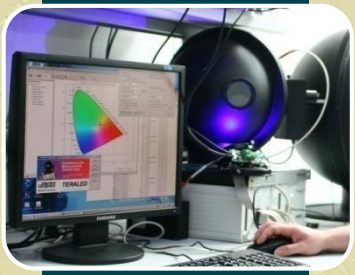
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

MŰEGYETEM 1782

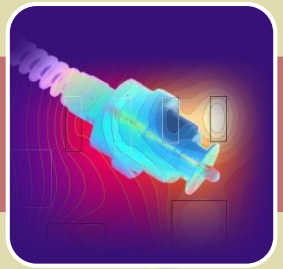
Elektronikus Eszközök Tanszéke

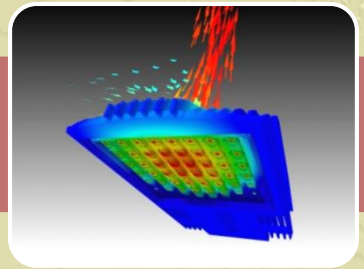


A LED, mint fényforrás

Készítette: Dr. Poppe András, egyetemi docens

Előadó: Hegedüs János, tudományos segédmunkatárs





VILÁGÍTÁSTECHNIKAI TÁRSASÁG vtt MEE

eet.bme.hu

A fényforrások fejlődése

Modern idők

Ókor/Középkor

Újkor (ipari termelés)

Őskor

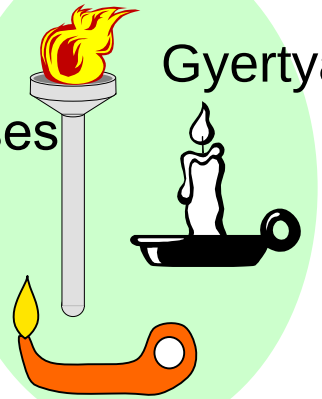
Tűz

35 ..100 ezer éve

Olaj mécses

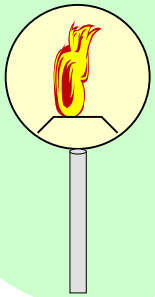
Fáklya

Gyertya



1..4 ezer éve

Gázlámpa



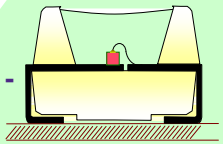
~160 éve

Égésen alapuló hőmérsékleti sugárzók

Fluoreszcens fényforrások, ízzólámpa

~70..120 éve

Félvezetők



- szervetlen
- szerves

~15..40 éve

Nagyon szerteágazó alkalmazások (mint a mikroelektronika esetében is)

- általános világítás
- közlekedés
- reklám
- orvostudomány
- autóipar

- autóipar
- megjelenítés
- jelzőfények
- spec. világítás
- adattárolás
- adatátvitel

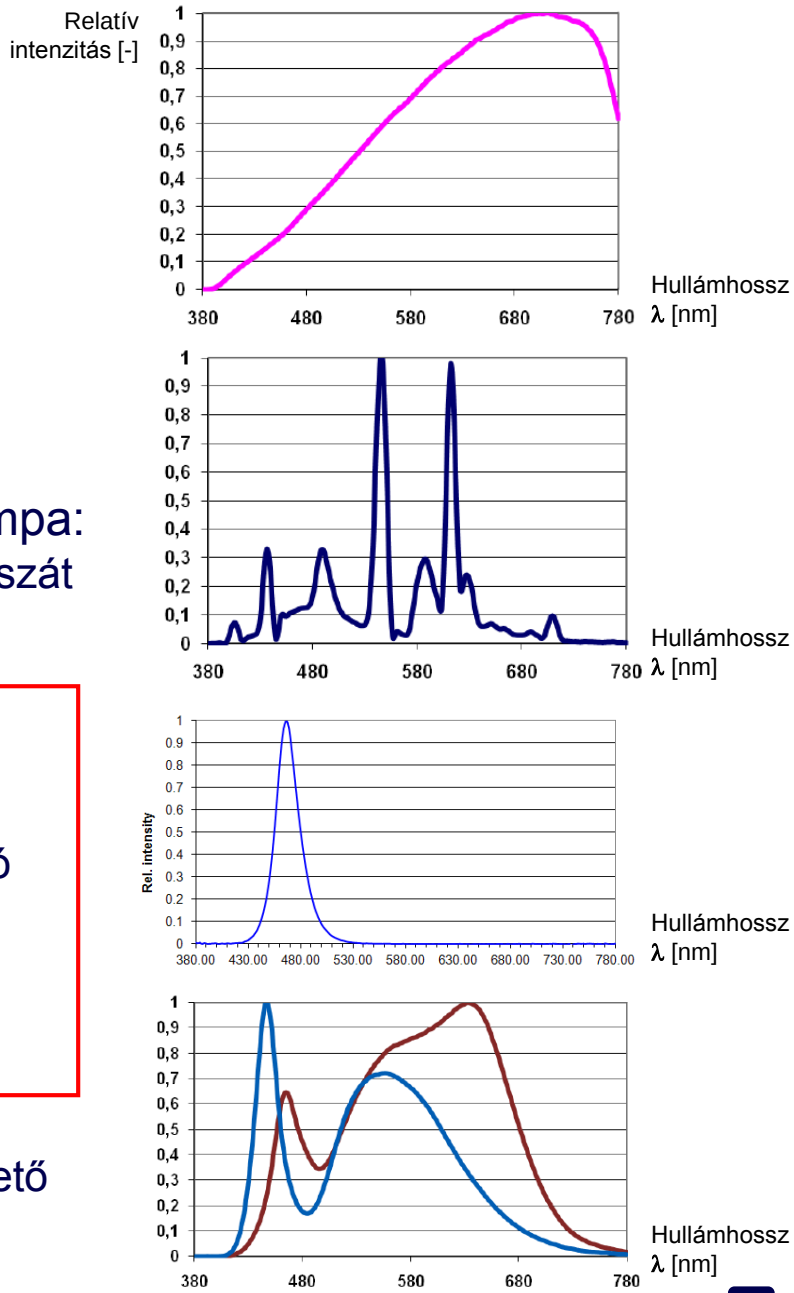
A mesterséges fényforrások innovációs ciklusa egyre rövidebb...

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A fénykeltés módjai

- Ízzólámpa:
  - fekete test sugárzó
  - folytonos spektrum
- Gázkisűlő lámpák:
  - diszkrét elektron állapotátmenetek ionizált gázban / gőzben
  - vonalas spektrum, esetleg több vonal is
  - primer sugárzás
- Fénycső, kompakt fénycső, higanygőz lámpa:
  - mint fent, de a primer sugárzás hullámhosszát fényporral konvertálják nagyobb hullámhosszra
- Színes LED:
  - elektron állapotátmenetek félvezető egykristályban
  - majdnem monokromatikus primer emisszió
- Fehér LED:
  - elektron állapotátmenetek félvezető egykristályban ➔ primer emisszió
  - + hullámhosz konverzió fényporral
- OLED:
  - elektron-lyuk rekombináció szerves félvezető anyagban (LEP – light emitting polymer)

(relatív) spektrális teljesítményeloszlások



© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Az első LED-ek…

A Note on Carborundum.

To the Editors of Electrical World:

SIRS:—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole, a bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

NEW YORK, N. Y. H. J. ROUND.

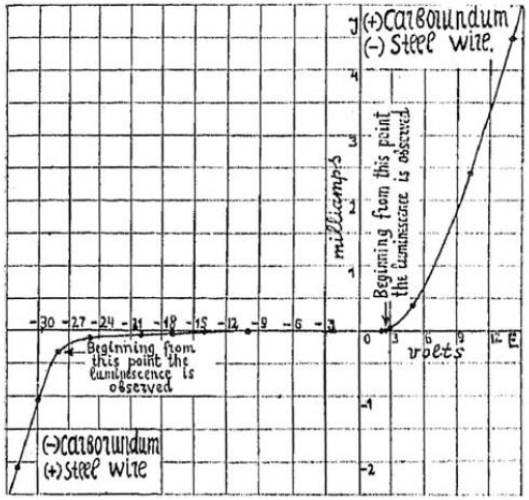
Henry Joseph Round
(1881 – 1966)

- 1907: az elektrolumineszcencia első megfigyelése
  - 1907: az első LED
  - szilíciumkarbidból (SiC), azaz korundból (*carborundum*)
    - A korund nagyon kemény, vágótárcsák, csiszolópapírok alapanyaga

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Az első LED-ek…

- Oleg V. Loszev (Олег В. Лосев) cári katonacsalád sarja, 20 évesen már publikált
- A SiC (korund) elektrolumineszcenciájának első részletes leírója
  - Fő következtetése, hogy a keletkező fény nem hőmérsékelti sugárzás
  - Első LED (mérések 1924 és 1928 közt)
  - Fényemisszió nyitó és záró irányban
- Szovjet szabadalom: 1929



Oleg Vlagyimírovics Loszev (1903 – 1942)

Класс 21 а, 27

№ 12191

ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

ОПИСАНИЕ

светового реле.

К патенту О. В. Лосева, заявленному 28 февраля 1927 года (заяв. свид. № 14672).

О выдаче патента опубликовано 31 декабря 1929 года. Действие патента распространяется на 15 лет от 31 декабря 1929 года.

Source: PatentsFromRU.com

Предлагаемое изобретение использует общеизвестное явление свечения в карборундовом детекторе и состоит в том, что в световом реле для быстропишущего телеграфного или телефонного приема, передачи изображений на расстояние и других целей, в качестве модулируемого электрическим током источника света, применяется свечение в точке контакта карборундового детектора, включенного непосредственно в цепь модулирующего тока.

На чертеже фиг. 1 изображает схему предлагаемого светового реле и фиг. 2 — схему устройства для фотографической записи сигналов с применением светового реле.

К зажимам *A* источника тока сигналов, подлежащих записи, через потенциометр P включается светящийся карборундовый детектор *D*, в цепь которого включена батарея *B*, дающая дополнительное постоянное напряжение для наложения его на напряжение тока сигналов и усиления действия реле; путем регулировки этой батареи создаются наивыгоднейшие условия работы детектора *D*. Оптическая система *L* предназначена направлять световой поток, излучаемый карборундовым детектором, на движущуюся фотографическую пластинку *F*, на которой производится запись изменений этого потока. Детектор *D*, оптическая система *L* и пластина *F* заключены в светонепроницаемую камеру. Примерное включение светового реле показано на чертеже 2, где *E* — приемник-усилитель высокой частоты, *T* — автотрансформатор высокой частоты, а остальная часть схемы вполне аналогична только-что описанной.

Предмет патента.

1. Световое реле для быстропишущего телеграфного или телефонного приема, передачи изображений на расстояние и для других целей, характеризующееся применением, в качестве модулируемого электрическим током источника света, свечения в точке контакта карборундового детектора общеизвестного устройства, каковой детектор включен непосредственно в цепь модулирующего тока.

2. Видоизменение охарактеризованного в п. 1 светового реле, отличающееся тем, что последовательно с указанным детектором *D* включен источник дополнительного напряжения постоянного тока *B* (фиг. 1 и 2) с целью усиления действия реле.

