek, amelyeknek megfelelő a szigetelési szintje.

Több gyártó a nagyobb teljesítményű világítótestekben több áramkört alakít ki, annak érdekében, hogy belül maradjon a SELV rendszerben.

Összefoglalva: a LED-es világítótestek sokkal érzékenyebbek a környezeti behatásokra, az üzemelési hőmérsékletre, a túlmelegedésre.

Ami kevés kárt okozott a hagyományos lámpatestekben, sokkal több problémát, hibát okozhat a LED-es berendezésekben: a túlfeszültség.

Fokozottan kell ügyelni az alkalmazott világítótest védetségű szintjére, mivel a berendezésben levő elektronika igen érzékeny a nedvességre, páralecsapódásra.

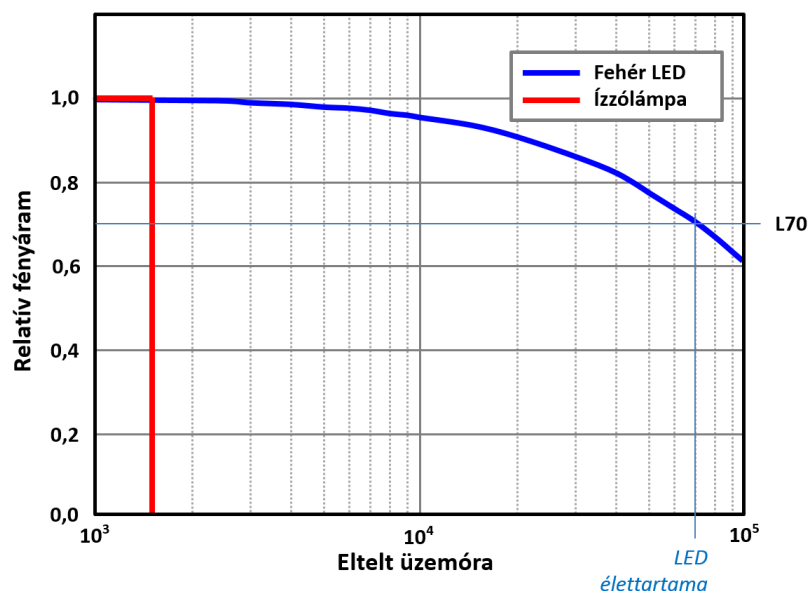
2.3. LED élettartam, élettartamot befolyásoló tényezők

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

2.3.1. A LED-ek élettartamának a fogalma

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

LED-ek esetében a korai katasztrofális 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 a 2.1. 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.

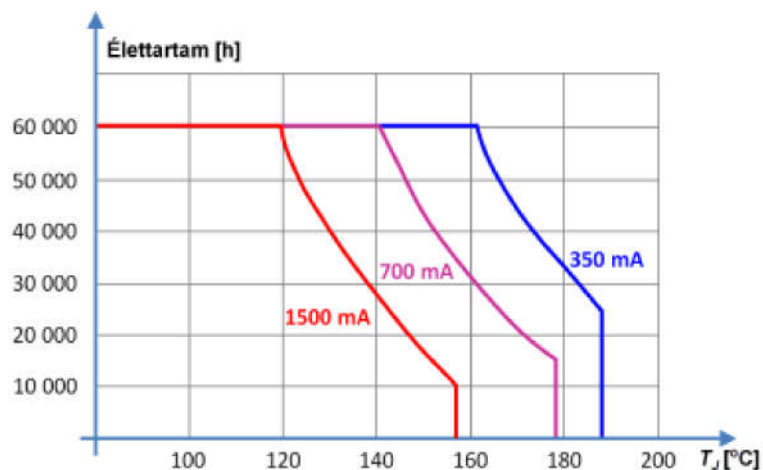


2.1. ábra – Egy fehér LED és egy izzólámpa jellegzetes fényáram változása az eltelt üzemidő függvényében ([1] nyomán).

Azt, hogy egy fényforrás mennyire képes eredeti fényáramát megőrizni, **fényáram tartásnak** nevezzük. Az angol szaknyelv ezt pongyola módon *lumen maintenance*-nek nevezi (a helyes kifejezés *luminous flux maintenance* 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 2.2. 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.



2.2. 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.

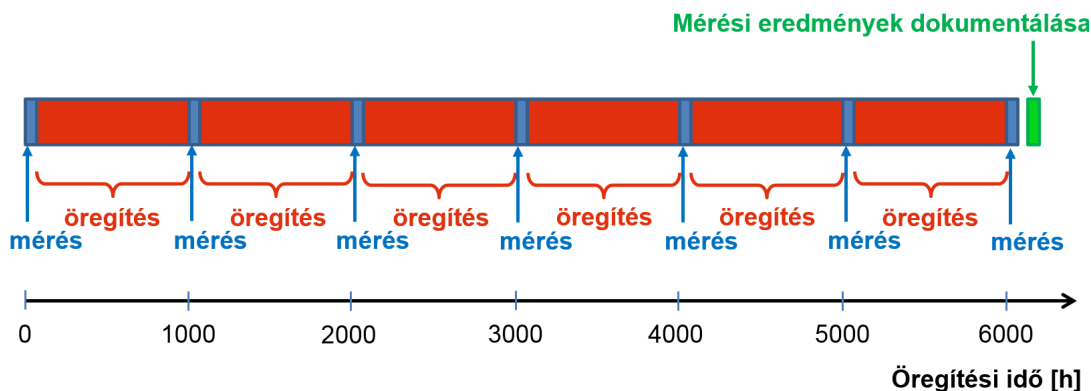
2.3.2. A LED-ek öregítési vizsgálata

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** [2]. 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; az ezen időtartam alatt bekövetkezett változások alapján becslik a gyártók a LED-ek várható élettartamát.

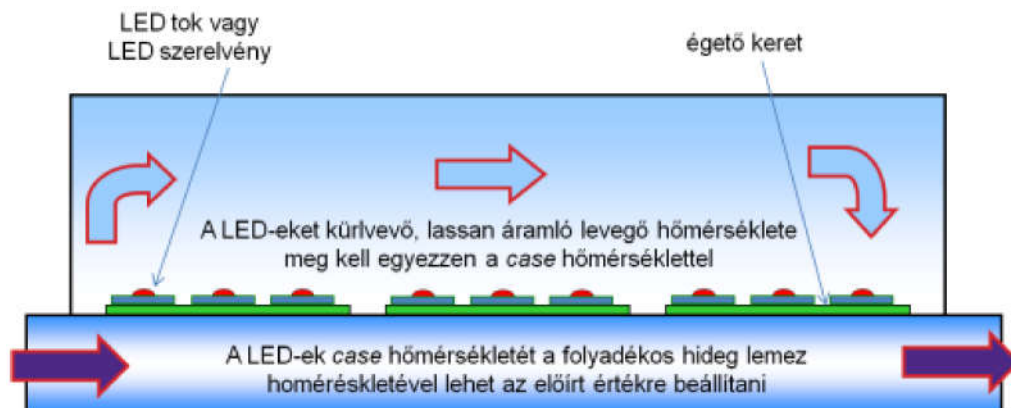
A szabvány előírásokat tartalmaz az öregítésnek kitett LED-ek minimális számára, az öregítés körülményeire, valamint arra vonatkozólag, hogy az öregítés során milyen gyakorisággal kell a LED-ek egyes paramétereit megmérni.



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

A legfontosabb előírások a következők:

- alkatrész szintű öregítés történik, azaz LED tokok és LED szerelvények (egy LED vagy LED 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 színekoordinátákat) mérjük rendszeres időközönként; elegendő csupán ezen jellemzők relatív értékének változását monitorozni;
- az öregítés konstans egyenáramú táplálás mellett történik, egy segéd tápegység felhasználásával, legfeljebb $\pm 3\%$ ingadozással, mérés során legfeljebb $\pm 0,5\%$ 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 ± 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.



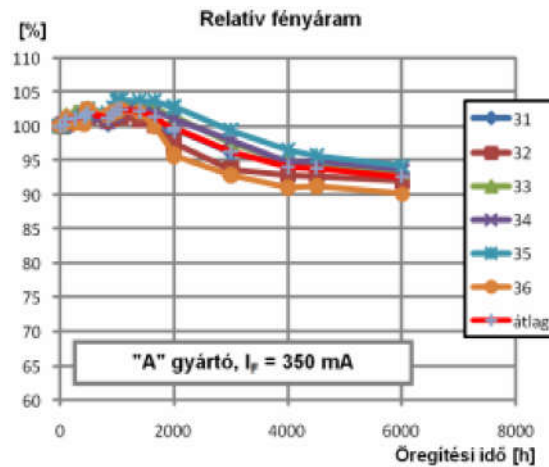
2.4. ábra – Egy, az LM-80-as szabvány környezeti követelményeinek eleget tevő LED öregítő kamra elvi vázlata.

Mint látható, ez a szabvány csak az öregítéses vizsgálatok menetét (2.3. ábra) és körülményeit (2.4. és 2.5. ábra) rögzíti, magáról az élettartam becslésről nem szól. Az LM-80-as szabványnak megfelelő vizsgálatok igen drágák 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.



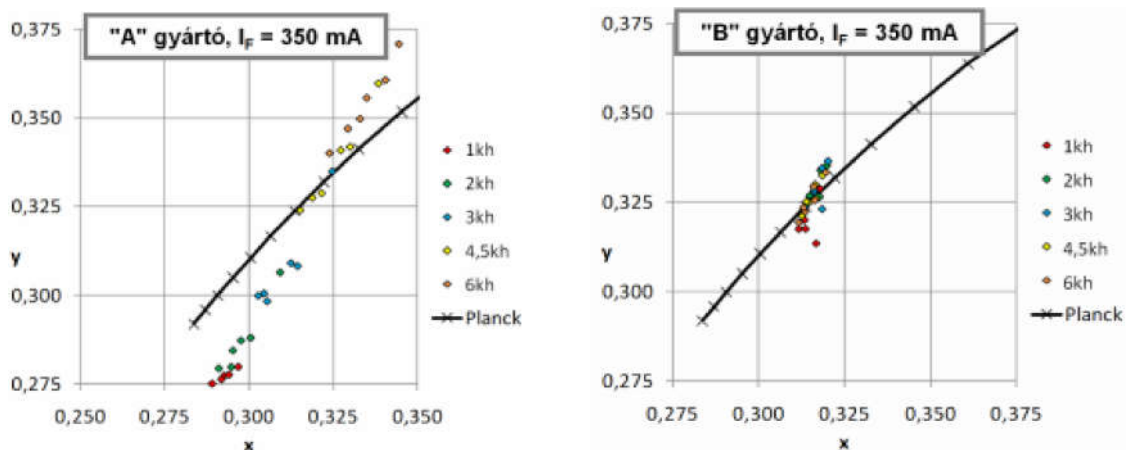
2.5. ábra – Egy LM-80-as szabvány szerinti LED öregítésre szolgáló kamra, benne égető keretre szerelt LED-ekkel egy vezető gyártónál nyitott és zárt állapotban. (Fotók a Mentor Graphics MicReD szíveségéből.)

Illusztrációképpen egy LED öregítéses kísérlet néhány eredményét mutatjuk be a 2.6. és 2.7. ábrán, a [3] publikáció nyomán. E vizsgálatok tanúsága szerint nem csak a fényáram tartás tekinthető jó öregedés jelzőnek. Például a teljes R_{thJC} (a p-n átmenettől a tokozásig mért (junction-to-case) hőellenállás, 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 (2.8. ábra) [4].

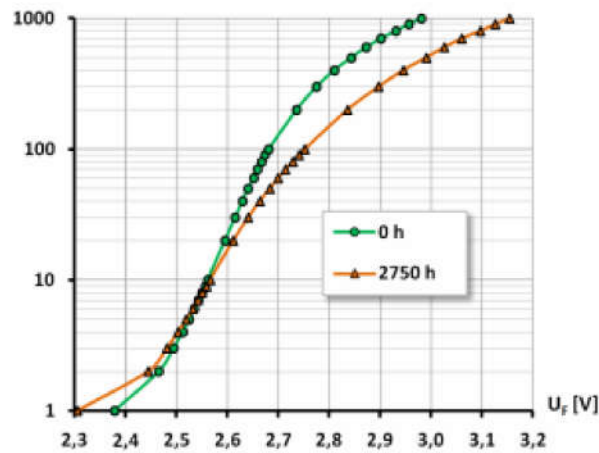


2.6. ábra – Egy neves gyártó fehér LED-jének fényáram tartása ([3] nyomán): az első 1500 órában a relatív fényáram enyhén növekedése, ezt követően lassuló ütemű degradációja figyelhető meg.

Sokan tévesen úgy vélik, hogy az 55, ill. 85 °C-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. 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 2.2. ábrán is jól látszik.



2.7. ábra – Egy-egy neves gyártó fehér LED-jének színkoordináta változásai 6000 óra öregítés során ([3] nyomán): az gyártó esetében sárgulás figyelhető meg.

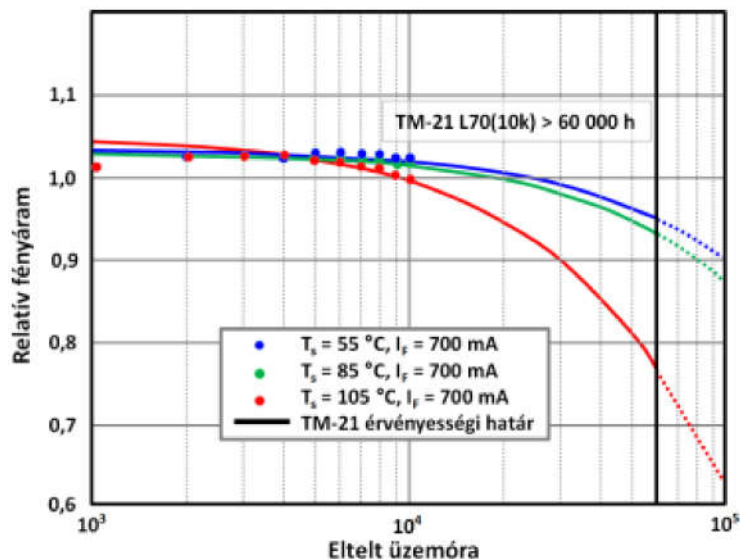


2.8. ábra – Egy fehér LED nyitó irányú elektromos karakterisztikája közel 3000 óra öregítés után [4].

2.3.3. 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 [5].

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-szorosaig 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.)



2.9. ábra – Tipikus LED fényáram tartási görbék 10 000 órás LM-80-as mérési eredményei alapján a TM-21 szerinti extrapolációval számolva ([1] nyomán).

A modell a következő:

$$D(t) = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot t) \quad (12)$$

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

$$L_p = \frac{\ln\left(\frac{100\alpha}{p}\right)}{\beta} \quad (13)$$

módon számolható, ahol p a kérdéses y százalék érték. A TM-21-es dokumentum szerinti élettartam számításokat egy bárki által szabadon használható kalkulátor alkalmazás is segíti [6], [7] – igaz ugyan, hogy ehhez angol nyelvismeret is szükséges.

Az elmúlt években a gyártói adatlapokon a Bxx-Lyy diagramokat kezdik felváltani a TM-21-es módszerrel becsült élettartam görbék. Ilyen görbét láthatunk a 9. 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.

2.3.4. 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 [10], illetve egy teljes angol nyelvű monográfiát [11] ajánlunk.

A világítástechnika szempontjából releváns, nagyobb teljesítményű LED-eknél a nem kielégítő hűtés okozza a legtöbb meghibásodást. Fehér LED-ek esetén, ha a rövid hullámhosszúságú 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 teljesítmény eloszlás 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 termékekre. 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).

2.3.5. 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 [8] fogalmaz meg követelményeket az öregítésre és az öregítés közbeni fényáram tartás mérésére. Az IES TM-28-14 jelű dokumentum [9] 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.

Irodalom

- [1] Lumileds, "Lumen maintenance and reliability",
<http://www.lumileds.com/technology/luxeon-technology/lumen-maintenance-and-reliability>

- [2] IES-LM-80-15 szabvány, "IES Approved Method: Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Packages, Arrays and Modules", ISBN 9780879953157 (2015)
- [3] 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
- [4] Hegedűs János, "Multi-domain circuit modeling of LEDs reflecting device aging", MSc diplomadolgozat, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest, 2015.
- [5] IES-TM-21-11 dokumentum, "Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources", ISBN: 9780879952594 (2011)
- [6] Peters L., "EPA introduces TM-21 calculator", LEDs Magazine, <http://ledsmagazine.com/news/9/2/8>
- [7] Az USA Környezetvédelmi Ügynökségénél TM-21 kalkulátora, <http://www.energystar.gov/TM-21calculator>
- [8] IES LM-84-14 szabvány, "Approved Method for Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Lamps, Light Engines, and Luminaires",
- [9] IES TM-28-14 dokumentum, "Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires", ISBN: 9780879952969 (2014)
- [10] 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
- [11] Wilem .D. van Driel, Xuen J. Fan (szerk.), "Solid State Lighting Reliability", Springer, 2013. ISBN: 9781461430667

2.3.6. Közvilágítási világítótestek üzemeltetés kritikus tényezői

Közvilágítás üzemeltetés feladatai:

Hagyományos közvilágítási lámpatestek esetén az üzemeltetési feladat a fényforrás és az elektromos szerelvények cseréjét valamint a karbantartási feladatok (búra,- tükör tisztítás, foglalat és csatlakozások ellenőrzése) elvégzését foglalja magába.

A javításhoz szükséges fényforrások és elektromos szerelvények kereskedelmi forgalomban szabadon beszerezhető, gyártótól független alkatrészek amelyek a lámpatest árához képest viszonylag olcsón beszerezhetőek. A standard teljesítmény értékek miatt viszonylag kevés db számú alkatrészt jelent aminek a készletezése az üzemeltetőknek nem okoz jelentős raktári készletet. Az élettartamból kiszámolva jól tervezhető a várható meghibásodás és a csere időpontja. A javításhoz felhasznált anyagok költségéből és a ciklusidőből kalkulálható egy átalánydíjas javítási költség ami mind a felhasználó mind az üzemeltető számára előre tervezhetővé teszi az üzemeltetési költségeket, munkát és bevételeket.

LED-es világítótestek esetén az üzemeltetési feladat részben vagy egészben eltér az eddigi gyakorlattól.

A LED-es világítótestek hibáinak döntő többsége a helyszínen nem, vagy csak részben javítható. A fényforrás, előtét, gyújtó csere helyett a LED-es világítótesteknél a helyszínen csak a meghajtót, teljes szerelvénylapot vagy komplett lámpatestet lehet cserélni.

A hibák javításához szükséges alkatrészek zömében gyártófüggő és az eddig a javításhoz használt alkatrészekhez képest drágább termékek így meghibásodás esetén az anyagköltség jelentős részt fog képviselni a javítási költségekben. A LED-es világítótestek javításához a sokféle típus és teljesítmény miatt szinte lehetetlen csere alkatrész raktározásáról gondoskodni. A prognosztizált hosszú élettartam miatt a LED-es világítótesteknél nem lehet a várható javítási költséget prognosztizálni így az átalánydíjas javítási költség helyett más üzemeltetési költségstruktúrát kell választani.

LED-es világítótest üzemeltetés kritikus pontjai:

- Mennyi ideig szól a garancia és mire vonatkozik?
- A vállalt garancia érvényesíthető-e az adott beszállítónál? (létezik-e a beszállító?)
- Az adott világítótesthez az élettartam alatt létezik-e kompatibilis csere alkatrész? (ugyanolyan fényeloszlású, teljesítményű, fényhasznosítású LED panel, meghajtó)
- A javításhoz szükséges alkatrész, világítótest beszerzésének átfutási ideje. (indokolatlanul hosszú javítási időt okozhat)
- A bejelentett hibahelyen felszerelt világítótest pontos típus ismerete: A hiba javításához szükséges alkatrészeket csak a helyszín és a pontos típus ismeretében lehet meghatározni. A pontos típus ismerete nélkül a hiba javítása előtt a helyszínen kell meghatározni a javítási feladatot ami többszöri kiszállást és a javítási idő meghosszabbodását fogja eredményezni.
- Karbantartási feladatok elvégzésének szükségessége: Hibátlan működés esetén is el kell végezni a karbantartási feladatokat mert ennek hiányában a világítótestek fényhasznosítása erősen csökkenni fog. Amennyiben a karbantartási feladatok továbbra is fennállnak, akkor ez az üzemeltetési költségekben meg fog jelenni amelynek eredményeképpen az prognosztizál minimális üzemeltetési költség jelentősen megemelkedhet.

Konklúzió: A LED-es világítótestek üzemeltetése mind a felhasználók mind az üzemeltetők számára új kihívásokat jelent és az üzemeltetési gyakorlatban teljes körű szemléletváltást igényel. A későbbi üzemeltetési költséget alapvetően befolyásolja a megfelelő világítótest és megbízható beszállító kiválasztása. Az üzemeltetőknek alkalmazkodniuk kell a megváltozott igényekhez, technológiához.

3. A LED-es világítás hatásai: élettani hatások, színvisszaadás, káprázás

3.1. Élettani hatások

A nappalok és éjszakák ciklusa fontos szerepet játszik a 24 órás életritmus szabályozásában és fenntartásában anyagcserénk, viselkedésünk és a fiziológiai tényezők szempontjából. Ez a jelenség a cirkadián ritmus. A cirkadián kifejezés a latin 'Circa' (körül) és a diem vagy dies (nap) szóból származik, szó szerint 'körülbelül egy nap'-ot jelent – valamint a cirkadián rendszer a 'belső óra'-ra utal. A cirkadián ritmus szinte minden organizmusra jellemző egészen a baktériumoktól az emlősökig. Endogén, vagyis spontán módon keletkezik a szervezetben. Ez a belső ritmus általában nem pontosan 24 órás periódus, ezért a ciklusokat igazítani kell, elsődlegesen a napi világos-sötét ciklusok által.

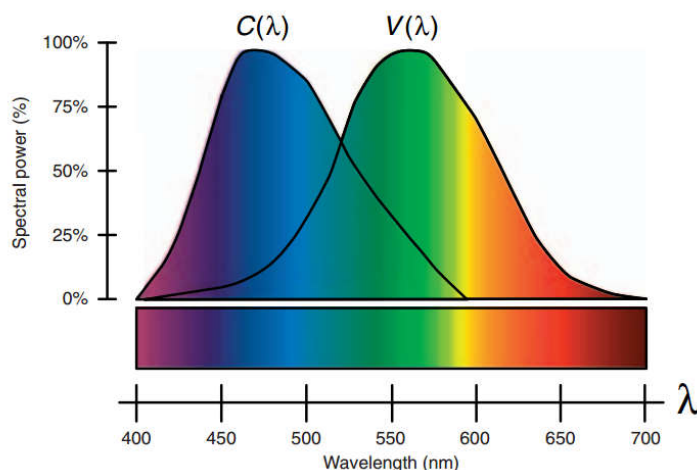
Az elsődleges „cirkadián óra” az emlősökben az ún. szuprakiazmatikus magokban (SCN) helyezkedik el, és a hipotalamikus mag körülbelül 50 000 sejtet tartalmaz. Az SCN a szemén keresztül kapja a fény adatokat. A retina nem csak a jól ismert fotoreceptorokat tartalmazza, amelyek segítségével a fényt detektálja (pálcikák és csapok), hanem a fényérzékeny retinális ganglion sejtek egy részhalmazát is. Utóbbiak fényérzékeny sejtek, valamint közvetlenül kapcsolódnak a szuprakiazmatikus maghoz és más agyi területekhez. Az SCN jeleket közvetít az agy más részeire, hogy ellenőrizze a cirkadián ritmus időzítését, beleértve az alvás-ébrenlét ciklust, a teljesítményt és az éberséget, hormonok termelődését - mint a melatonin és a cortisol - valamint a testhőmérséklet alakulását. A fénynek tehát számos hatása van szervezetünkre amellet, hogy a cirkadián ritmust alakítja. Először is a tobozmirigyben termelődő melatonin, amely 2 órával a természetes alvásidő előtt, a sötétedés jeleinek hatására termelődik. Ez elnyomható az éjszakai fényhatás által ugyanazon a retina – SCN – tobozmirigy úton, ahol a melatonin keletkezik és befolyásolja ritmusunkat^{[1],[2],[3]}. Másodsorban, a fény egy stimuláns és közvetlen élénkítő hatást vált ki az agyban, beleértve a szubjektív álmoság értékelés mérhető hatását, a reakció időt, a kognitív teljesítményt és az agyi aktivitást^[1].