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Kereskedelmi LED-ek fejlődéstörténete

- 1962: TI – első kereskedelmi GaAs IR LED,
- 1962: GE – első vörös LED (N. Holonyak)
- 1972: Sárga, sárgészöld LED-ek
- 1978: Első nagy intenzitású LED
- 1989: GaN homo-junction LED
- 1993: Hatékony kék LED
- 1997: Fehér LED (kék + fénypor)
- 2001: Fehér LED (UV LED + fénypor)
- Napjaink: Nagyteljesítményű LED-ek
  - 1 .. 10 .. 100 W

Akasaki, Amano és Nakamura professzorok
2014-es fizikai Nobel-díj

Korábban csupán indikátorokként (berendezések előlapján) használták, ma már betörtek a világítástechnika területére

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A technológiai fejlődés összehasonlítása

Elektrotechnika / elektronika:

- Elektro-mechanikus eszközök
- Elektronikus eszközök megjelenése
  - Vákuumtechnika
    - Elektroncsövek
- Félvezető eszközök megjelenése
  - ***Solid-state electronics***
  - Integrált áramkörök
    - mikroelektronika
  - **Moore törvénye**

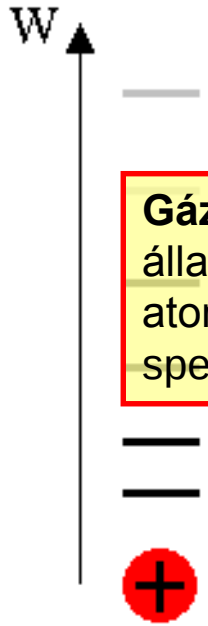
Világítástechnika:

- Termikusan (tűzzel) táplált fekete test sugárzók
  - Csúcs: gázlámpa
- Elektromos világítás megjelenése
  - Vákuumtechnika
    - Ízzólámpák
    - Gázkisülő lámpák
- Félvezető eszközök (LED-ek) megjelenése
  - ***Solid-state lighting***
  - Integrált LED modulok
    - Smart SSL
  - **Haitz törvénye**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

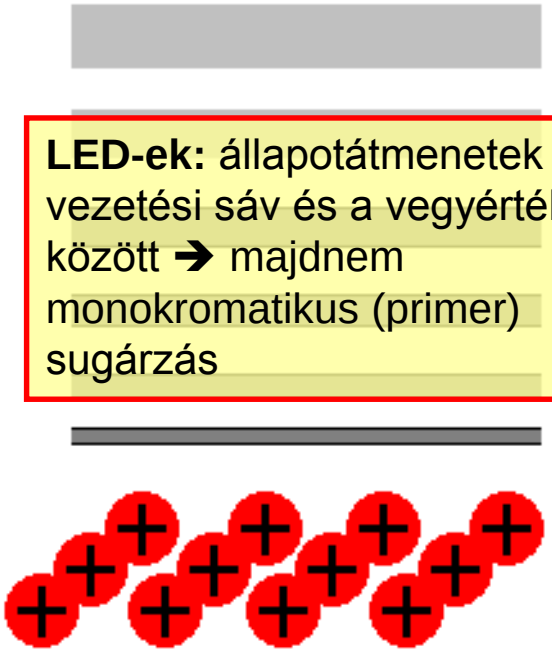
Vákuumtechnika → félvezető technológia

Diszkrét atomi energia szintek:



Gázkisülő lámpák / fénycső: állapotátmenetek ilyen diszkrét atomi szintek közt ➔ vonalas spektrum

Egykristályban szinte folytonos sávokká hasadnak:



LED-ek: állapotátmenetek a vezetési sáv és a vegyérték sáv között ➔ majdnem monokromatikus (primer) sugárzás

Klasszikus fényforrások	Szilárdtest fényforrások
Elektroncsövek	Félvezető eszközök
Vákuumtechnika	**Félvezető technológia**
Melegítés segíti a működést	**Hűtés szükséges működéshez**

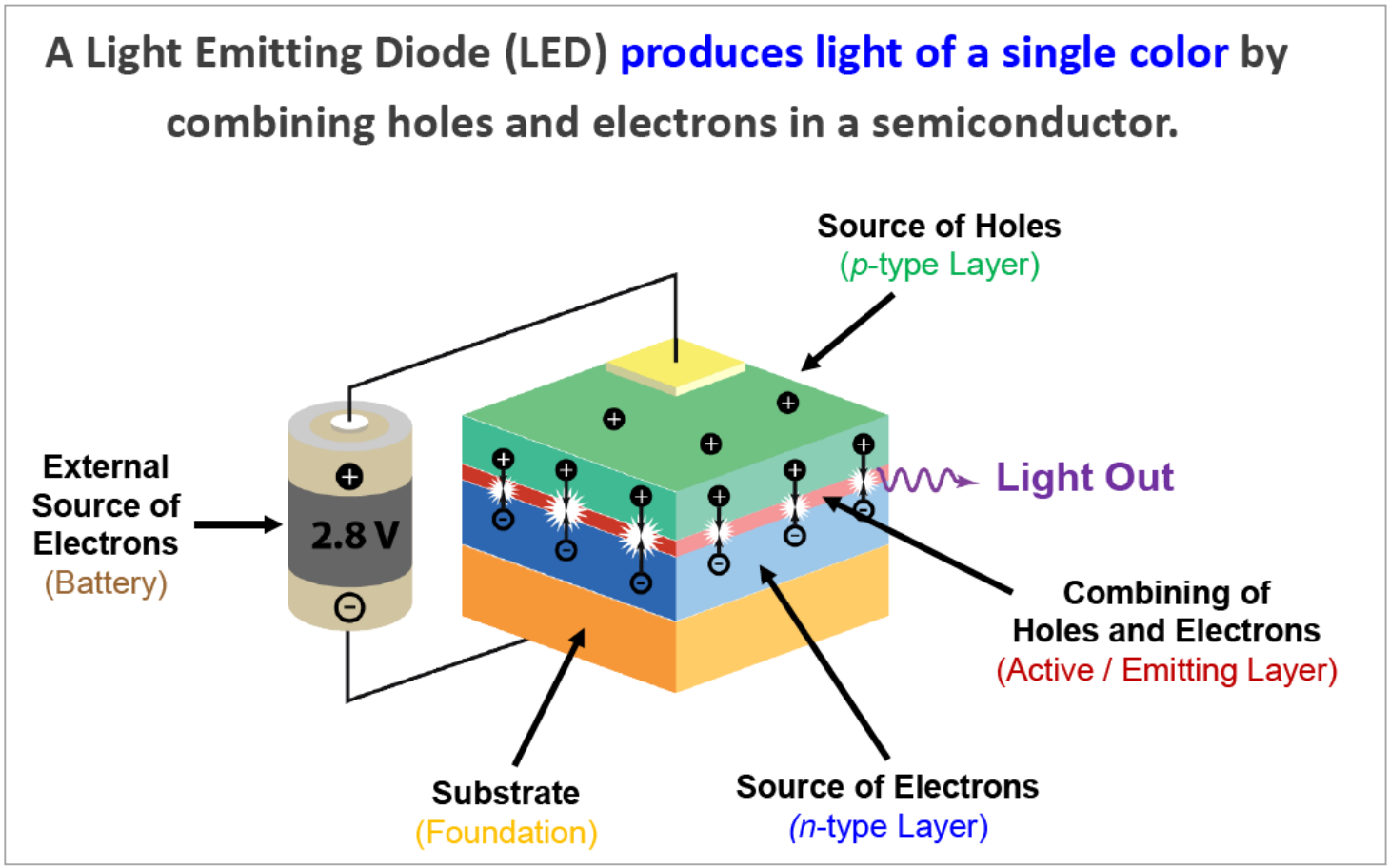
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A LED MŰKÖDÉS FÉLVEZETŐ FIZIKAI HÁTTERE

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Mi a LED?

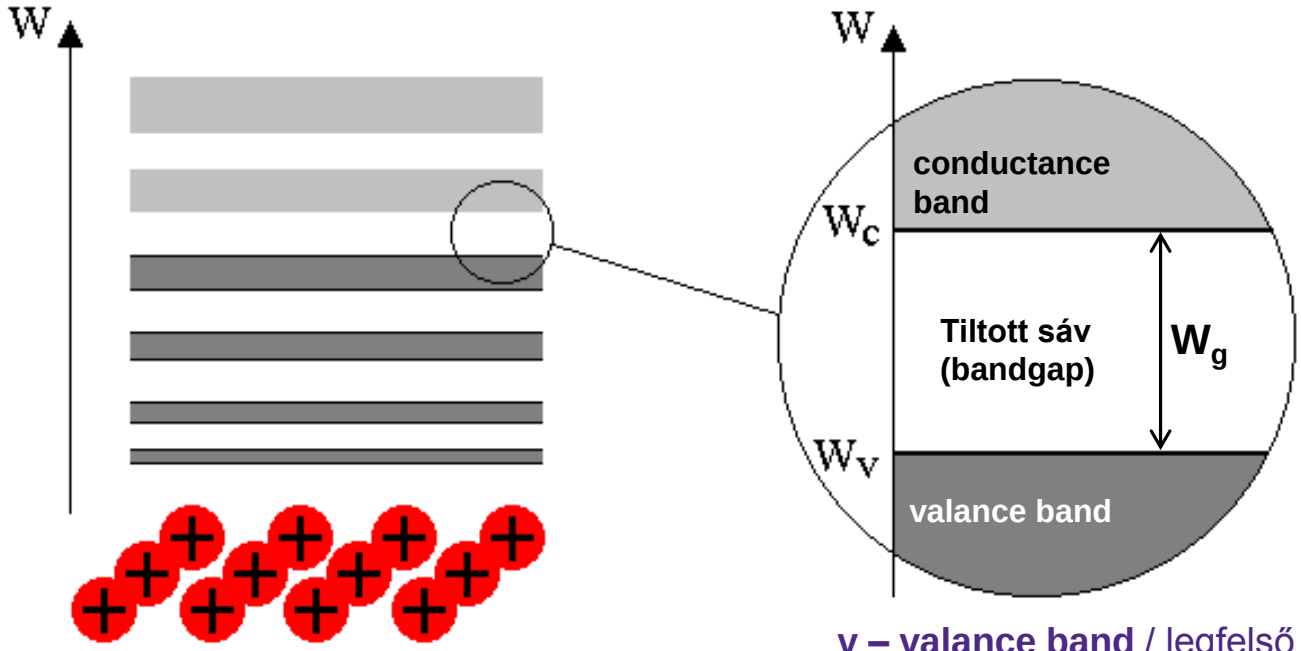
- Egy speciális félvezető dióda, egy speciális PN átmenet:



Forrás: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/nakamura-lecture-slides.pdf

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Vegyérték sáv, vezetési sáv

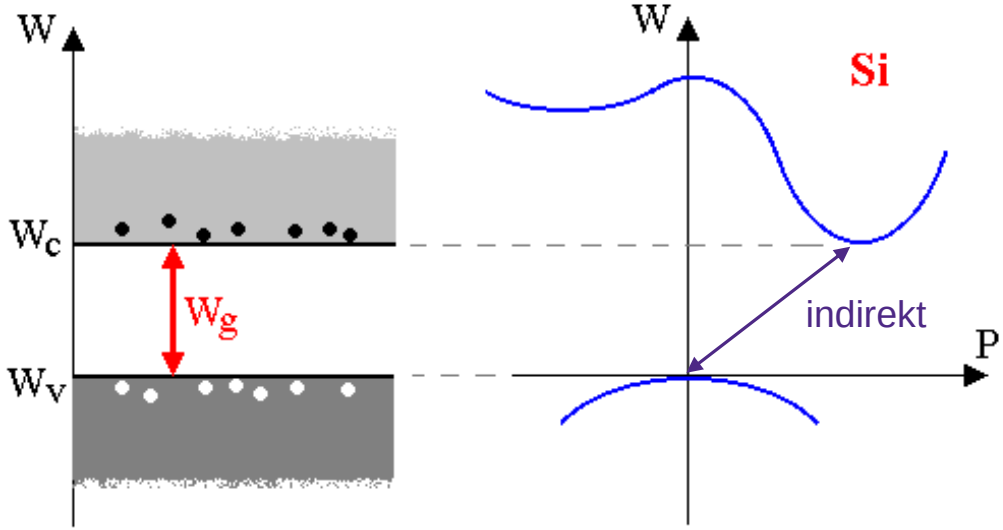


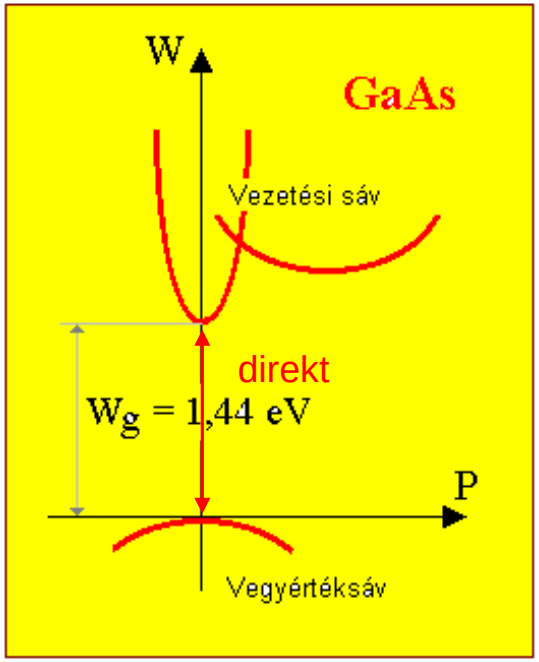
v – valance band / legfelső betöltött sáv
c – conductance band / legalsó üres sáv

- Vegyérték sáv – ezek az elektronok hozzák létre a kémiai kötéseket
  - majdnem tele van
- Vezetési sáv – ezek az elektronok áramot tudnak vezetni
  - majdnem üres

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Félvezetők sávszerkezete





$$W = \frac{1}{2m} p^2 \rightarrow W = \frac{1}{2m_{eff}} P^2$$

$$F = \frac{dP}{dt}$$

$$P = \frac{h}{2\pi} k$$

GaAs: direkt sáv ⇒ opto-elektronika (pl. LED-ek)
Si: indirekt sáv

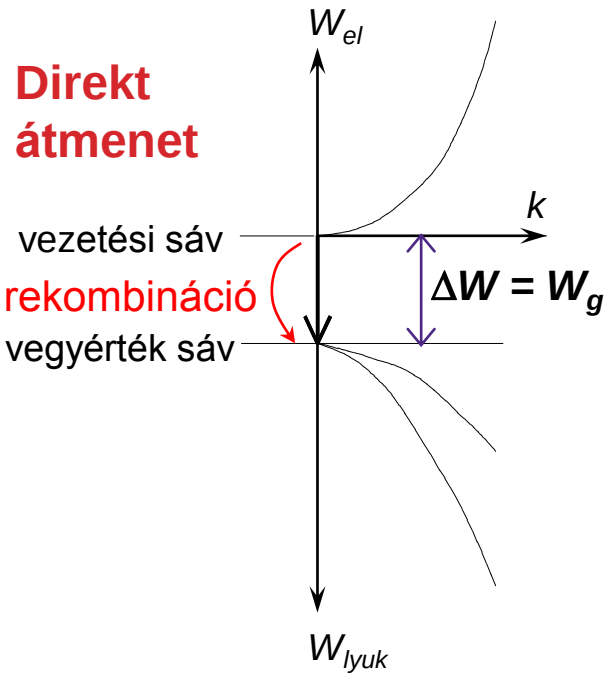
Indirekt sávátmenet: fonon csatolt. Nem csak energiamegmaradás, hanem impulzusmegmaradás is.
Energiaátadás a fononoknak – **melegedő kristályrács**

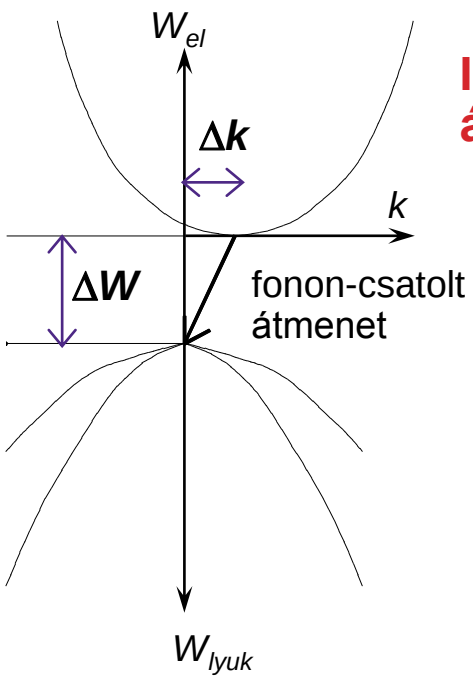
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fénykibocsájtás alapja: direkt sávátmenet

- **Sávszerkezet:** a megengedett energia szintek az impulzusvektor (*k*) függvényében

Direkt átmenet





Indirekt átmenet

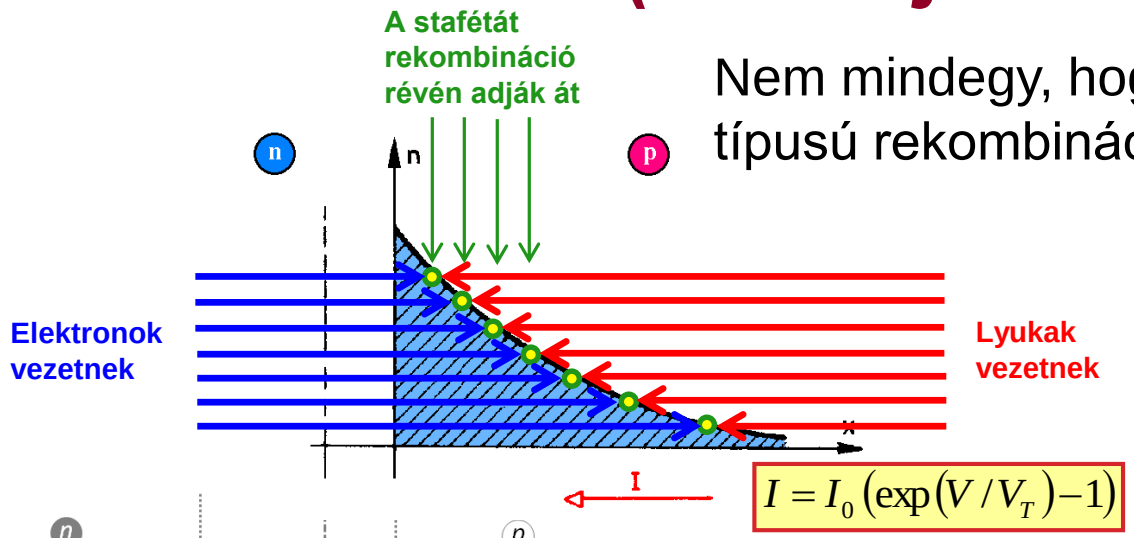
Fonon emisszió:
melegszik a kristályrács

Disszipáció

Foton emisszió:
$\Delta W = h \cdot \nu$ **Fénysugárzás**
hullámhosz: $\lambda = c/\nu$

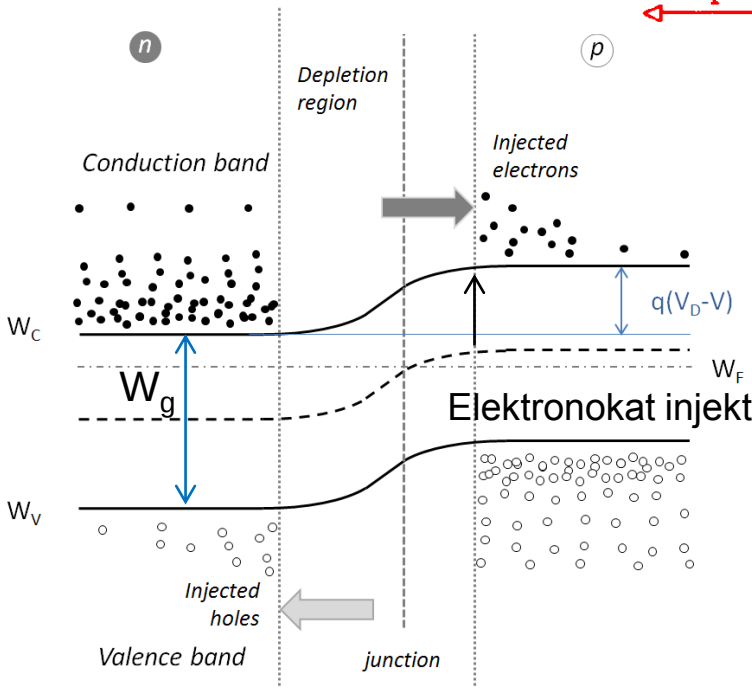
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Egyszerű PN átmenet (homo-junction)



$$I = I_0\left(\exp\left(V/V_T\right)-1\right)$$

Nem mindegy, hogy milyen típusú rekombináció történik…

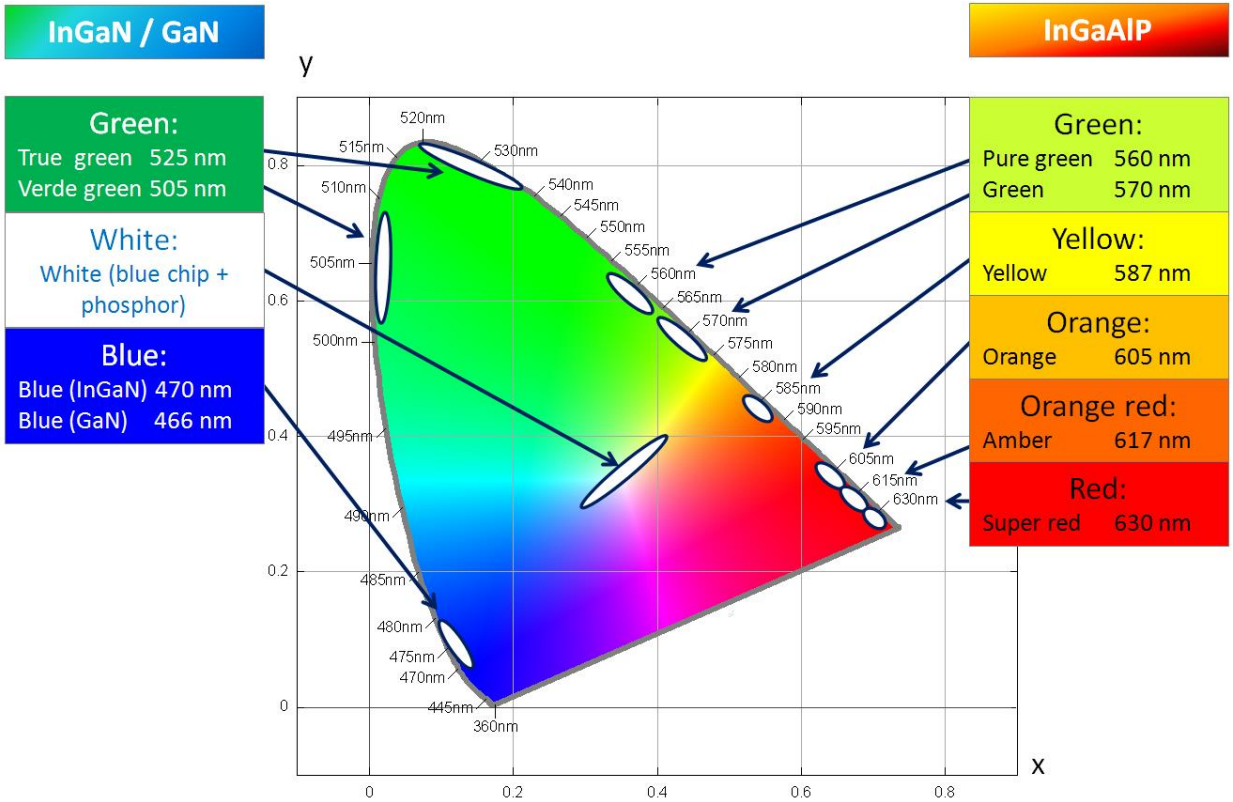


Elektronokat injektálunk a p-típusú anyagba

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Kétféle anyagrendszer

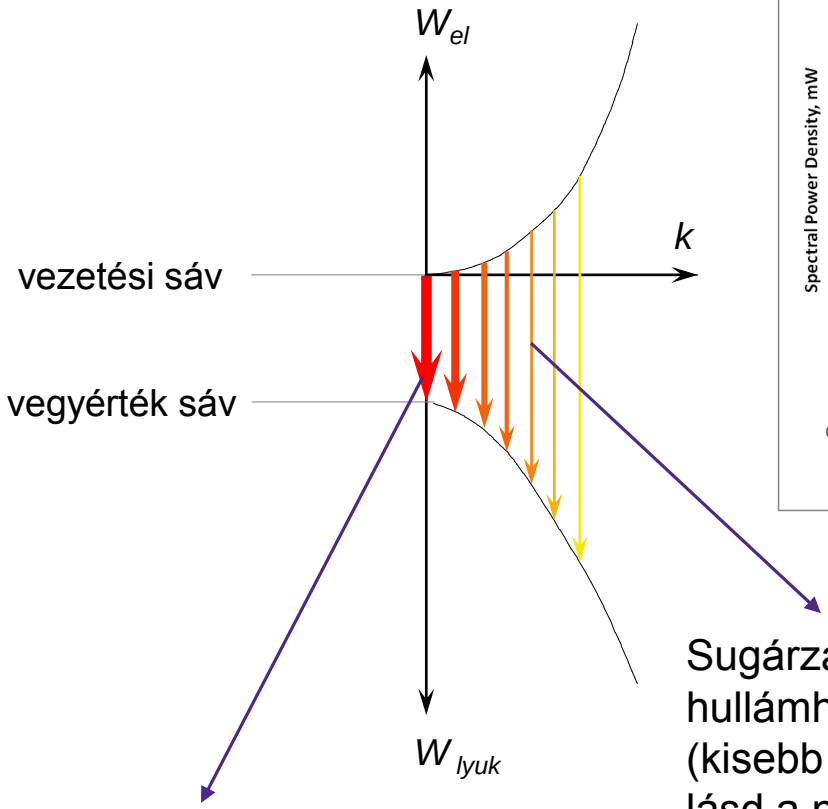
- Két anyagrendszert használnak. Az így elérhető színek:
  - A(z infra) vöröstől a sárgás zöldig (InGaAlP rendszer)
  - A(z ultra ibolyától)/kéktől a kékes zöldig (InGaN/GaN rendszer)
    - A ***green gap***: nincs igazán hatékony zöld LED
  - Fehér LED: kéken sugárzó LED chip + fénypor