Tény, hogy a cirkadián rendszer normál ciklikusságát megbontva számos negatív egészségügyi következményt gyakorolhat az emberre, bár nem mindegyik teljesen tisztázott. Az időeltolódás és a váltott műszakban végzett munka például alvászavarokat okozhat, mert a belső cirkadián óra nincs szinkronban a külső világos – sötét ciklussal. Például, ha több időzónán keresztül átutazunk, a cirkadián rendszer nem tud azonnal automatikusan alkalmazkodni a megváltozott világos – sötét ciklushoz (az alkalmazkodás kb. 1 nap/időzóna is lehet) a környezeti idő pedig „deszinkronizáltságot” okozhat^[3]. Hasonlóan a váltott műszakban végzett munka is zavart válthat ki a cirkadián rendszerben. Azáltal, hogy a természetes napi ciklussal ellentétesen történik a munkavégzés és az alvás (éjszaka történik a munkavégzés és napközben az alvás)^{[1],[2],[3]} nem csak rövid távú kockázatok lehetőségével kell számolni - mint pl. balesetek és sérülések előfordulása -

hanem hosszabb távú kockázatokkal is^{[1],[2],[3],[4]} amely a dolgozó egészségében és termelőképességében jelentkezhet^{[1],[2]}.

A fény információk, mint az időzítés, intenzitás, spektrum, időtartam és a fényalakzat a retinális fotoreceptorok által érzékeltek, amelyek fő meghatározó tényezői a cirkadián ritmus alakításának. A nem megfelelő vagy elkésztett fényhatás megzavarja a normál cirkadián ritmust, ezzel negatív hatást gyakorolva a dolgozó teljesítményére, éberségére, egészségére vagy biztonságára^[10].

Brainard és Thapan két spektrumot határozott meg az emberben zajló melatonin szuppresszió válasz számára annak érdekében, hogy meghatározza a nem-vizuális rendszer spektrális érzékenységet^{[11],[12]}. Ezen spektrumok csúcs érzékenysége a látható rövid hullámhosszú (kék) fény tartományban (446-477 nm) van. Ezzel összhangban volt Brainard és Thapan felfedezése, mégpedig hogy a kék-fény érzékeny fotopigmentnek nevezett melanopsin a fényérzékeny ganglion sejtekben helyezkedik el^[11]. Az érzékenységi görbe a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra: A vizuális rendszer színekpi érzékenysége (fotopos görbe $V(\lambda)$) és a cirkadián rendszer (melanopsin spektrum $C(\lambda)$).

A $C(\lambda)$ görbét Pechacek határozta meg szerzőtársaival^[24], valamint emellett látható a fotopos $V(\lambda)$ görbe, melynek csúcs értéke 555 nm-nél található.

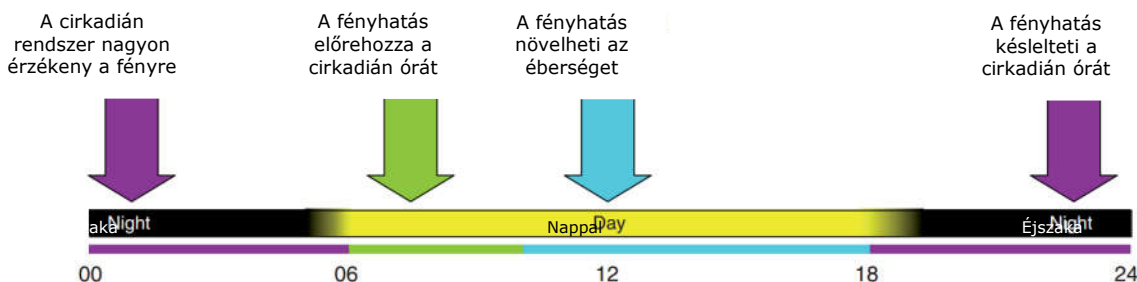
Cajochen és szerzőtársai a 2000-es években elemzéseket végeztek, amelyek során a $C(\lambda)$, azaz 'dózis-válasz' vagy 'cirkadián lux' görbét használták a fény élnkítő hatásának vizsgálatára^[24]. Egy 6,5 órás éjszakai periódusban 4100 K színhőmérsékletű polikromatikus fényt alkalmaztak. A vizsgálatból megállapították, hogy a szaruhártya megvilágításának körülbelül 300 lux szintűnek kell lennie, hogy elérje az éberségre gyakorolt maximális serkentő hatást.

Phipps-Nelson és szerzőtársai összehasonlítást végeztek: 5 órán keresztül egy 1000 lux megvilágítási szintű nappali sugárzó és egy 5 lux-nál alacsonyabb fény éberségre gyakorolt hatását hasonlították össze^[26]. Utóbbit az álmoság mérésén keresztül értékelték az enyhe

alvásból felébresztett megfigyelők segítségével, ezt követően a fénycső megvilágítás hatásait tesztelték. A kísérlet eredménye azt mutatta, hogy a melatonin szint csökkent a besugárzás hatására, ezzel növelve a megfigyelők éberségi állapotát.

Wilhelm és szerzőtársai egy autóiipari vállalat termelő részlegének dolgozóival végeztek tesztet, mégpedig vizsgálták, hogy a megnövelt megvilágítási szint milyen hatást gyakorol a dolgozók vizuális teljesítményére, éberségére és közérzetére^[1]. A vizsgálatot 500 lux, 1500 lux és 2500 lux megvilágítási szinteken végezték és két műszak (délelőtti és délutáni) műszak dolgozói vettek részt a tesztben. Eredményeik azt mutatják, hogy a megvilágítás növekedése 500 lux-ról 1500 lux-ra vagy 2500 luxra kismértékű, de mérhető hatást gyakorol a dolgozók vizuális teljesítményére, éberségére és közérzetére.

Az időzítéssel kapcsolatban a koraesti- és éjszakai fényhatásra azt találták, hogy késlelteti a cirkadián órát - azaz kiterjeszti a biológiai napot -, miközben a kora délelőtti világítás előrehozza azt és lerövidíti a biológiai napot. A cirkadián fázis iránya és nagysága a fázis-válasz görbe (PRC) által leírt, a fényhatás idejére vonatkozóan. Míg egyes fázisokban a fényre történő válaszok nagyban függenek a cirkadián fázis egyéni különbségeitől, a nominális definíciót használták, ami feltételezi, hogy az emberi test a minimum hőmérsékletet reggel 6:00 órakor éri el, amikor az egyén rendszerint alszik. A definícióból kiindulva azt gondolták, hogy a periódusban, amíg a testhőmérséklet eléri a minimum szintet (~18:00 – 6:00 óra) a fényhatás fáziskésést eredményez a cirkadián órában, miközben a minimum testhőmérséklet utáni periódusban (6:00 – 18:00 óra) előrehozza a cirkadián órát. A hatás nem minden időszakra egyezik, habár a fázis-válasz görbe csúcskélekedést jóval éjjel 3:00 óra körül és csúcs előrehozódást délelőtt 9:00 óra körül. Az éberség hatás szempontjából, a megvilágítás hatása vagy elkerülése az időzítéssel különbözik. Például, miközben a reggeli fény hatékony lehet az álmoság érzet csökkentésében^[28], addig az éjszakai fényhatás káros hatást gyakorolhat a későbbi alvásra és annak minőségére, mert a nap késői szakaszában nemkívánatos helyzet jelentkezik, ami gerjeszti az éberségi állapotot¹.



3.2. ábra: A nap három szakaszra osztható a nem-vizuális hatások alapján.

Figueiro és Overington kísérletet végzett a 15-17 éves fiatalok körében az önvilágító eszközök - mint laptop, tablet, okostelefon - éberségre gyakorolt hatásával kapcsolatban.^[3] Eredményeik azt

mutatják, hogy a késői órákban 1-2 órás időtartamban használt önvilágító eszközök által kibocsátott fény jelentősen elnyomta a melatonin szintet, megközelítőleg 23-38%-kal. Ez azzal magyarázható, hogy ezen önvilágító eszközök háttérvilágításához használt fényforrások rövid hullámhosszú (kék) fényt (csúcs hullámhossz ~ 460 nm) bocsátanak ki, közel a cirkadián rendszer csúcs érzékenységehez, ezzel maximálisan elnyomva a melatonin termelődést és növelve az éberségi állapotot. Az elnyomás mértéke pedig összefügg a besugárzással és a fényhatás időtartamával^[20].

Chang és szerzőtársai összehasonlítást végeztek az esti időszakban (papír alapon és önvilágító eszközön) történő olvasási szokások éberségre és melatonin szintre gyakorolt hatására. Az ő eredményeik is alátámasztották, hogy a késő esti időszakban, önvilágító eszközön történő olvasás késlelteti az esti melatonin termelődést és negatívan befolyásolja az alvás minőségét is^[21].

Irodalom

- [1] Lockley SW, Dijk DJ. Functional genomics of sleep and circadian rhythm. *Journal of Applied Physiology* 2002; 92: 852–862.
- [2] Wehr T, Aeschbach D, Duncan WJ. Evidence for a biological dawn and dusk in the human circadian timing system. *The Journal of Physiology* 2001; 535: 937–951
- [3] Figueiro M, Overington D: Self-luminous devices nad melatonin suppression in adolescent. *Lighting Res.& Technol.* 2015 0 1-10.
- [4] Lockley SW. Influence of light on circadian rhythmicity in humans. In: Squire LR. (ed) *Encyclopaedia of Neuroscience*. Oxford, UK: Academic Press, 2009, pp. 971–986.
- [5] Veitch J, van den Beld G, Brainard G, Roberts J. *Ocular Lighting Effects on Human Physiology and Behaviour*. CIE Publication 158, Vienna, Austria: CIE, 2004.
- [6] Boyce PR, Beckstead JW, Eklund NH, Strobel RW, Rea MS. Lighting the graveyard shift: The influence of a daylight-simulating skylight on the task performance and mood of nightshift workers. *Lighting Research and Technology* 1997; 29: 105–134.
- [7] Wilson L. Intensive care delirium. *Archives of Internal Medicine* 1972; 130: 225–226
- [8] Walsh J, Rabin B, Day R, Williams J, Choi K, Kang J. The effect of sunlight on postoperative analgesic medication use: A prospective study of patients undergoing spinal surgery. *Psychosomatic Medicine* 2005; 67: 156–163.
- [9] Beauchemin K, Hays P. Dying in the dark: Sunshine, gender and outcomes in myocardial infarction. *The Royal Society of Medicine* 1998; 91: 352–354.
- [10] Riemersma-van der Lek R, Swaab D, Twisk J, Hol E, Hoogendijk W, Van Someren E. Effect of bright light and melatonin on cognitive and noncognitive function in elderly residents of group care facilities: A randomized controlled trial. *The Journal of the American Medical Association* 2008; 299: 2642–2655.
- [11] Mills P, Tomkins S, Schlangen L. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. *Journal of Circadian Rhythms* 2007; 5: 2.

- [12]Viola A, James L, Schlangen L, Dijk D. Blueenriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian Journal of Work Environment and Health* 2008; 34: 297–306.
- [13]Andersen M, Mardeljevic J, Lockley SW: A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part I: photobiology- based model. *Lighting Res.& Technol.* 2012 44 37-53.
- [14]Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor. *Journal of Neuroscience* 2001; 21: 6405–6412.
- [15]Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology* 2001; 535: 261–267.
- [16]Berson DM, Dunn FA, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 2002; 295: 1070–1073.
- [17]Pechacek CS, Andersen M, Lockley SW. Preliminary method for prospective analysis of the circadian efficacy of (day) light with applications to healthcare architecture. *Leukos* 2008; 5: 1–26.
- [18]Cajochen C, Zeitzer J, Czeisler C, Dijk D. Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behavioral Brain Research* 2000; 115: 75–83.
- [19]Phipps-Nelson J, Redman J, Dijk D, Rajaratnam S. Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep* 2003; 26: 695–700.
- [20]Wilhelm B, Weckerle P, Durst W, Fahr C, Röck R: Increased illuminance at the workplace: Does it have advantages for daytime shifts?. *Lighting Res.& Technol.* 2011; 43: 185-199.
- [21]Sletten TL, Revell VL, Middleton B, Lederle KA, Skene DJ. Age-related changes in acute and phase-advancing responses to monochromatic light. *Journal of Biological Rhythms* 2009; 24: 73–84.
- [22]Münch M, Kobińska S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. Wavelengthdependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 2006; 290: R1421–R1428.
- [23]Zeitler JM, Dijk DJ, Kronauer R, Brown EN, Czeisler CA. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *Journal of Physiology* 2000; 526: 695–702.
- [24]Chang A-M, Aeschbach D, Duffy JF, Czeisler CA. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2015; 112: 1232–1237.
- [25]G. Wyszecki, Proposal for a New Color-Difference Formula, *Journal of the OSA*, 1963; 53, pp1318-1319
- [26]Nickerson D. Measurement and specification of colour rendition properties of light sources. *Illuminating Engineering* 1958; 53, pp77-90.