Forrás: C. J. M. Lasance – A. Poppe (eds), Thermal Mamagement for LED Applications, 2. fejezet © Springer, 2014.

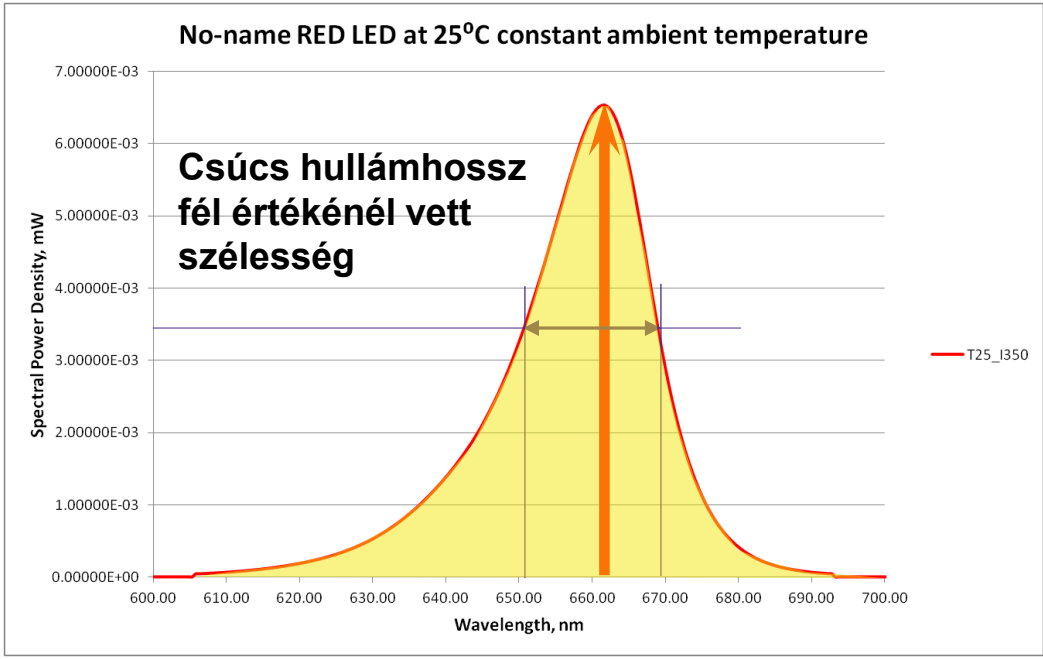
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Miért nem monokromatikus?



Csúcs hullámhossz

Sugárzás más hullámhosszakon (kisebb valószínűséggel: lásd a nyilak színét és vastagságát)

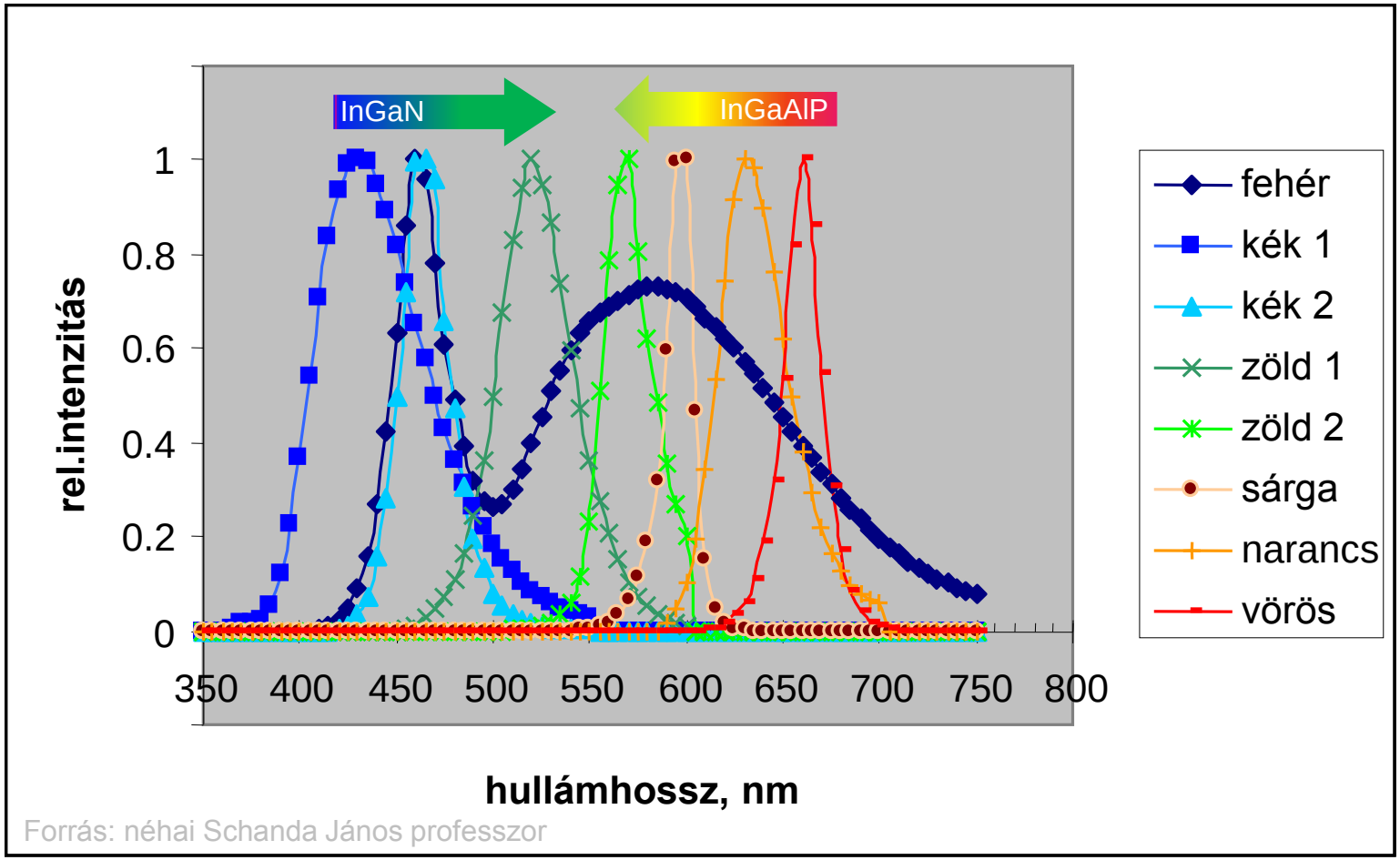


$$\Phi_e \approx \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda)d\lambda$$

Teljes emittált fényteljesítmény, vagy **radiometriai fluxus** vagy **optikai teljesítmény**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED spektrumok



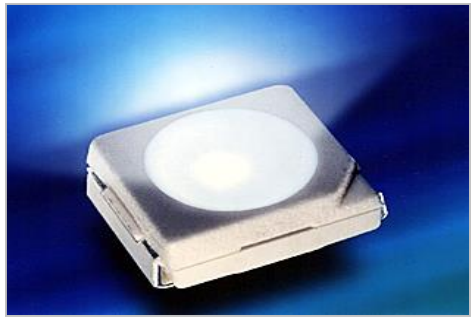
Forrás: néhai Schanda János professzor

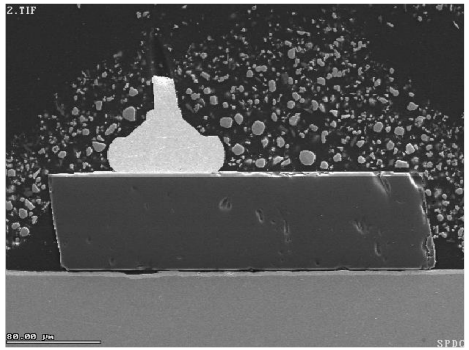
Fehér LED-ek: kék LED chip + fénypor

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

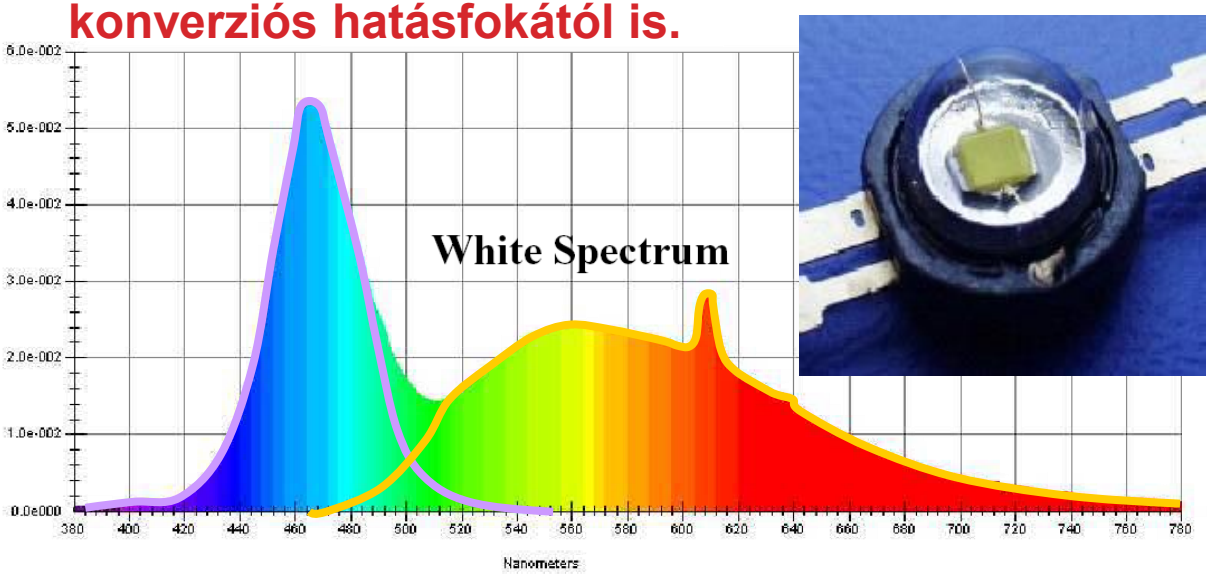
Fehér fény előállítása LED-del

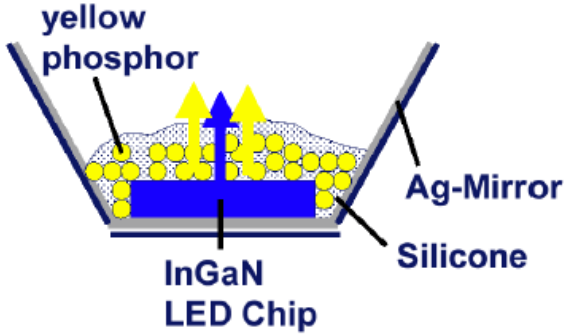
- Vörös + zöld + kék LED
  - RGB modul
- Kék-LED + fénypor
  - Fénypor felhordás új módozatai
  - Sárga vagy zöld + vörös fénypor
- UV-LED + fénypor





A hatásfok függ a fénypor (phosphor) konverziós hatásfokától is.

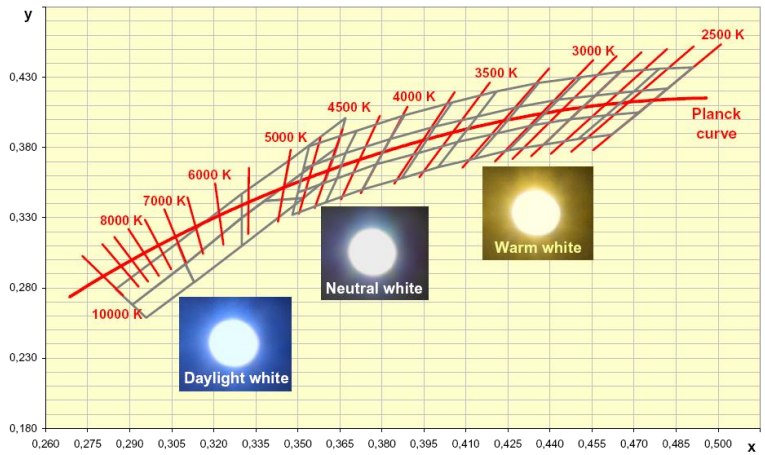


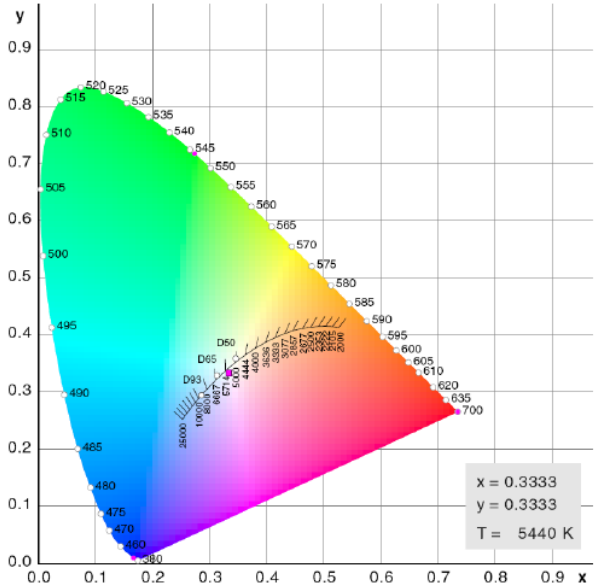


© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fehér fény problematikája

- Fényporos fehér LED-eknél:
  - Hideg/meleg fehér (kékes vagy sárgás)
  - Korrelált színhőmérséklet (ekvivalens fekete test sugárzó hőmérséklete)
  - Jó színvisszaadás ↔ jó fényhasznosítás

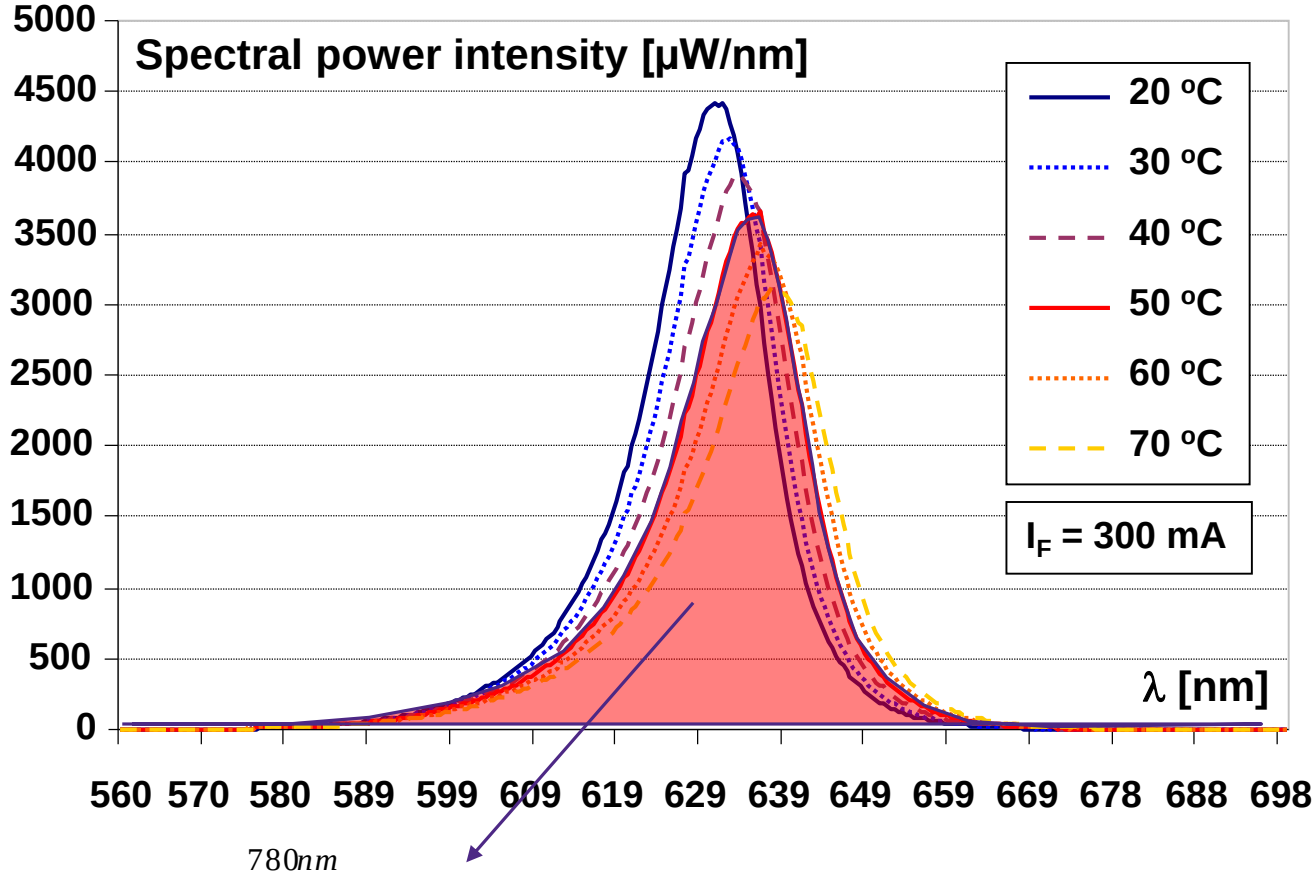




- RGB moduloknál:
  - hőmérsékletérzékenység ⇒ színvándorlás
  - **DE:** nem csak fehér, hanem tetszőleges szín kikeverhető (az RGB háromszögön belül)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED-ek energiakonverziós hatásfoka



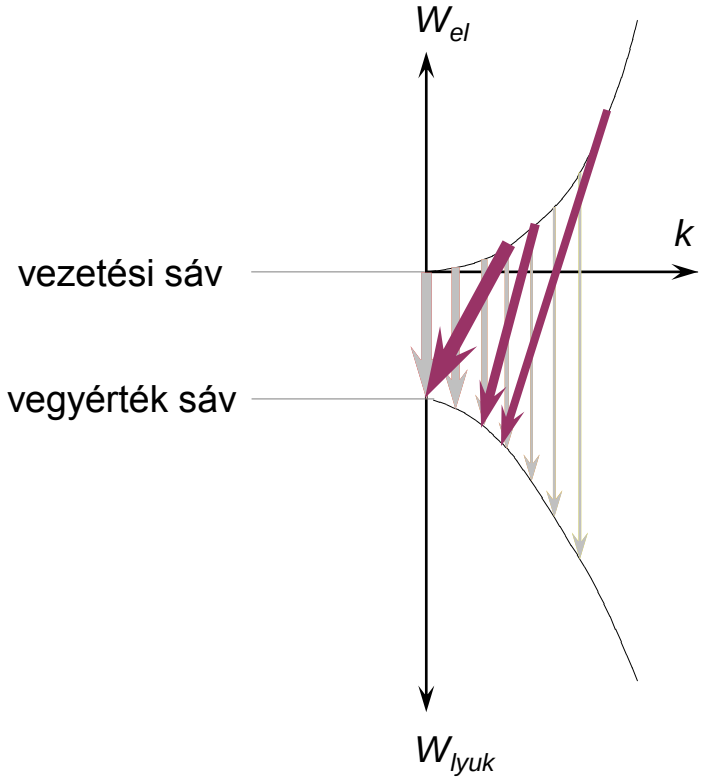
$$\Phi_e \approx \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda)d\lambda$$

Növekvő hőmérséklettel ez a terület csökken

és a csúcs hullámhossz szintén eltolódik

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Miért nem 100% fény?



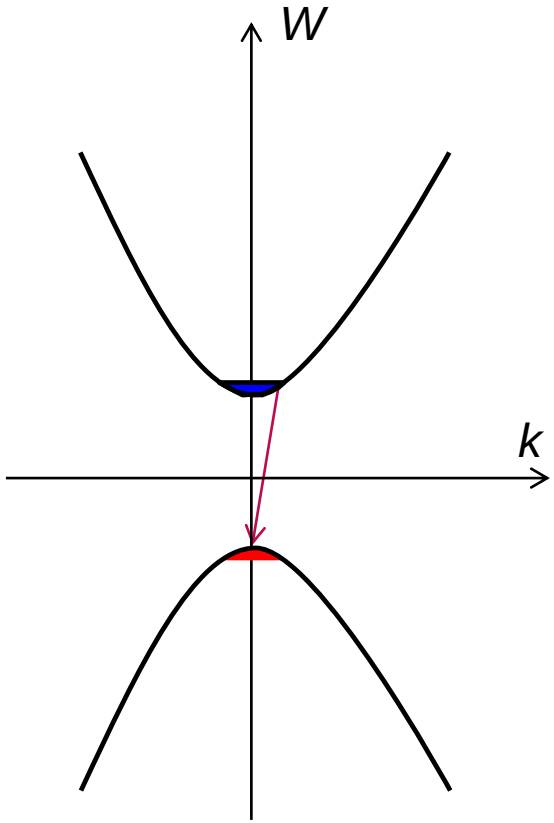
Radiatív rekombináció

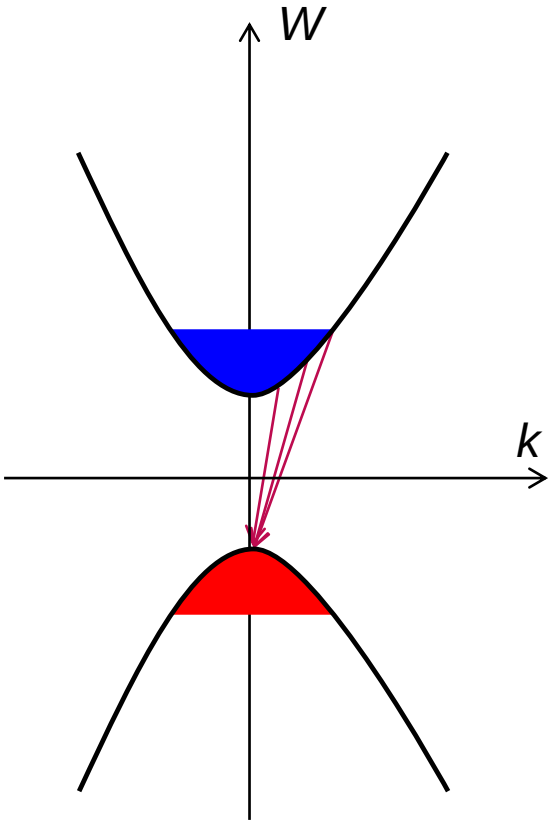
Sugárzással nem járó rekombináció

- indirekt állapotátmenet ➔ fonon emisszió
  ➔ kristályrács melegedése ➔ **disszipáció**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Miért romlik a hatékonyság nagy I_F-nél?