- [27]Halstead MB, Morley DI, Palmer DA, Stainsby AG. Colour rendering tolerances in the CIE system. *Lighting Research and Technology*, 1971; 3(2), pp99-124.
- [28]Maitreya VK. Subjective evaluation of colour-rendering properties of fluorescent lamps. *Die Farbe*, 1975; 24(1/6), pp109-121.

3.2. A színvisszaadás, mint a színminőség jellemzője

Az emberi természetből legkézenfekvőbb módon fakad valamilyen pillanatnyilag észlelt jelenség összehasonlítása valamely általa megszokottnak vélt körülmény közötti észlelettel. A mesterséges fényforrások esetében ilyen összehasonlítás tehető a színes környezet elemeinek emberi megfigyelő által természetes sugárzéseloszláskor észlelt színészlelete, valamint ugyanazon felületek mesterséges fényforrás által megvilágított színészlelete között.

1965-ben vált elérhetővé a CIE $U^*V^*W^*$ színínger tér és az ebben definiált színkülönbségi formula. Az említett vizsgálatok – ugyan újszerű és általános módszert nem szolgáltatottak – megmutatták, hogy megfelelő kiválasztás esetén akár már 8-15 színminta is alkalmas lehet a fényforrások színvisszaadásának jellemzésére. Az időközben szabványosított sugárzéseloszlások segítségével kétféle alapelven, végtelen sok referencia fényforrás használatát javasolták. Ha a tesztfényforrás korrelált színhőmérséklete 5000 K-nél kisebb, a tesztfényforrással megegyező színhőmérsékletű Planck sugárzót kell választani. 5000 K feletti korrelált színhőmérsékletű tesztfényforrás esetén azzal megegyező korrelált színhőmérsékletű, generátorfüggvények segítségével előállított természetes sugárzéseloszlás használandó. Az említett szabályok rögzítésével a CIE $U^*V^*W^*$ színkülönbségekből speciális színvisszaadási indexeket (R_i) definiáltak, míg ezek átlagolásával általános színvisszaadási index (R_a) számolható. A képletben szereplő konstans értékét úgy határozták meg, hogy a tesztfényforrás általános színvisszaadási indexe (R_a) a tesztminták színekoordinátáinak a referencia fényforrás alatti megjelenéssel való teljes egyezése esetén 100-nak adódjon, míg az akkori forgalomban lévő melegfehér fénycső színvisszaadási indexe 50 legyen. Ez az eredmény a felhasználó számára is érthető információt szolgáltatott. Halstead és szerzőtársai vizuális kísérletek segítségével vizsgálták a színvisszaadás jelenségét. Eredményeik azt mutatták, hogy a megfigyelők által egy-egy tesztminta esetén vizuálisan észlelhető színínger különbség az adott mintára vonatkozó speciális színvisszaadási index (R_i) tekintetében 12-18 egység változásnak felel meg. Maitreyaⁱ binokuláris látómező technikával folytatott kísérletei ugyanerre az esetre 5 R_i egységet határoztak meg. A CIE által is elfogadott modell a fényforrás tervezőket és gyártókat arra ösztönözte, hogy az új modell szerinti legnagyobb színvisszaadási index elérése érdekében optimalizálják lámpáik színképi teljesítmény-eloszlását. A nagynyomású gázkisülő lámpa gyártásánál alkalmazott újabb elemek (diszprosium, tallium, nátrium) a színképi eloszlásban új színkép vonalakat gerjesztenek, így a fényhasznosítás romlása ellenében nagyobb színvisszaadási index érhető el. A fénycsövek és az ezidőtájt megjelenő kompakt fénycsövek esetén megmutatták, hogy megfelelően kiválasztott fénypor

összetevők alkalmazásával három sáv esetén 80 körüli, míg 4 sáv esetén 95 körüli R_a érték érhető el.

Az eljárás teszt objektumok eredő színi eltolódásán (resultant colour shift) alapul, melyet „Test Colour Method” eljárásnak neveztek el. Ez a módszer minden, a fényforrások színvisszaadási tulajdonságának meghatározását szorgalmazó módszer alapjának tekintendő. A színvisszaadás meghatározásának folyamata az alábbi főbb lépésekre tagolódik:

Referencia fényforrásra vonatkozó megkötések

A vizsgálandó fényforrás színvisszaadási tulajdonságait mindig valamilyen matematikailag meghatározott referencia fényforráshoz viszonyítjuk. A referencia fényforrás színessége azonos vagy közel azonosnak kell, hogy legyen a teszt fényforrásával. Ha máshogy nincs meghatározva, akkor 5000 K alatt referencia fényforrásnak egy a teszt fényforrás korrelált színhőmérsékletével megegyező színhőmérsékletű Planck sugárzó tekintendő, és 5000 K felett pedig egy azonos korrelált színhőmérsékletű nappali sugárzéloszlás választandó referenciának.

Az ezzel a módszerrel meghatározott referencia fényforrás és a vizsgálandó teszt fényforrás színességi koordinátái közötti színingerkülönbségre a következő egyenlőtlenségnek kell teljesülnie:

$$\Delta C = \left[(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2 \right]^{1/2} < 5,4 \cdot 10^{-3} \quad (\text{M1})$$

ahol „k” a teszt fényforrásra, „r” a referencia fényforrásra utal. u és v a CIE 1960 színingerdiaagram színességi koordinátái.

A színvisszaadási index értékét minden esetben a referencia fényforrás színhőmérsékletével együtt kell megadni.

Tesztmintákra vonatkozó megkötések

A színvisszaadási index számításához a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság a következő színmintákat határozta meg:

1. Táblázat: A 13.2 publikációban rögzített színminták Munsell megfelelői

Színminta száma	Munsell Megfeleltetés	Megnevezés nappali megvilágítás mellett
1	7.5 R 6/4	Világosszürkés piros
2	5 Y 6/4	Sötétszürkés sárga
3	5 GY 6/8	Telített sárgászöld

Színminta száma	Munsell Megfeleltetés	Megnevezés nappali megvilágítás mellett
4	2.5 G 6/6	Közepes sárgászöld
5	10 BG 6/4	Világos kékeszöld
6	5 PB 6/8	Világoskék
7	2.5 P 6/8	Világos ibolya
8	10 P 6/8	Világos vöröses bíbor
9	4.5 R 4/13	Telített vörös
10	5 Y 8/10	Telített sárga
11	4.5 G 5/8	Telített zöld
12	3 PB 3/11	Telített kék
13	5 YR 8/4	Világos sárgás rózsaszín (emberi arc bőr)
14	5 GY 4/4	Közepes olivazöld

A felsorolt minták mindegyikének spektrális visszaverési tényezői táblázatban rögzítettek. Az első nyolc minta a színek jól lefedi, mérsékelten telítettek és közel azonos világosságúak. A további 6 mintát telített vörös, sárga, zöld, kék valamint bőr és lombkorona színek alkotják. Speciális színvisszaadási indexek meghatározásához elvileg bármilyen egyedi színminta használható, melynek spektrális reflexiója pontosan meghatározott, azonban az általános színvisszaadási index meghatározásához csak az első nyolc minta használata elfogadott. A modell szerint értelmezett színvisszaadási index számítás egyes lépéseit az alábbiakban részletezem.

A színvisszaadás meghatározásának lépései:

- a referencia sugárzáseloszlás megválasztása
- színminták CIE színinger összetevőinek és színekoordinátáinak (CIE 1931: X, Y, Z, x, y) meghatározása a referencia és a teszt fényforrás által megvilágítva
- a kapott színmetrikai értékek CIE 1960 UCS rendszerbe való transzformálása az alábbi egyenletek segítségével:

$$u = 4X / (X + 15Y + 3Z) \quad (\text{M2})$$

$$v = 6Y / (X + 15Y + 3Z) \quad (\text{M3})$$

vagy

$$u = 4x / (-2x + 12y + 3) \quad (M4)$$

$$v = 6y / (-2x + 12y + 3) \quad (M5)$$

- a kromatikus adaptáció és színi áthangolódás figyelembe vétele – adaptációs színi eltolódás (adaptive colour shift) – az alábbi formula segítségével:

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (M6)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (M7)$$

ahol $u'_{k,i}$ és $v'_{k,i}$ az i -dik tesztminta színkoordinátái, figyelembe véve a kromatikus adaptációt, melynek értelmében $u'_k = u$ és $v'_k = v$, azaz az áthangolódási korrekció után a teszt és referencia fényforrás u, v koordinátái azonosak.

- a fenti egyenletben található c_k, d_k, c_r, d_r valamint $c_{k,i}, d_{k,i}$ értékek (u_k, v_k, u_r, v_r és $u_{k,i}, v_{k,i}$ felhasználásával) az alábbiak szerint számolandó:

$$c = \frac{1}{v} (4 - u - 10v) \quad (M8)$$

$$d = \frac{1}{v} (1,708v + 0,404 - 1,481u) \quad (M9)$$

- Az így kapott értékeket ezek után transzformálni kell a CIE 1964-es UCS színtér koordinátáira az alábbiak szerint:

$$W_{r,i}^* = 25(Y_{r,i})^{1/3} - 17 \quad W_{k,i}^* = 25(Y_{k,i})^{1/3} - 17 \quad (M10)$$

$$U_{r,i}^* = 13W_{r,i}^* (u_{r,i} - u_r) \quad U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^* (u'_{k,i} - u'_k) \quad (M11)$$

$$V_{r,i}^* = 13W_{r,i}^* (v_{r,i} - v_r) \quad V_{k,i}^* = 13W_{k,i}^* (v'_{k,i} - v'_k) \quad (M12)$$

ahol $Y_r = Y_k = 100$ –at alapul véve kell $Y_{r,i}$ és $Y_{k,i}$ értékeit normalizálni.

- ezek után a „ k ” teszt fényforrás által megvilágított i -dik színminta és a referencia fényforrás által megvilágított ugyanazon minta közötti színínger-különbség a CIE 1964 színínger-különbségi formulájával az alábbiak szerint számolandó:

$$\begin{aligned}\Delta E_i &= \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} \\ &= \sqrt{(\Delta U_i^*)^2 + (\Delta V_i^*)^2 + (\Delta W_i^*)^2}\end{aligned}\quad (\text{M13})$$

Ez a CIE 1964-es UCS színterébe transzformált színösszetevők közti vektor különbség meghatározását jelenti.

Színvisszaadási Indexek meghatározása:

- Speciális Színvisszaadási Index (Special Colour Rendering Index) jelölésére az R_i szolgál utalva az i -dik színmintára, mely érték meghatározása az alábbi egyenlettel történik, annak értékét a legközelebbi egész számra kerekítve:

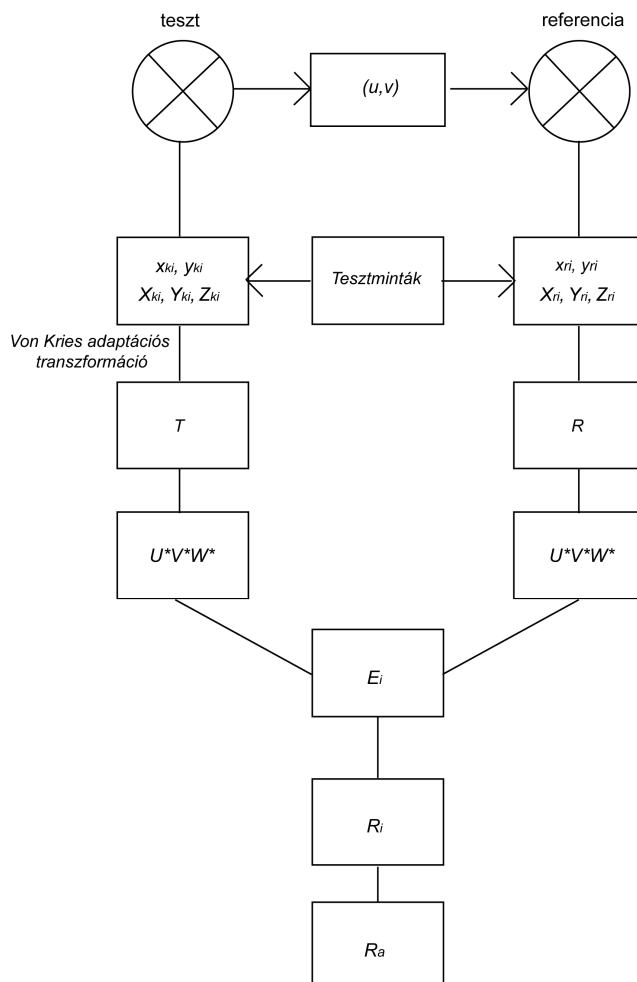
$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad (\text{M14})$$

- Általános Színvisszaadási Index (General Colour Rendering Index) jelölésére az R_a szolgál, melynek eredményét az első nyolc színminta R_i értékeinek számtani középértéke adja:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (\text{M15})$$

- $R_i = 100$ a teszt fényforrás és a referencia fényforrás által megvilágított i -dik színminta színekoordinátáinak teljes azonosságát jelenti. Az általános színvisszaadási indexet a 4,6 szorzótényező segítségével úgy határozták meg, hogy egy standard meleg fehér fénycső R_a értéke – izzólámpát referencia fényforrásként tekintve – 50 legyen.

Az alábbi ábra szemlélteti a CIE 13.2 szerint értelmezett eljárás fő lépéseit:



3.3. Káprázás

A káprázás a látótéren belüli fényes területek által keltett érzés, mint például megvilágított felületek, lámpatest részei, ablakok és/vagy tetőablakok. A káprázást korlátozni kell annak érdekében, hogy elkerüljük a hibákat, a fáradtságot és a baleseteket. A láprázás lehet zavaró káprázás és rontó káprázás. Belső téri munkahelyek esetében a rontó káprázás általában nem jelent komoly problémát, ha a zavaró káprázásra vonatkozó határértékeket betartjuk.

Káprázást általában a tükröződő felületekről visszaverődő fény okoz, amelyet fátyol reflexiónak vagy tükröződő fénynek nevezünk.

Különös gondot kell fordítani a káprázás elkerülésére, ha a nézés iránya a vízszintes fölé esik.

Zavaró káprázás

Az ablakok által keltett zavaró káprázás meghatározására jelenleg nincs szabványos módszer.

Beltéri lámpatestek által keltett zavaró káprázás meghatározására a CIE „Egységes káprázás értékelés” (UGR) módszer alkalmazandó, az alábbi képlet alapján:

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_B} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \quad (2)$$

ahol:

L_B – a háttér fénysűrűség, $E_{ind} \cdot \pi^{-1}$ képlettel számítható, ahol E_{ind} a függőleges közvetett megvilágítás.

L – a lámpatestek világító részeiből érkező fénysűrűség a dolgozó szemének irányába.

ω – térszög, a lámpatestek világító részei és a dolgozó szeme között

p – lámpatestek Guth pozíció indexe, amely a nézés vonalától való elmozduláshoz kapcsolódik.

A káprázásra ajánlott határérték egy sorozat, ahol a szintek az érzékelhető különbségeket jelentik.

Az UGR sorozat: 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28.

Ha a táblázatos módszer nem alkalmazható és a dolgozó helyzete, valamint a nézési irány ismert, az UGR értéket a (2) képlet alapján határozzuk meg.

4. LED-es világítás tervezése során felmerülő kérdések

Világítástervezés alatt mesterséges világítással létrehozott megvilágítást értünk. A világítástervezésnek bármelyik élettérben és életciklusban nagy jelentősége van.

- Élettér alatt építményen kívüli szabadtereket (külső vagy kültér) vagy az építményen belüli helyiségeket, területeket (belső vagy beltér) értünk.
- Életciklus alatt a napszak változásokra gondolunk, ugyanis ezen pillanatok befolyásolják az elvárt mesterséges világítás szükségességét (külső téren: nappal → szürkület → éjszaka; belső térben: ugyanezen ciklusok természetes megvilágítással rendelkező helyiségekben, míg a természetes megvilágítással nem rendelkező helyiségekben → használat során folyamatos).

4.1. LED-es beltéri világítás

Építmény belső terében mindig szükséges belsőtéri világítás alkalmazása.

4.1.1. Belsőtéri jellemző világítási helyzetek

A jellemző belső terek világítás tervezésénél figyelembe veendő specifikumok:

- általános közlekedőterek, lépcsőházak, előterek
- irodai helyiségek (kis és nagyterű)

- előadótermek, koncert- és színháztermek,
- sport célú helyiségek
- raktárak (kis és nagylégterű, raktározás módja szerint kialakítás)
- gyártási területek

4.1.2. A LED fényforrásokat tartalmazó lámpatestek üzemeltetési kérdései

Új világítás létesítésekor vagy meglevő világítás korszerűsítésekor a létesítést befolyásoló tényezők vizsgálata, megtérülési számítások.

Az ideális üzemeltetési körülmények és a valóság üzemeltetési körülmények várható eredményei, a karbantartások és az esetleges cserék szükségessége.

A várható irányok felvázolása.

4.2. LED-es kültéri világítás

Jelen fejezet foglalkozik a közvilágítás kivételével az összes kültéri világítási tervezési feladattal.

A LED-es kültéri világítások tervezése során természetesen figyelembe kell vennünk a hagyományos/régi eszközökkel megfogalmazott általános elveket.

Az általános elveket röviden megemlítjük, hogy utána teljes figyelemmel koncentrálhassunk a LED specifikus tényezőkre.

Általános elvek

A világítási feladat megfogalmazása

- Megvilágítási (esetleg fénysűrűségi) szintek megállapítása
- Egyenletességi követelmények
- Káprázási veszélyek számbavétele

(A kültéri rendszereknél viszonylag egzakt káprázás számítási eljárás áll rendelkezésünkre a GR értékek számítása révén. A GR káprázási index pontos definícióját és számítási módját a CIE 112 publikációja teljes mélységében tartalmazza. Szerencsére a manapság használt világítástechnikai tervező programok majd mindegyike képes a számítására.

- Fő nézési irányok meghatározása
- Józan észre mindig szükség van. (azaz ha pl. a pályaudvaron a forgalmi tisztnek a feladata a vagonon levő fuvarlevél ellenőrzése akkor nem világítunk pont szemből neki mert akkor biztosan nem lesz képes a fuvarlevél elolvasására.)

A vonatkozó szabványok áttanulmányozása, megértése, alkalmazása!

Jelen témakörben a két leggyakrabban használt szabvány (de nem csak ezek lehetnek fontosak!)

- MSZ EN 12193:2008 sportvilágítási
- MSZ EN 12464-2 szabadtéri munkahelyek

Figyelem, a fenti folyamat sokszor hosszú és sok buktatóval járhat!

LED specifikus elvek

Optikai megfontolások

Az utóbbi két évben megkonstruált és jó minőségű LED-es lámpatestek már hajszálpontos optikával rendelkeznek. Ez sokszor problémához vezethet, hogy a LED-es lámpatest pontosan oda világít, ahova irányítjuk minimális szórt fénnel. Ez egyszerre előny és hátrány is.

Előny:

- az optikai határfok szempontjából, azaz fény csak oda megy ahova szánjuk és nincs szórt fény
- Jelentősen kisebb a fényszennyezés

Hátrány:

Mivel nincs szórt fény, ezért éles határ lehet a megvilágított terület és háttér között. (Ez komoly gondot jelenthet, a sport-, dísz- és közvilágításban is)

Színhőmérsékleti variációs lehetőségek

A mai LED-ek széles színhőmérsékleti tartományban állnak rendelkezésre. Néhány évvel ezelőtt szinte csak a hideg 6000-6500K színhőmérsékletű LED-ek voltak kaphatóak. Ennek a korszaknak szerencsére vége! Manapság 2700K és 6500K között szinte minden színhőmérséklet kapható, ami nagy lehetőséget jelent a tervezőnek. Kültéren különösen igaz, hogy nagy körültekintéssel válasszuk ki az alkalmazott színhőmérsékletet. Általános szabály, hogy a hidegebb 6000K vagy még magasabb színhőmérsékleteket kerüljük vagy csak igen indokolt esetben használjuk, mert ennek kedvezőtlen hatásai lehetnek a környezetünkben levő élőlényekre az embereket is beleértve.

Ugyanakkor egyre több olyan díszvilágítási megoldást látható ahol tudatosan játszanak azzal, hogy az épület egyes részeit más-más színhőmérsékletű megvilágítást kapnak.

Színváltási lehetőségek

A szakmai és építészeti közvéleményt is megosztja a LED-ek rejlő színváltási lehetőség. A dísz- és díszítővilágításban rohamosan terjed. Megtiltani nem lehet, illetve nem érdemes. Véleményünk szerint egy nagyvárosi buli negyedben található

Elektrotechnikai tagozat

épület díszvilágításra kifejezetten előnyös lehet, még egy középkori katedrális esetében gyomorforgató látvány. (sajnos erre is van már külföldi példa)

A színváltási lehetőségnek biztonsági világításban akár funkcionális alkalmazása is lehet. Erre a legközismertebb példa a budapesti 4. metró állomásain alkalmazott színváltós LED csík a biztonsági sáv jelzésére.

Tartószerkezeti megfontolások

A LED-es lámpatestek általában kisebbek és könnyebbek, mint a hagyományos lámpatestek így nagy rendszerek esetében kisebb tartószerkezetekre lehet szükség.

Élettartam

A LED-es lámpatestek nagyobb várható élettartama nagyobb lehetőséget ad de sokkal nagyobb felelősséget is ró a tervezőre.

Azonnali újragújthatóság és szabályozhatóság

Ezek a tényezők teljesen új lehetőségeket jelentenek a tervező és felhasználó szempontjából is.

Áramköri megfontolások

- Túláram védelem. A LED-ek jóval érzékenyebbek a túláramra mint a hagyományos fényforrások különösen kültéren erre nagy gondot kell fordítani.
- Nagy rendszerek esetében az indulási áramra való méretezést is másképp kell csinálni, mint a hagyományos rendszerek estében
- Szerencsére a legtöbb LED driver kapcsoló üzemű tápokkal rendelkezik, így a feszültségesésre kevésbé érzékeny a LED-es lámpatest mint a hagyományos típusok
- A LED-ek szabályozhatósága lehetővé teszi kapcsolási fokozatok helyett szabályzási szintek használatát eltérő megvilágítási igények kielégítésre,
- int pl. késő éjszakai csökkentett megvilágítási szint térvilágításban vagy sportvilágítás esetén edzés és verseny fokozat

Karbantartás

A LED-es kültéri rendszereket is karban kell tartani! Szerencsére jó minőségű termékek esetében a karbantartásra ritkábban van szükség és olcsóbban is megoldható mint a hagyományos világítási eszközök esetében!

Jövőbeni fejlesztés lehetősége (az angol kifejezés „Future proof”)

Hol érdemes LED-et használni a kültéri világítási területén?

Rövid válasz: majdnem mindenhol, és az idő előrehaladtával egyre több és több területen.

Kicsit részletesebb válasz:

Térvilágításban

ahol éves 2000 üzemórát meghaladó a használat (pl autóparkolók, kamion terminálok, vasúti pályaudvarok) új létesítményt már most is nagy valószínűséggel LED-es megoldás lehet, a berendezés teljes élettartamára vonatkozó, legolcsóbb megoldás.

Díszvilágításban

Egyedi ízlés kérdése is a dolog. A saját személyes preferenciám alapján mivel a LED sokkal több lehetőséget ad elsőként a LED -es megoldás lehetőségeit vizsgálnám meg.

Díszítővilágításban

Egyértelműen LED.

Sportvilágításban

Azon kültéri (edző)pályáknál ahol pár száz éves üzemóra van még egy darabig a hagyományos megoldások lesznek gazdaságosabbak. Itt is megfigyelhető azonban egy tendencia, hogy az egyre szigorodó fényszennyezési előírásokat LED-es lámpatestekkel könnyebben lehet teljesíteni.

A prémium kategóriás világásemények színhelyül sportlétesítményekben viszont egyértelműen csak LED-es megoldás jöhet szóba. A LED-ek villogásmentessége és szabályozhatósága miatt. (A villogásmentesség teszi lehetővé nagy sebességű akár 1000 képkocka/másodperc lassított felvételek készítését.)

4.3. LED-es közvilágítás

A fejezet célja az útvilágítás tervezésének a szabványi ajánlások szem előtt tartása mellett a gyakorlati tapasztalatok beépítése is.

A 2004 májusától hatályos MSZ EN 13201-2..4 szabvány, valamint a hozzá tartozó TR 13201-1 műszaki jelentés, a világítási helyzetek meghatározását követően ad ajánlást az alkalmazandó útosztályokhoz.