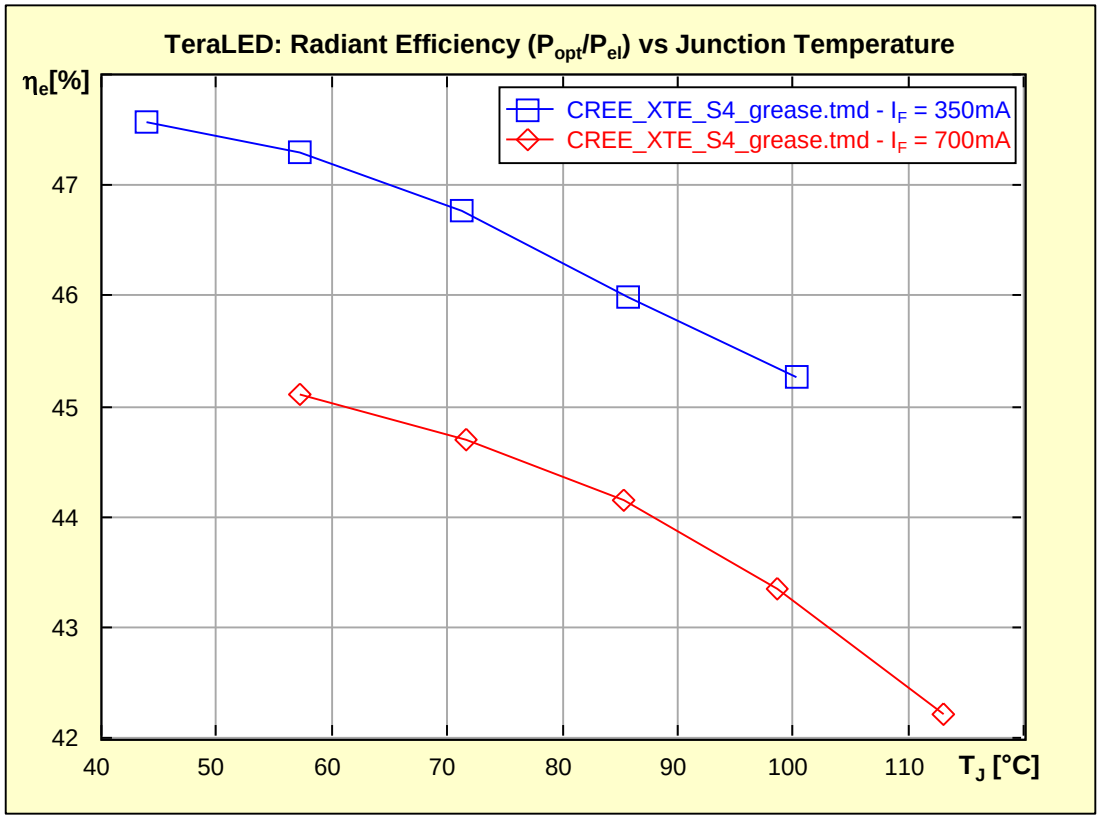
Kis nyitóáram: kisebb az indirekt sávátmenetnek valószínűsége

Nagy nyitóáram: nagyobb az indirekt sávátmenetnek valószínűsége

Ezen felül még további disszipáció van a soros ellenálláson is…

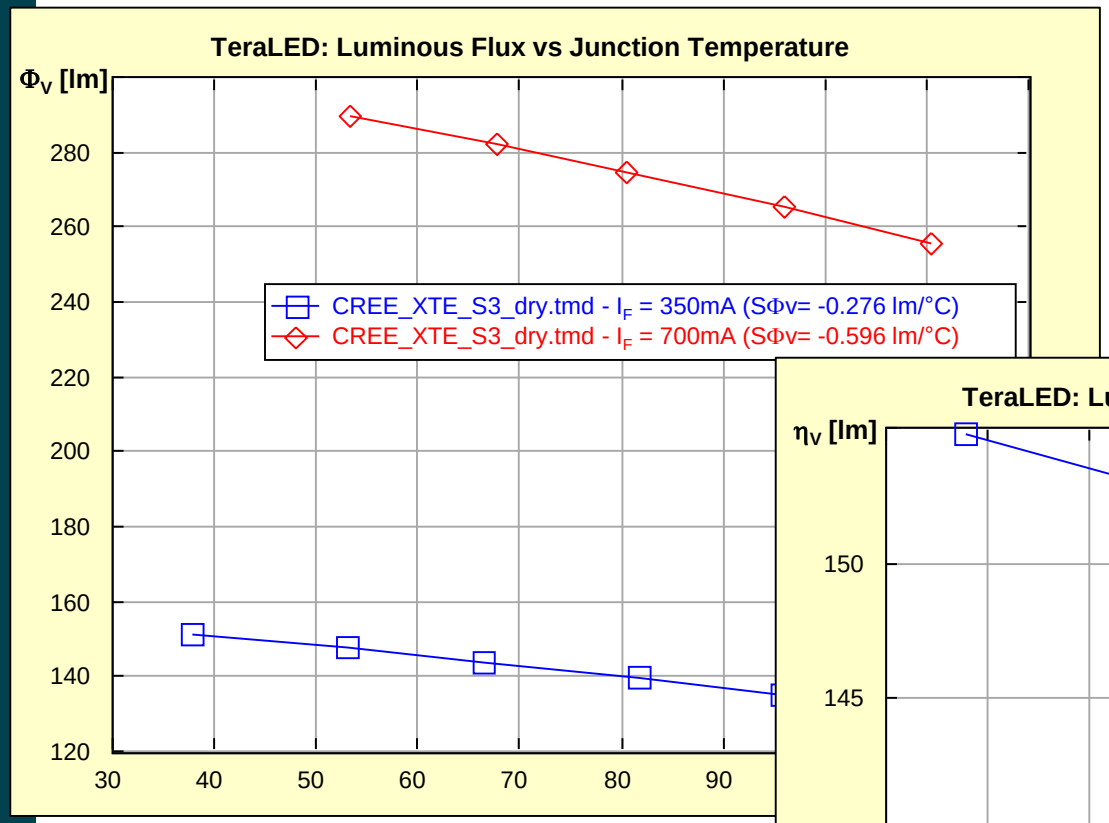
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

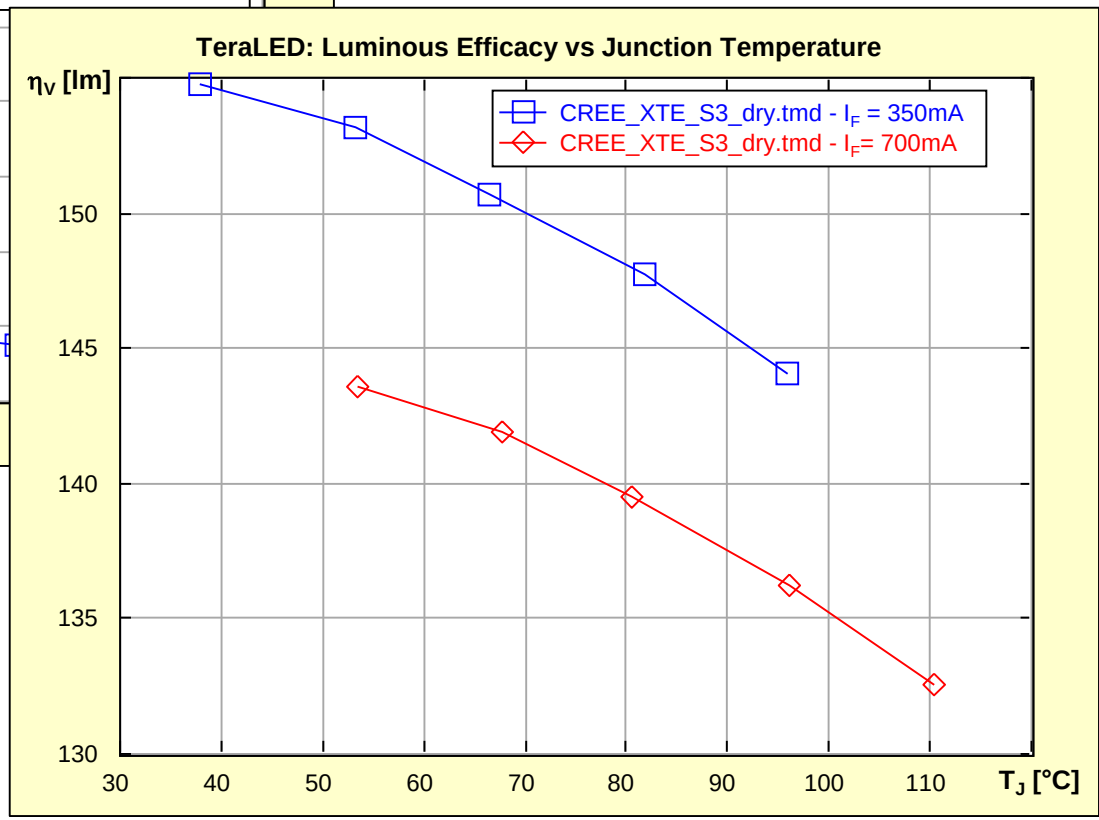
Energiakonverziós hatásfok: $\eta_e(I_F, T_J)$



© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fényáram: Φ_V (I_F, T_J), fényhaszn.: η_V(I_F, T_J)

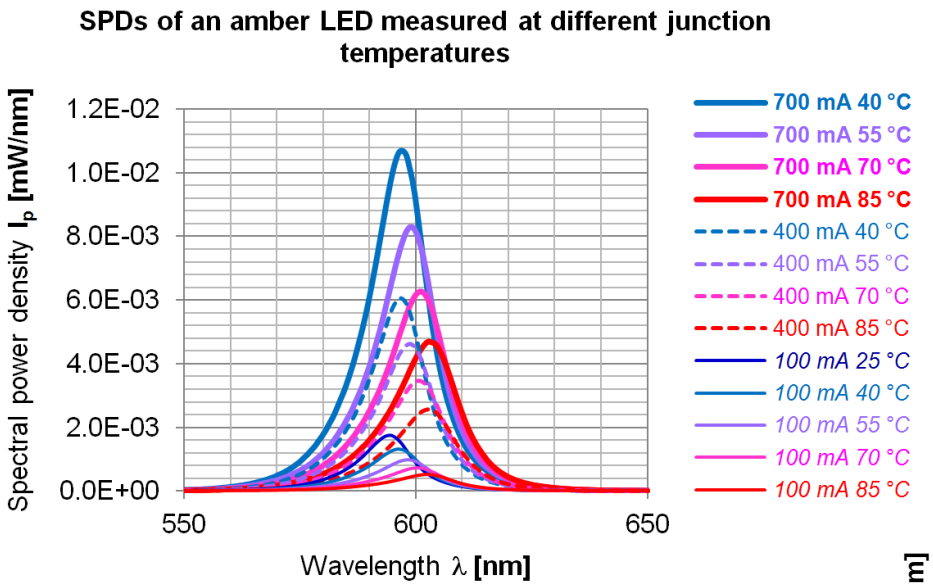


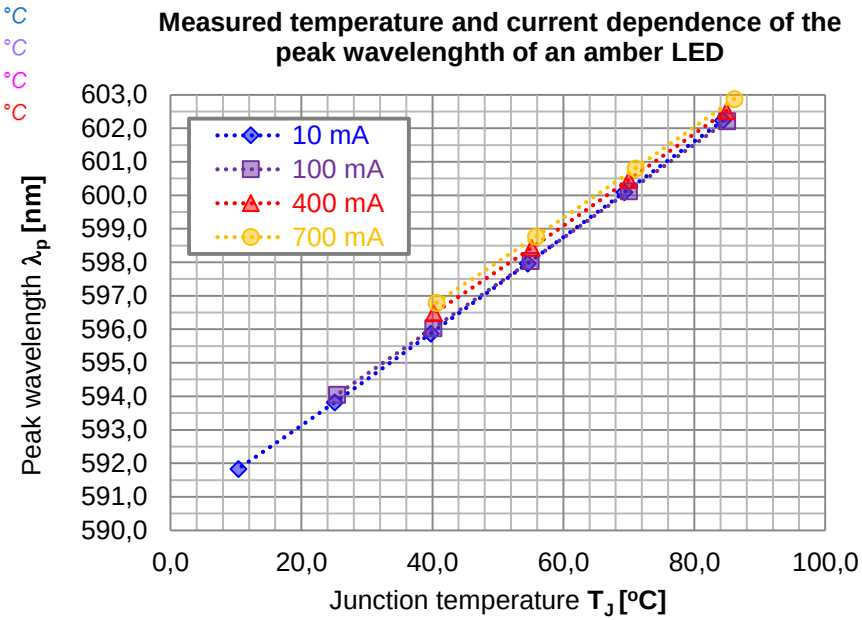


© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Hőmérsékletfüggés – csúcshullámhossz