A világástechnikai jellemzők meghatározásának alapjául szolgáló világítási helyzetet, a forgalomba résztvevők, azaz az úthasználók és jellemző sebességük alapján kell meghatározni. Figyelembe kell venni azt is, ha vannak olyan közlekedési szereplők, akikre az adott közterület használatának tiltása érvényes.

A világítási helyzet kiválasztását követően, az út jellegének, a kereszteződések távolságának és szintbeni elhelyezkedésén túlmenően, a forgalomsűrűség, valamint a vezetési feladat

nehézségének meghatározása szükséges ahhoz, hogy a szabványi ajánlások alapján a megfelelő útosztályt alkalmazhassuk a tervezés során.

A fent leírtak függetlenek attól, hogy milyen fényforrással tervezünk, és jogos a kérdés, hogy akkor miben is különbözik a LED.

4.3.1. Tervezési szempontok és legfontosabb különbségek kislő csöves és LED-es berendezések alkalmazása között

Tervezési szempont	Kislő csöves fényforrásokkal üzemelő lámpatestek	LED lámpatestek
Fénypontmagasság	A hagyományos berendezéseknél általában az egyenletességi kritérium teljesítését a magasabb fénypontmagassággal oldották meg a tervezők. A magasabb fénypontmagasság miatt azonban a fény egy nagyobb hányada nem a megvilágítandó felületre jutott, hanem szórt fényként a környezetet világította meg, ezért nagyobb teljesítményeket volt indokolt alkalmazni, mint ami alacsonyabb fénypontmagasságon szükséges lett volna.	A LED berendezéseknél a megvilágítás egyenletességének biztosítása a megfelelő optika kiválasztásával (amire a kislő csöves berendezéseknél csak korlátozottan van lehetőség), illetve a lencsék sugárzási szögének helyes alkalmazásával megoldható. A megfelelő út-fényáram értékek beállítása azonban általában alacsonyabb fénypontmagasságot igényel. A LED berendezésekben a relatíve alacsonyabb fénypontmagasságokhoz és nagyobb kiosztási távolságokhoz is a kislő csöves lámpatestekhez képest szélesebb optikai választékkal lehet élni, így technikailag a fénypontmagasság megválasztása elsősorban a kápráztatás mérséklésének figyelembe vételével kell, hogy megtörténjen.
Optikai lehetőségek	A hazánkban jelen lévő gyártók a lámpatesteket sztenderd optikával szállítják, így ott nincs nagyobb választási lehetőség.	A LED lámpatesteknél pl. lencse- vagy tükrökonfigurációkkal kiválóan szabályozható, hogy az egyes LED-ek fénye hova érkezen. A LED lámpatestek energiahatékony alkalmazása pont ennek köszönhető elsősorban: a fény oda jut el, ahol a megvilágításra szükség van.
Teljesítményszintek	A leggyakoribb hagyományos kislő	A LED berendezéseknél az alkalmazott

Tervezési szempont	Kisülő csöves fényforrásokkal üzemelő lámpatestek	LED lámpatestek
	csöves berendezéseknél a teljesítmény, és így a fényáram szintek is nagy léptekkel valósulnak meg: 36W-70W-100W-150W-250W-400W. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy ahol számítások szerint egy 113W-nak megfelelő teljesítményhez rendelhető fényáramra lenne szükség, ott a tervező automatikusan a 150W-os fényforrást választotta, így az adott közterületen túlvilágítás és többlet energiafelhasználás állt elő.	teljesítmény és fényáram a LED-ek / LED-modulok számával és a meghajtás erősségével jól szabályozhatók és adekvát módon igazíthatók a megvilágítási igényekhez. Ez a LED berendezések alkalmazásából fakadó egyik fő megtakarítási tényező. Pl. a 36W-100W-ig terjedő 3 lépcsőfok a ma a piacon elérhető LED-es lámpatesteknél akár 5-10W-os teljesítmény- és ennek megfelelő fényáram lépcsőkkel is lefedhető.
Hajlásszög	A hagyományos berendezéseknél az optika kialakításából fakadóan a legkedvezőbb megoldás az 5 fokos hajlásszög. Kevésbé hatékony berendezéseknél ennél nagyobb is alkalmaznak, ott azonban a káprázás értéke jelentősen megnő.	A modern LED berendezések optikai megoldásai sokkal finomabb módon irányítják a fényt, így ott a sztenderd megoldások helyett a hajlásszög egyedi beállítása nagy szerepet kap. A modern, síkban elhelyezett modulokkal szerelt lámpatesteknél ráadásul a hajlásszög növelése már nem jár feltétlenül a káprázató hatás növekedésével, viszont a fény a megfelelő felületre fog jutni.

Mindezek azért is jelentős különbségek, mert Magyarországon nagyrészt a villamos energia elosztó hálózatra kerülnek fel a közvilágítási lámpatestek, amelyek esetében pl. a tartószerkezet úttól való távolsága, a korlátozottan alkalmazható fénypontmagasságok, stb. már korábban is igényelték volna az érzékenyebb tervezési lehetőségek alkalmazását, azonban a hagyományos, kisülő csöves technológia ezt nem tette, vagy nem elég hatékonyan tette lehetővé. Azok a tervezők, akik nem rendelkeznek tapasztalattal a LED-es lámpatestek tervezését illetően, a fent felsorol különbségekből adódó lehetőségeket nem kellő módon tudják adaptálni, ezért a tervezett közvilágítás nem biztos, hogy teljes mértékben és nem enrgiahatékonyan alkalmazkodik a világítási feladathoz.

Nem beszélve arról, hogy a múltbéli hibákat nem kell elkövetni, így a világítás tervezésénél nem az a fő szempont, hogy jelenleg milyen lámpa üzemel, hanem az, hogy milyen világítási feladattal találkozunk.

4.3.2. Karbantartási tényező meghatározása

A tervezés során sokan elkövetik azt a hibát, hogy a nem megfelelően határozzák meg a karbantartási tényezőt. A kisülő csöves fényforrásokkal üzemelő lámpatestek esetén az $MF=0,8$ karbantartási tényezőt alkalmazták és alkalmazzák továbbra is a LED-es tervezésnél. Mások abból a téves marketing kampányból kiindulva, hogy a LED-eket nem kell karbantartani ezt az értéket 1-nek vették. Hol is van az igazság?

Az alkalmazott lámpatestekben a világítástechnikai kalkulációk MF-faktorának kiszámítása során, felhasználva a CIE/VTT vonatkozó ajánlását (érvényes szabvány nincs!), a tényező számításának módja a következő:

$$MF(t) = UA(t) * FFA(t) * LTA(t) * FFT(t)$$

ahol:

- UA: az útfelület avulási tényezője
- FFA: a fényforrás avulási tényezője
- LTA: a lámpatest avulási tényezője
- FFT: a fényforrás túlélési tényezője

Az útfelület avulási tényezője nem az alkalmazott fényforrástól függ. Értéke „beállt” utak esetén 1.

A fényforrás és a lámpatest avulási tényezője LED-ek esetén a fizikai és termikus/elektromos tényezőkre vezethető vissza. A LED-e világítótestnek, mint elektronikai egységnek az élettartama kétféleképpen óvható illetve növelhető: a lámpatest illetve a közvetlen optikai tér megfelelő fizikai védelmével, illetve az elektronika megfelelő védelmével. Az alkalmazott lámpatestekben a védelem módjai ennek megfelelően a következők:

Fizikai védelem:

- IP66 optikai tér
- a bura magas szintű törés és UV-védelme illetve geometriájából adódóan elhanyagolható mértékű koszolódása

Termikus elektromos tényezők:

- a meghajtó egységek túlfeszültségvédelme (ált. 1,5-4 kV)
- a LED-ek megfelelő hűtése
- a teljes elektronikai rendszer (meghajtóegység és LED-ek együttese) védelmét biztosító fokozott, és a magyarországi hálózati sajátosságoknak eleget tevő túlfeszültségvédelme 10 kV-ra méretezve

A fényforrás túlélési tényezője a megfelelő és hosszútávon fenntartható közvilágítás érdekében további védelemként az alkalmazott lámpatestek mindegyike megfelel a B10 előírásnak is, amely szerint a lámpatestben lévő LED-ek legfeljebb 10%-ának meghibásodása (rövidzárba menetele) nem okozhatja az optikai sajátosságok (pl. fényeloszlás) érdemi

megváltozását. Ezáltal egy újabb pozitív irányú tényezővel korrigálható ($B10=1/0,9=1,11$) a karbantartási tényező.

A világítástechnikai számításokban alkalmazott lámpatestek esetében a következő értékekkel lehet számolni a legrosszabb esetben L80/60 ezer üzemórás élettartamú LED-fényforrás esetén:

LED fényforrás L-értéke IES-TM-szabvány szerint 60 ezer üzemórára	UA (beállt utak esetében 1)	FFA (15 évre, azaz 60 ezer üzemóra)	LTA (IP66)	B10-nek megfelelő korrekció (1/0,9)	MF
L80	1	0,8	0,93	1,11	0,83

Ugyanez a számítás korszerűbb lámpatesteknél, a legjobb esetre:

LED fényforrás L-értéke IES-TM-szabvány szerint 100 ezer üzemórára	UA (beállt utak esetében 1)	FFA (25 évre, azaz 100 ezer üzemóra)	LTA (IP66)	B10-nek megfelelő korrekció (1/0,9)	MF
L90	1	0,9	0,93	1,11	0,92

A számításokban a kettő közötti érték alkalmazása javasolt. Általánosan elmondható, hogy az $MF=0,85$ karbantartási tényezővel történő számítás bár rontja a méretezési eredményeket a korszerűbb lámpatestek esetén, de a piacon kapható termékek sokszínűsége óvatosságra int bennünket.

A műszaki-világítástechnikai számítások célja az, hogy bemutatásra kerüljön, hogy az adott lámpatest a tervezett műszaki élettartamának végén vagy a tervezett üzemeltetési ciklus végén is megfelelő módon képes megfelelni a világítási követelményeknek. A tervezés során ez – a megrendelő által elvárt üzemeltetési időszak figyelembe vételével - az elsődleges, mivel a technológiaváltással zajló és megtakarítás alapon finanszírozható közvilágítás korszerűsítések esetében a projekt pénzügyi előnyei csak a megfelelő élettartam mellett érvényesülnek.

4.3.3. Alkalmazandó színhőmérséklet

A települések közvilágítási feladatát jelenleg kompakt fénycsöves és nagynyomású nátriumlámpás világítótestekkel biztosítják. Azok színhőmérsékletéből kiindulva, a komfortérzet torzítását elkerülendő, 4500 K-nél hidegebb színhőmérsékletű világítótest alkalmazása kerülendő.

Fontos tényező, hogy számos helyen az épületek, a közterület jellege megköveteli az ennél alacsonyabb, azaz melegebb színhőmérséklet alkalmazását. Mielőtt tervezni kezdenénk, illetve megtakarítást és megtérülést számítanánk a megrendelővel ezt tisztázni kell.

4.3.4. Járdák világítása

A járdák világítását a hagyományos lámpatestek többé-kevésbé megoldották, még olyan esetekben is, amikor az oszlop mögötti növényzet jelentősen csökkentette ennek eredményességét. A tervezés során nem számolunk a fákkal, így az első legszembetűnőbb a LED-es korszerűsítéseket követően, hogy ezekben az esetekben bizony a járda szinte teljesen sötét marad. Ennek az a magyarázata, hogy jóval kevesebb a „szórt fény”, így nincs ami véletlenül a járdára szóródhatna. A tervezés során, legyen az új közvilágítási hálózat, vagy korszerűsítés, nem elegendő a szabvány által meghatározott környezeti hányados teljesítése, hanem külön figyelmet kell fordítani a járdák megvilágítására is.

4.3.5. Geometriai sajátosságok

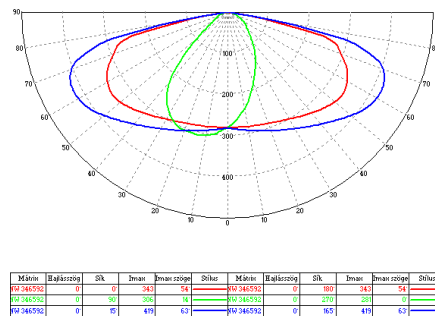
Magyarországon, nagyobb város belvárosi környezetétől eltekintve, az elosztóhálózat tartószerkezetein, sok esetben meglévő fénypontmagasságokra és karokra kerülnek fel a LED-es világítótestek. A tervezőnek a már felsorolt számos tényező mellett ezt is figyelembe kell vennie.

Parkvilágítások esetén gyakran 3-5 m-es fénypontmagasságra kerülnek a világítótestek. A káprázás elkerülése, csökkentése érdekében diffúz burás lámpatestek alkalmazása javasolt. Vidéki városok külterületi részein az elosztó hálózatra, légvezetékes hálózat alá kerülő világítótestek gyakran csak minden második oszlopon vannak. ME6-os útosztályra tervezve az egyenletességre vonatkozó ajánlásokat nem lehet teljesíteni. A tervezőnek mérlegelni kell, hogy a fénysűrűsége vonatkozó ajánlást teljesítve a közlekedő szemét ciklikus adaptációra kényszeríti, növelve ezzel a baleseti kockázatot, vagy olyan világítótestet választ, mellyel a látási komfort kedvezőbb.

4.3.6. Közvilágításban alkalmazott optikák jellemzői

A közvilágításban alkalmazott optikák technológiától független ismérve az, hogy a fényt oly módon kell irányítaniuk, hogy az képes legyen a tartószerkezettől valamilyen távolságra elhelyezkedő útfelületet és annak környezetét (környezeti hányados követelménye!) a tartószerkezetek kiosztási távolságára vonatkozóan egyenletesen megvilágítani, a megadott világítási követelményeknek megfelelően.

Ennek megfelelően a „jó” optika tehát aszimmetrikus az út felé eső oldal javára és kellő távolságra képes a fényt „teríteni”. Egzakt mérőszámok nincsenek, sok esetben a feladat határozza meg az optika megfelelőségét. A megfelelőség előzetes vizsgálatára a világítótestek fényeloszlási és hatásfok adatait érdemes megfigyelni.



4.1 ábra. LED-es világítótest fényeloszlási görbéi

A 4.1 ábrán egy LED-es világítótest optikájára vonatkozó polárdiagramot láthatunk. A zöld színnel jelzett (0-270°-os síkokban felvett), cd-ban megadott és a világítótestet elhagyó fényerősségi értékeket jellemző görbe szemlélteti az optika aszimmetriáját. Az aszimmetria mértéke az egyes lámpatest- és optika típusoknál jelentősen eltért már a hagyományos kisülő csöves lámpatestekben is, de a LED-es világítótestekben a variációs lehetőségek száma gyakorlatilag korlátlan.

A hagyományos kisülő csöves lámpatesteknél a fényeloszlás módját elsősorban a tükrőválaszték és a tükrő illetve a fényforrás egymáshoz viszonyított elhelyezkedése határozta meg. A LED-es világítótesteknél – már-már egyeduralkodó módon – egyre inkább a lencsés optikák terjednek el, amelyekben a LED-fényforrás(ok) elé elhelyezett fényterelő lencsék biztosítják a kívánt fényeloszlás létrejöttét. Mivel a lencsetervezés ma már professzionális alapokon zajlik, a variációk és a különféle világítási feladatokhoz történő optimalizálás lehetőségei korlátlanok.

A széles optikai választék azonban veszélyt is hordozhat. Üzemeltetési szempontból nem szerencsés, ha túl sokféle speciális optikájú lámpatestet tervezünk, mert az megnövelheti a hibaelhárításokhoz szükséges raktáron tartandó lámpatestek mennyiségét. Veszélyt jelent továbbá az is, hogy a különféle optikák – főleg a „széles” fénycsugárzó tulajdonságokkal – rendelkezők a különféle fénypontmagasságokon és hajlásszögekre állítva különféle mértékben zavaró kápráztató hatást gyakorolhatnak a közlekedőkre. Ez a probléma a korábbi, inkább diffúz burás lámpatesteknél kevésbé volt szembetűnő, de a LED- és világítótesteknél a fény erős irányítottága ezt a kápráztató hatást sokkal markánsabbá, adott esetben zavaróbbá teszi, függetlenül attól, hogy esetleg a különféle programokban elvégzett TI% (küszöbértéknövekmény)-számításokból az látszik, hogy a kápráztatás szintje megfelelő lehet. Gyakorlati szempontból az javasolható, hogy 6-7 m fénypontmagasság alatt G3 káprázási osztálynál magasabb osztályú világítótestet nem célszerű LED- és világítótestek esetén alkalmazni.

4.3.7. Megtakarítási és tervezési lehetőségek (korszerűsítések cserék elvei, céljai)

A korszerűsítések alapvető célja a hálózaton üzemeltetett avult berendezések arányának csökkentése. Technológiától függetlenül is csökkenthetők a költségek pl. hatékonyabb optikák és előtétek használata mellett. A kisülő csöves lámpatestekkel így kb. 10-15% villamos energia és üzemeltetési költség takarítható meg. A hagyományos kisülő csöves lámpatestek – mint már korábban megemlítésre került – technológiai fejlődésének korlátjait nézve több megtakarítási lehetőségek nem hordoz magában. A radikálisan megváltozott önkormányzati finanszírozási rendszerben a közvilágításra kötelezett önkormányzatoknak, ennél nagyobb megtakarításra és sok esetben a jelenleginél adaptívabb és jobb közvilágításra is szüksége van, amely jelen állapotban csak a LED-es világítótestekkel valósítható meg. A LED-es világítótestek alkalmazásával az alábbiak szerint realizálhatók a korszerűsítési célok:

- Jobb közvilágítás, azaz a megfelelő megvilágítási szintek a megfelelő helyszíneken: érzékenyebb és részletesebb tervezéssel a LED-es világítótestekre jellemző teljesítmény- és fényáram lépcsők kihasználásával, a világítási követelmények pontosabban és helyszínhez adaptált módon lekövethetők.
- Nagyobb mértékű fogyasztási költségmegtakarítás: részben az adaptív tervezésből, másrészt a fényforrás nagyobb hatékonysága révén, illetve a kisülő csöves lámpatestekhez mérten kisebb optikai veszteségek révén már akár 30-40% közötti megtakarítás érhető el.
- Üzemeltetési költségmegtakarítás: a LED-es világítótesteknél a 3-4 évente eddig szükséges fényforráscserékre értelemszerűen nincs szükség, továbbá statisztikailag kimutatható, hogy a meghibásodási ráta (szinte csak a driverre jellemző) is jóval alacsonyabb. Mindezek a tényezők akár a költségek 30-50%-ának megtakarítását is lehetővé teszik.

A LED-es lámpatestekhez tervezett egyre korszerűbb és sokoldalúbb meghajtóegységekkel olyan egyéb „smart” lehetőségek is számításba kerülhetnek, mint pl. a távfelügyelet és a fényáramok adaptív és akár egyedileg is programozható/működtethető szabályozása.

A tervezés szempontjából ezek előzetes egyeztetése és felvetése kulcskérdés, annak érdekében, hogy a tervezés legfontosabb céljai már a koncepció szintjén is tisztázásra kerüljenek.

4.3.8. Szerelési szempontok és legfontosabb különbségek kisülő csöves és LED berendezések alkalmazása között

Szerelési szempontok	Kisülő csöves fényforrással üzemelő lámpatestek	LED-es lámpatestek
Fizikai különbségek	A lámpatestek beállítása a foglalat és a dőlésszög állításával	A LED-es világítótestek irányított fényének megfelelő beállítása a hajlásszögek pontos

Szerelési szempontok	Kisülő csöves fényforrással üzemelő lámpatestek	LED-es lámpatestek
	<p>történik.</p> <p>A tükrök által irányított, de szórt fénynek köszönhetően egy rossz beállítás csak a megvilágítandó felület és a környezetére jutó fény arányát módosítja, komolyabb közlekedésbiztonsági kockázatot nem eredményez.</p>	<p>beállítását igényli. A szerelésnél ezt figyelembe kell úgy is venni, hogy a meglévő oszlopok gyakran már eleve dőltek. A helyes beállítás a LED lámpatestek optikai sajátosságainak ismeretét és szerelési rutint igényel. Helytelen beállítás esetén a LED-es világítótest indokolatlan mértékben kápráztat, ami veszélyeztetheti a közbiztonságot.</p>
Optikai különbségek	<p>Az alapismeretek elsajátítását követően a tervező könnyen eligazodik a különböző lámpatestgyártók termékei között.</p>	<p>A különféle világítási helyzetekben alkalmazandó LED-optikák helyszínhez igazítása és a sokszor alig szembetűnő optikai különbségekkel jellemezhető lámpatestek megfelelő kiválasztása és felszerelése előzetes oktatást és folyamatos képzést, a szakirodalom és a technológia fejlődésének folyamatos követését (pl. kamarai oktatásokon, konferenciákon való részvételt) igényli. A LED-es kivitelezésben jártas cégek munkájához ez elengedhetetlen.</p>
Elektronikai különbségek	<p>A LED-lámpatestek legérzékenyebb alkatrésze a meghajtó elektronika, amelynek megfelelő működését és védelmét általában pl. túlfeszültségvédelmi és túláramvédelmi eszközök is biztosítják. Ezek megfelelő bekötésének és karbantartásának hiánya azonban gyorsan a lámpatest élettartamának csökkenését vonhatja maga után.</p>	
Meghajtó elektronika bekötése	<p>Az elektronika érzékeny a nem megfelelő bekötésre is. Ha a tápkábelek nem megfelelően kerülnek bekötésre, akkor pl. a közúti forgalom hatása vagy a szél miatti kirázódását követően a LED-es lámpatest villogni kezd a folyamatos kontakthibák miatt. A kisülő csöves lámpatestek nem alkalmasak az azonnali újragyújtásra, ezért azoknál az újragyújtás előtt néhány perctel is elérhető sötét állapot fordul elő. Kivitelezéseket követően a bejelentett hibák kb. fele ilyen, bekötési hibákból fakad. Ezek a beruházók számára komoly kommunikációs és presztízsvesztéseket okoznak, hiszen ezek a leginkább szembetűnő hibák a lakosság szemében.</p>	
Szerszám- és szerelési szakértelem	<p>A LED-lámpatestek a korábbi gyakran műanyagházas kisülő csöves modellekhez képest általában teljes egészében fémből készülnek, erőteljesebb és speciálisabb kötőelemekkel. Ezek biztosítják a lámpatestek csatlakozásának és pl. a beállított hajlásszögének tartósságát és a lámpatestházak magas és speciális védelmi igényét. Az érzékeny alkatrészek miatt a LED lámpatesteknél emiatt a megfelelő</p>	

Szerelési szempontok	Kisülő csöves fényforrással üzemelő lámpatestek	LED-es lámpatestek
	szerszámpark megléte és a felelős szerelés (pl. a csavarok megfelelő nyomatékkal történő meghúzása) kiemelten fontos. Magyarázat: ezeket az ismereteket a felelős kivitelezők általában képzéseken sajátítják el, amelyeket vagy erre szakosodott szervezetek vagy gyártók tartanak.	

LED-es kivitelezés során a kivitelezőnek olyan speciális tudással és szerszámokkal kell rendelkeznie, hogy a tervek és a megvalósult világítás összhangban legyen, valamint a világítótest élettartama ne csökkenjen.

4.3.9. Üzemeltetési szempontok, hibajelenségek és legfontosabb különbségek kisülőcsöves és LED berendezések alkalmazása között

Üzemeltetés/ hibajelenségek	Kisülő csöves fényforrással üzemelő lámpatestek	LED-es lámpatestek
Fényforrás meghibásodása	A fényforrás élettartama végén van, cseréje szükséges.	Az optikai egység legtöbb konstrukció esetén üzemeltetési helyzetben nem cserélhető. Az üzemeltetőnek vagy ki kell cserélnie világítótestet, vagy ha a gyártó felhatalmazta, akkor cserélheti az optikai modult <u>antisztatikus</u> környezetben.
Meghajtóegység meghibásodása	A piacon bármely gyártó terméke alkalmazható az adott teljesítményű fényforráshoz.	A gyártó által meghatározott működtető egység építhető be. Kívülről azonosnak tűnő termékek esetében a beépítésnél az eltérő meghajtóáram kihatással van a világítótest működésére, amely vagy szembetűnő egy bizonyos típusnál vagy első ránézésre észrevehetetlen. Amennyiben kisebb a meghajtóáram, úgy csökken a megvilágítás, amennyiben nagyobb, a világítótest idő előtti meghibásodásához vezethet. Az üzemeltetőnek tudnia kell, hogy melyik működtető egység építhető be az adott típusnál.
Elektronikai egységek karbantartása	Nem igényel karbantartást. A lámpatest nem	A LED-es világítótest alkatrésze a meghajtó elektronika, amelynek megfelelő működését és védelmét általában pl.