- Csúcshullámhossz eltolódása





- Csökkenő W_g miatt:

$$W_g(T) = W_{g0} - \frac{\alpha \cdot T^2}{\beta + T}$$

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

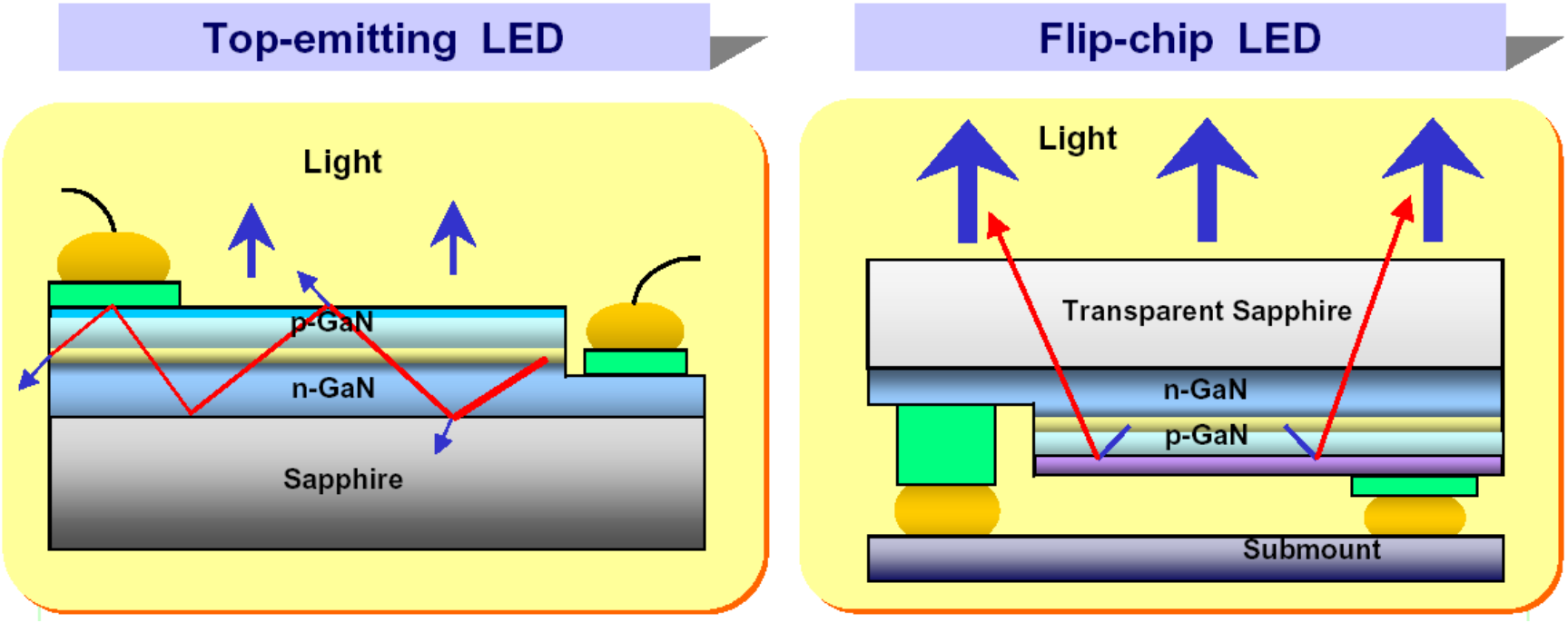
LED-ek hatásfokai

- ***Quantum efficiency*** (kvantumhatásfok)
  - Emittált fotonok száma viszonyítva az elektronok számához
  - *Fehér LED-nél még:* ***a fénypor konverziós hatásfoka***
- ***Extraction efficiency*** (kicsatolási hatásfok)
  - hogy aránylik a külvilágba kijutó fotonok száma a LED aktív régiójában generált fotonok számához
- ***Power efficiency / wall-plug efficiency – WPE / radiant efficiency*** η_e (energiakonverziós hatásfok)
  - hogy aránylik a kisugárzott fényteljesítmény (teljes radiometriai fluxus, *total radiant flux*) a betáplált elektromos teljesítményhez, ($P_{opt} / P_{el} = \Phi_e / P_{el}$)
- ***Efficacy / luminous efficiency*** η_V (fényhasznosítás)
  - hogy aránylik az emittált fényáram a betáplált elektromos teljesítményhez

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A kicsatolási hatásfok

- A fénykicsatolás hatásfoka a konstrukciótól függ:



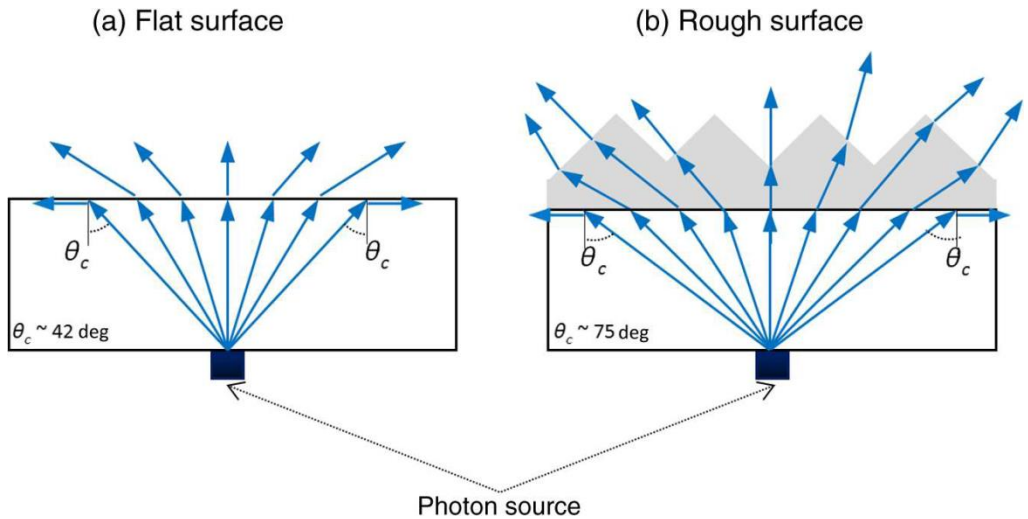
Lumileds

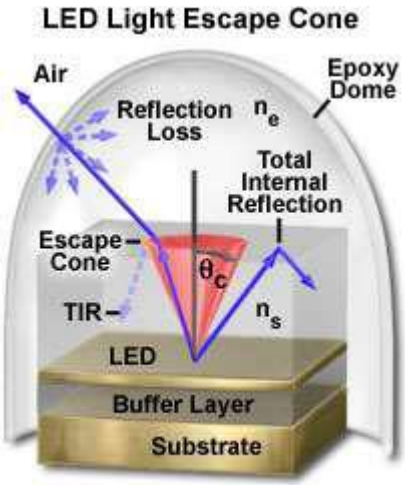
- Sokféle reflexió;
  - felületek texturálása
  - alkalmas chip geometria

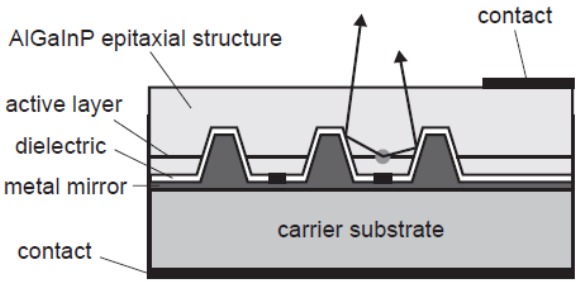
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fénykicsatolás javítása

► Az egyik fő gond: a belső *teljes reflexió*







- Lehetséges javítás LED chip szinten
  - a felület texturálása
  - belső tükrök, textúrált felületek
  - alkalmas chip geometria (pl. csonka gúla)
- LED tok optika szinten
  - Lehetséges javítás: távoli fénypor réteg (*remote phosphor*), ami egyben diffúzor is lehet

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Mi az optikai teljesítmény és a fényáram?

- **Optikai teljesítmény** (*radiant flux; radiometriai fluxus*) [W]:

  Egy fényforrás által egységnyi idő alatt (látható) elektromágneses hullámok formájában kisugárzott energia.

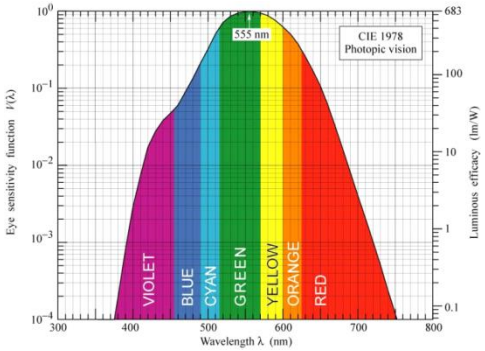
$$\Phi_e = \int S(\lambda) d\lambda$$

  A kibocsájtott fényt *energetikailag* értékeljük → *e* index, **radiometria**

- **Fényáram** (*luminous flux, Lichtstrom*) [lm = cd·sr]:

  Egy fényforrás által a látható tartományba eső elektromágneses hullámok formájában időegység alatt kibocsájtott energia az átlagos emberi szem *fotopos* spektrális érzékenységével súlyozva

$$\Phi_V = K_m \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$



  - A kibocsájtott fényt *vizuálisan* értékeljük → *V* index, **fotometria**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fényhasznosítás (efficacy) *performance metric*

- *Egy fényforrás energiahatékonyságának a mértéke*
- Jele, definíciója: $\eta_V = \Phi_V / P_{el}$
  - CIE ILV 17-729: **luminous efficacy (of a source)**
    - *quotient of the luminous flux emitted by the power consumed by the source*
  - Egységnyi betáplált villamos teljesítményből mennyi látható fény keletkezik

    http://eilv.cie.co.at/term/729
  - **Hogy értelmezhető ez nem villamos fényforrásra?**
    - Sehogy.
  - Helyette: sugárzás fényhasznosítása: $K = \Phi_V / \Phi_e$

    CIE ILV 17-730: **luminous efficacy (of radiation)**
    - *quotient of the luminous flux, Φ_v, by the corresponding radiant flux, Φ_e*

    http://eilv.cie.co.at/term/730

- A két mennyiség kapcsolata: $\eta_V = K \cdot \eta_e$, ahol η_e az ***energiakonverziós hatásfok***: $\eta_e = \Phi_e / P_{el}$.