Üzemeltetés/ hibajelenségek	Kisülő csöves fényforrással üzemelő lámpatestek	LED-es lámpatestek
	rendelkezik általában túlfeszültségvédelmi, illetve túláramvédelmi eszközökkel.	túlfeszültségvédelmi és túláramvédelmi eszközök is biztosítják. Ezek megfelelő bekötésének és karbantartásának hiánya azonban gyorsan a lámpatest élettartamának csökkenését vonhatja maga után.
Lámpatest átalakítása – teljesítmény növelés	Gyakran alkalmazott megoldás, hogy a lámpatestben a foglalt, a fényforrás és a gyújtó, előtét cseréjével megoldható.	Az azonos LED-számú, fizikai méretű és azonos lámpatestcsaládba tartozó termékeknek is a meghajtó kimeneti áramának megváltoztatása, különösképpen kimeneti áramának növelése a lámpatest élettartamát lerövidítheti és ez esetben a jótállás megszűnik. Kívülről azonosnak tűnő termékek esetében is a gyártásnál és összeszerelésnél is a nagyobb meghajtóáram által okozott nagyobb hőtermelés más anyagú izolációs és hűtési megoldásokkal, csatlakozókkal, más keresztmetszetű anyagokkal valósul meg, amely vagy szembetűnő egy bizonyos típusnál vagy első ránézésre észrevehetetlen. Az üzemeltetőnek tudnia kell, hogy az adott típusnál az átalakítás elvégezhető-e, vagy sem.

Melléklet

I. Fogalomjegyzék

Átlagos megvilágítás, E_{av}

Valamely helyiségben vagy valamely tevékenység célját szolgáló térrész kijelölt felületének meghatározott helyein értelmezett megvilágítási értékek átlaga. Világítási berendezések tervezésénél, megvalósult berendezések ellenőrző mérésénél a tervezési ill. mérési pontok számát megfelelő körültekintéssel kell meghatározni. Túl kevés pont nem ad reális eredményt. Túl sok pont feleslegesen sok adata nemcsak indoktalanul sok munkát igényel, hanem az áttekinthetőséget is rontja. A realitások tekintetében a létesítési szabványok tájékoztatnak.

Avulási tényező (v)

Az \sim a világítási berendezések üzemszerű használata során bekövetkező megvilágítás csökkenést veszi figyelembe a világítástechnikai tervezésnél. Számértéke a névleges és kezdeti megvilágítás aránya:

$$v = E_n / E_0$$

Az avulási tényező reciproka a tervezési tényező.

Cilindrikus megvilágítás (E_z)

A hengerpalástra eső fénysűrűségnek és a hengerpalást felületének hányadosa, a hengerpalást megvilágítása. Közelítő meghatározása: kis sugarú hengerbe helyezhető, legalább négyoldalú hasáb lapjain értelmezhető megvilágítások átlaga. A \sim az alakfelismerés szempontjából meghatározó jelentőségű.

Elektromágneses kompatibilitás, EMC

A villamos készülékek azon tulajdonsága, hogy nem bocsátanak olyan mértékű elektromágneses sugárzást, amely más villamos készülékek működését megzavarja, és ilyen sugárzást áramfelvételük felharmonikus-tartalma sem okoz. Ugyanakkor a más villamos készülékek által kibocsátott, megengedett mértékű elektromágneses sugárzás sem zavarja meg az adott készülék működését.

Élettartam-görbe

Az élettartam-görbe vagy „kiegési görbe” azt mutatja meg, hogy bármely „t” időpillanatban a fényforrások hány százaléka hibásodott meg, és hány működik még tovább; vagyis a még működő lámpák számát ábrázolja az üzemidő függvényében. A görbe inflexiós pontjának megfelelő időpillanatig eltelt időtartam a lámpa(típus) átlagos élettartama (T_a). Ez a fényforrások 50%-ához tartozó időtartam. Ha a lámpa meghibásodások normális (Gauss) eloszlást követnek, az

élettartamfüggvény első deriváltja szolgáltatja a közismert haranggörbét, vagyis a meghibásodások bekövetkeztének sűrűségfüggvényét.

EULUMDAT-fájl

Európai lámpatest gyártók által kidolgozott egységes cégfüggetlen számítógépes fájlformátum a lámpatestek fénytechnikai adatainak leírására. Lehetővé teszi a világítástechnikai tervezés során azonos tervezőprogrammal különböző gyártók lámpatestjeivel történő számítást.

Fény

A fény az elektromágneses sugárzás szemünk által érzékelhető hányada. Az un. látható tartomány 380 nm-től 780 nm-ig terjed, ezen belül a szemünk a hullámhossztól függően képes a sugárzást fényérzetté alakítani.

Fényáram

A sugárzott teljesítményből leszármaztatott mennyiség, amely az optikai sugárzást a szabványosított spektrális fényhatásfok szerint értékeli. Jele: Φ , Φ_v . Egysége: Lumen, jele: lm. Egyéb utalás hiányában a fényáram a világosban látásra vonatkozik.

Fényáram stabilitási tényező

Matematikailag egy tört, amelynek számlálója az adott ideig működtetett lámpa fényárama, nevezője ugyanennek a lámpának a kezdeti fényárama. Minden fényforrásra jellemző bizonyos mértékű fényáramcsökkenés, melynek okai fényforrásonként eltérőek.

Fényeloszlási test

Egy fényforrás vagy lámpatest a tér különböző irányában általában nem egyenletesen, hanem különböző erősséggel sugároz. Ha az optikai középpontból kiindulva felmérjük nagyság és irány szerint a fényerősségek vektorait, akkor azok végpontjai határozzák meg a \sim -et. A gyakorlatban a különböző katalógusokban a \sim síkmetszeteit, a fényeloszlási görbéket adják meg.

Fényerősség

Valamely sugárzó adott irányban értelmezett fényerőssége a sugárzóból adott irányt tartalmazó elemi térszögbe sugárzott, $d\Phi_v$ fényáramnak és a $d\Omega$ térszögnek a hányadosa:
 $I_v = d\Phi_v / d\Omega$

Mértékegysége: cd (kandela)

A fénytechnikai mennyiségeket a fényerősség egységére vezetik vissza.

Fényhasznosítás

A fényáram és a fényforrás által felvett teljesítmény hányadosa. Egysége: lumen/watt, jele: η

Fénysűrűség

A felület adott pontjából kiinduló fényerősségnek és a felület erre merőleges vetületének hányadosa. A világítástechnikai tervezés alapvető mennyisége, mivel szemünk ezt érzékeli.

Hatásfok

A hatásfok általános értelmezése szerint valamely rendszer hasznos teljesítményének és a betáplált teljesítményének a hányadosa.

A fényforrások esetében a hatásfok helyett a hasonló jellegű \Rightarrow fényhasznosítás a gyakorlatban használt fogalom.

Lámpatestek hatásfokának jellemzésére használatos mennyiségek:

1. Optikai \sim : a lámpatestből kilépő fényáram és a lámpatestben működő lámpa vagy lámpák fényáramának aránya.

2. Fénytechnikai \sim : a lámpatestből kilépő fényáram a lámpatesten kívül, referencia körülmények között működő fényforrás fényáramához viszonyítva.

Káprázás

Látási zavar vagy kényelmetlenség, amelyet nagy fényűrűségek, és/vagy fényűrűség különbségek okoznak. A \sim különböző fajtáit különböztetjük meg, egyrészt hatása szerint lehet \Rightarrow zavaró káprázás, vagy \Rightarrow rontó káprázás. A \sim forrása szerint lehet \Rightarrow közvetlen (direkt) káprázás, vagy \Rightarrow tükröző káprázás.

Korrelált színhőmérséklet

A fekete test azon valóságos abszolút hőmérséklete, amelynek a fekete test színe a legjobban hasonlít a kérdéses sugárzó színére.

A „legjobban hasonlít” fogalom azt jelenti, hogy a CIE 1964 UCS (egyenlő közű szintérben) szintérben a fekete-test vonalra állított merőleges trajektorián van a színpont. A fogalom csak olyan színpontokra alkalmazható, amelyek a Planck görbe közelében találhatók (távolságuk nem nagyobb 10 megkülönböztethető árnyalatnál).

LED

A Light Emitting Diode rövidítéséből eredő betűszó, magyarul világító dióda. Félvezető alapú fényforrás, működése leegyszerűsítve abban áll, hogy egy p-n átmenetre nyitóirányú feszültséget kapcsoltak, mire mind az elektronok, mind a lyukak az érintkezési felület felé mozognak és ott rekombinálódnak. A rekombináció alkalmával felszabaduló energiát sugároz ki. A kibocsátott monokromatikus sugárzás hullámhossza a dióda anyagi minőségétől függ; többségüket III. és V. vegyértékű elemekből előállított vegyület-félvezetők alkotják, amelyekhez a rekombinációs centrumok kialakítása céljából adalék-elemet adnak. Ilyen pl. a nitrogénnel adalékolt galliumfoszfid (GaP), mely zöld fényt sugároz.

Lumen

A fényáram SI mértékrendszerbeli egysége.

A minden irányban egy kandela fényerősségű pontszerű sugárzó 1 sr térszögbe 1 lumen fényáramot sugároz. Jele: lm.

Megvilágítás

Az adott pontot tartalmazó felületelemre beeső fényáramnak és a felületelemnek a hányadosa. Jele:

E_v, E

OLED

Szerves félvezető dióda (organikus LED).

Rontó káprázás (fiziológiai káprázás)

A kápráztató hatások közül azt nevezzük ~nak, amely látásromlást eredményez, csökkenti a látótéljesítményt. Pl. az úton szembejövő gépjármű lámpái „elvakítanak”, ennek következményeként nem látható a környezet.

Spektrális eloszlás

A sugárzást jellemző bármely mennyiség spektrális értékei a hullámhossz függvényében, $X(\lambda)$. Gyakran használjuk a viszonylagos spektrális eloszlásokat, ezek egy adott hullámhossznál vett értékhez viszonyított értékek.

Szín

Normális látású (nem színtévesztő) emberekben a látható sugárzás a fényérzettel együtt és attól elválaszthatatlanul színérzetet is létrehoz. Ezt három jellemzővel lehet leírni:

1. $a \Rightarrow$ színezet a szín jellegére utal (pl. kék, zöld, vörös);
2. $a \Rightarrow$ színdúság a szín erősségére utal;
3. $a \Rightarrow$ világosság a szemünkbe jutó fény mennyiségére utal.

Ezért a szín kifejezést általában nem lehet önmagában használni. A színérzetet a szemünkbe jutó sugárzáson (színínger) kívül az észlelés körülményei és agyi folyamatok is befolyásolják.

Színvisszaadási index

A színvisszaadási index annak jellemzésére használt mérőszám, hogy a kérdéses, spektrális sugárzéseloszlásával jellemzett fényforrással megvilágítva, kiválasztott jellemző színminták (referencia színminták 1...8) színe milyen mértékben változik meg a referenciasugárzóval megvilágított színükhöz képest. A referenciasugárzó Planck sugárzó, ha a fényforrás korrelált színhőmérséklete kisebb, mint 5000K; és nappali fény, ha nagyobb mint 5000K. A 8 minta átlagából a színi áthangolódást is figyelembe véve számított R_a általános színvisszaadási index értéke 100, ha nincs színeltolódás és, minél nagyobbak a színkülönbségek, annál kisebb az index értéke. Az egyes színmintákra (pl. emberi bőr színe, levélzöld stb. külön-külön is értelmezhetők a speciális színvisszaadási indexek.

Teljesítménytényező

A hatásos teljesítmény és a látszólagos teljesítmény hányadosa (λ). A látszólagos teljesítmény a feszültség és az áramerősség effektív értékének szorzata. A λ nem azonos a fázistényezővel ($\cos \varphi$), amely csupán az alapharmonikus szinuszos meddőteljesítményt veszi figyelembe.

Világítási hatások

A munkasíkra beeső fényáramnak és a világítási berendezésbe beépített fényforrások fényáramának aránya.

Zavaró káprázás (pszichológiai káprázás)

A kápráztató hatások közül azt nevezzük \sim nak, amely látási kényelmetlenséget okoz, anélkül, hogy szükségképpen rontaná a tárgy látását. Ilyen zavart okozhat, ha pl. egy nagy fényűrűségű tárgy van a perifériás látás területén.