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fényhasznosítás (folytatás)

- Van-e a fényhasznosításnak elvi maximuma?
  - Igen, mert K-nak maximuma van: K_m = 683 lm/W
  - Ez a V(λ) függvény definíciójából következik
    - Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Comission Internationale d'Éclairage, CIE) szabványosította a V(λ) görbét (világosban, fotopos látás)

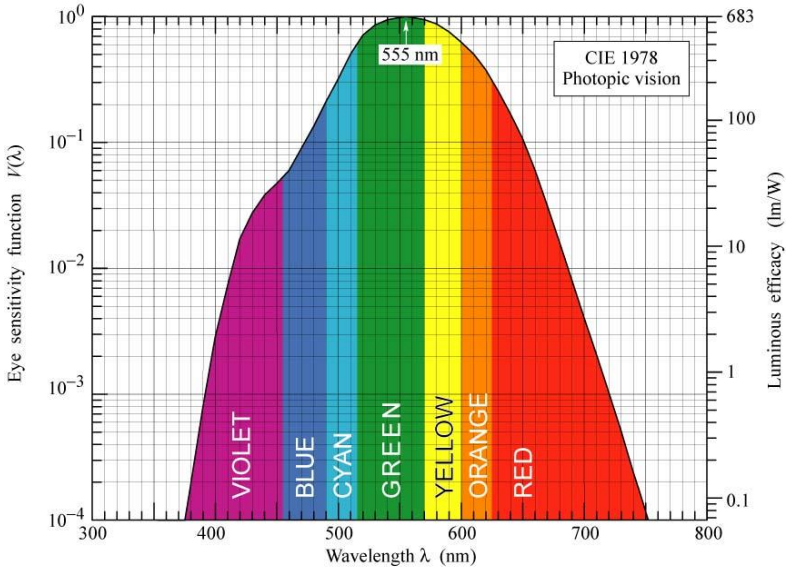


Fig. 16.7. Eye sensitivity function, $V(\lambda)$, (left ordinate) and luminous efficacy, measured in lumens per Watt of optical power (right ordinate). $V(\lambda)$ is greatest at 555 nm. Also given is a polynomial approximation for $V(\lambda)$ (after 1978 CIE data).

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

    - Ha egy 555 nm-en sugárzó (zöld) monokromatikus fényforrás kisugárzott optikai teljesítménye 1 W, akkor a fényárama 683 lm

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fényhasznosítás (folytatás)

- Az 555-nm-es monokromatikus sugárzóra η_V = 683 lm/W csak úgy lehet, ha az energiakonverziós hatásfoka 100%, azaz ha η_e = 1.
  - A gyakorlatban η_e = 1 sosem lehetséges
- A fényhasznosítás a fényforrás S(λ) spektrális teljesítményeloszlásától függ:

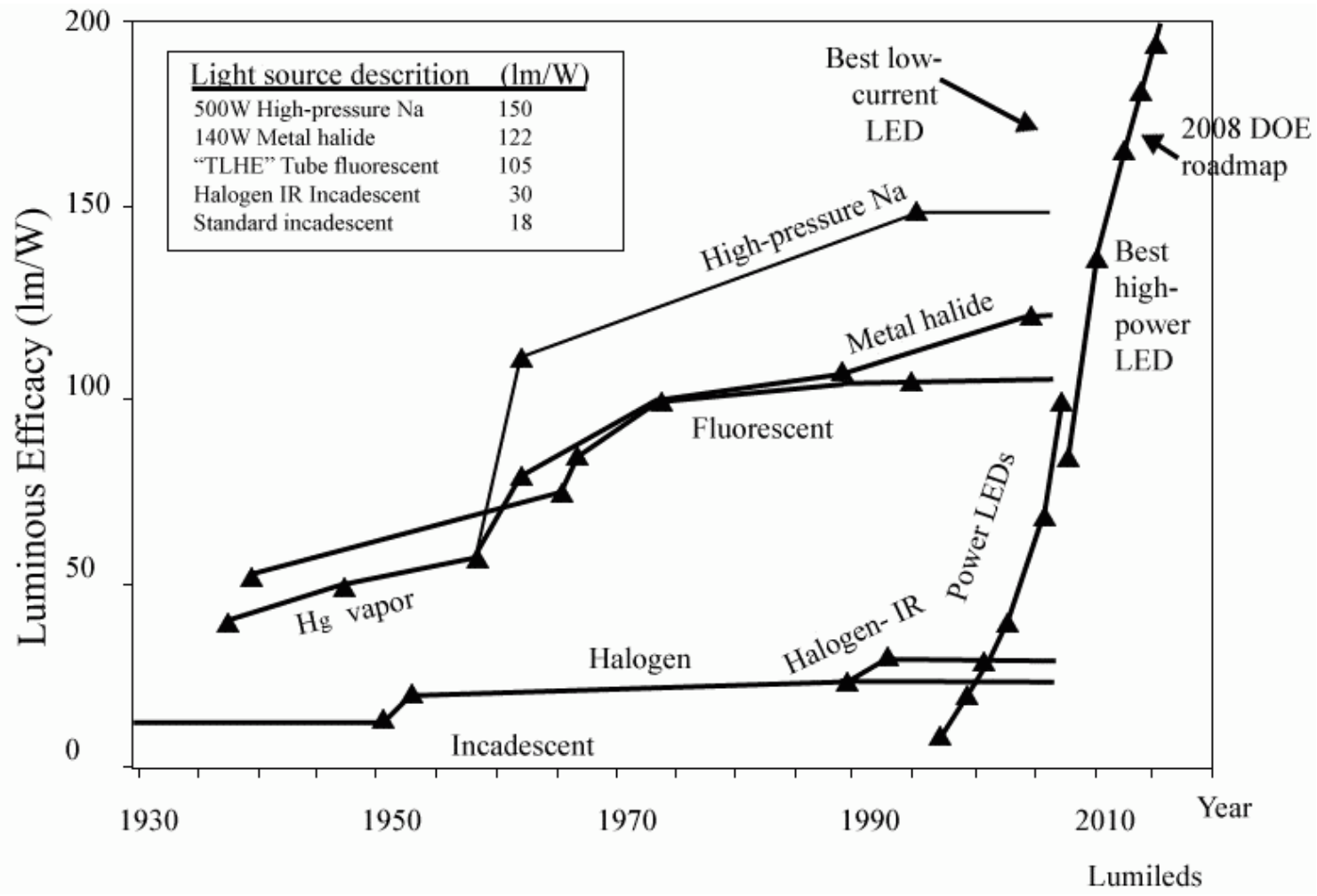
$$K = \frac{\Phi_V}{\Phi_e} = \frac{K_m \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda)\cdot V(\lambda)d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} S(\lambda)d\lambda}$$

$$\eta_V = K\cdot\eta_e = \frac{\Phi_V}{\Phi_e}\cdot\frac{\Phi_e}{P_{el}} = \frac{K_m \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda)\cdot V(\lambda)d\lambda}{P_{el}}$$

  - Minél “szélesebb” a spektrum, annál kisebb lesz η_V
  - Minél nagyobb rész esik a spektrumból V(λ) közepe tájára, annál nagyobb lesz η_V
- Mai LED-eknél: 200 lm/W .. 300 lm/W körül jár η_V

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Fényhasznosítás – történeti trendek



A Lumileds 2008-as közlése szerint

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Mai LED fényhasznosítás értékek

- Egy marketing és műszaki sikertörténet:

- **<u>Kérdés mindig</u>:** tokozatlan LED chip vagy teljes LED-es világítási rendszer fényhasznosításáról van-e szó?
  - Meghajtó elektronika vesztesége (pl. 95%-os hatásfok)
  - Optikai veszteségek (pl. 95%-os hatásfok)
  - Összesen: max. 90.25% rendszerhatásfok, 303 lm/W helyett csak 273 lm/W
- Ha valaki 700 lm/W-ot emleget, kezdjünk el gyanakodni!

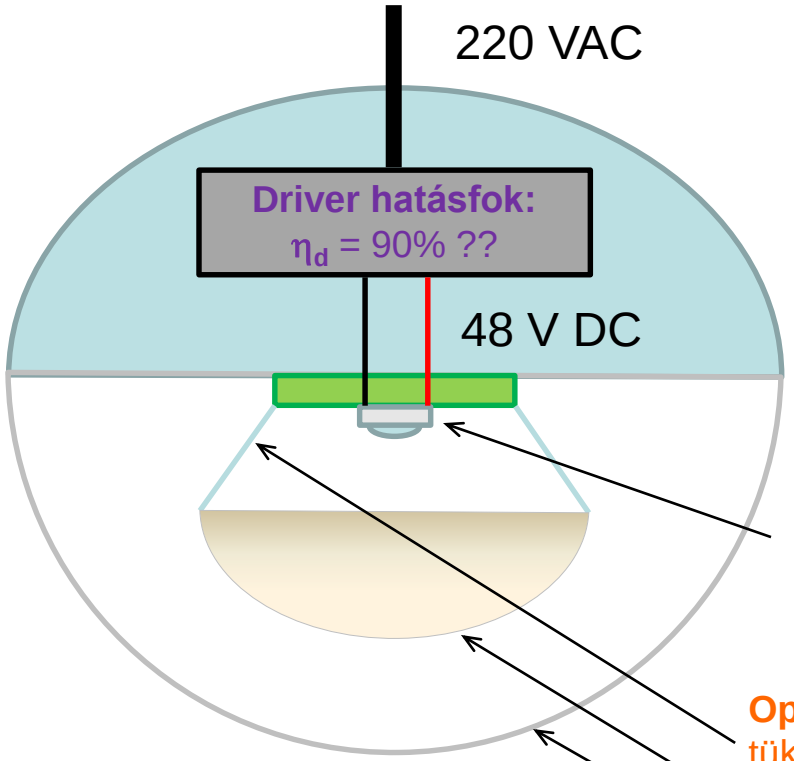
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Mi mennyi?

- LED adatlapi információ: I_F = 350 mA / T_J = 20 °C-ra
  - A hőmérsékletfüggést nem nagyon adják meg
- Valóságban: I_F = 700 mA / T_J = 120 °C
- Mit adnak meg a lámpatestre?

η_{vLED} = **100 lm/W**
η_{eLED} = 30%

η_{vLED} = ??
η_{eLED} = ??



Rendszer hatásfok: $\eta_d \cdot \eta_{eLED} \cdot \eta_o$ = 24.3%

Nettó (lámpatest) fényhasznosítás:

$\eta_d \cdot \eta_{VLED} \cdot \eta_o$ = **81 lm/W**

És bemelegedve? 10%-kal kevesebb fény:

$\eta_d \cdot \eta_{eLED} \cdot \eta_o$ = 22%

Nettó (lámpatest) üzemi fényhasznosítás:

$\eta_d \cdot \eta_{VLED} \cdot \eta_o$ = **73 lm/W**

LED-ek adatlapi hideg fényáram / hatásfok adatok (350mA)

η_{vLED} = **100 lm/W**
η_{eLED} = 30%

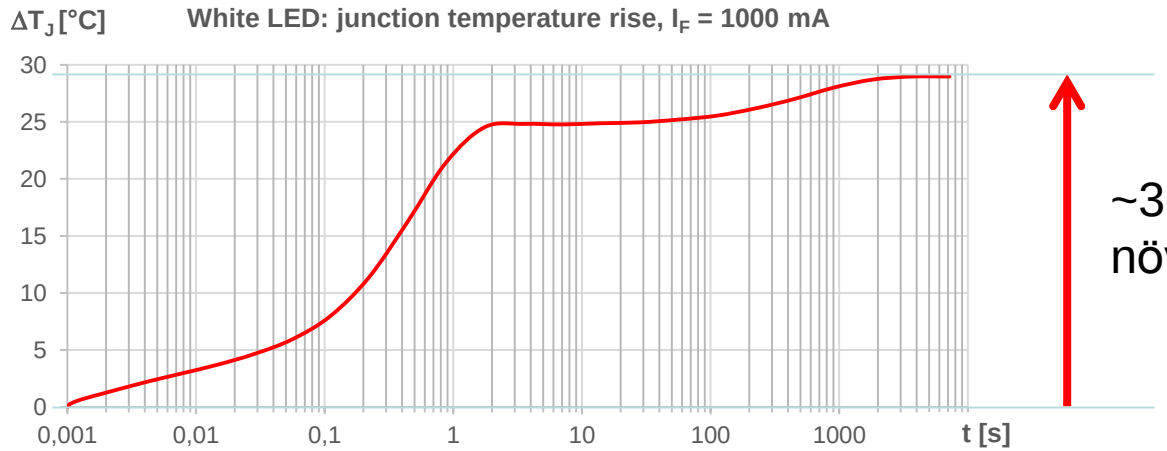
Optika: optikai hatásfok η_o = 90% ??
tükrök,
lencsék,
búra

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A fénykibocsájtás a bekapcsolás után:

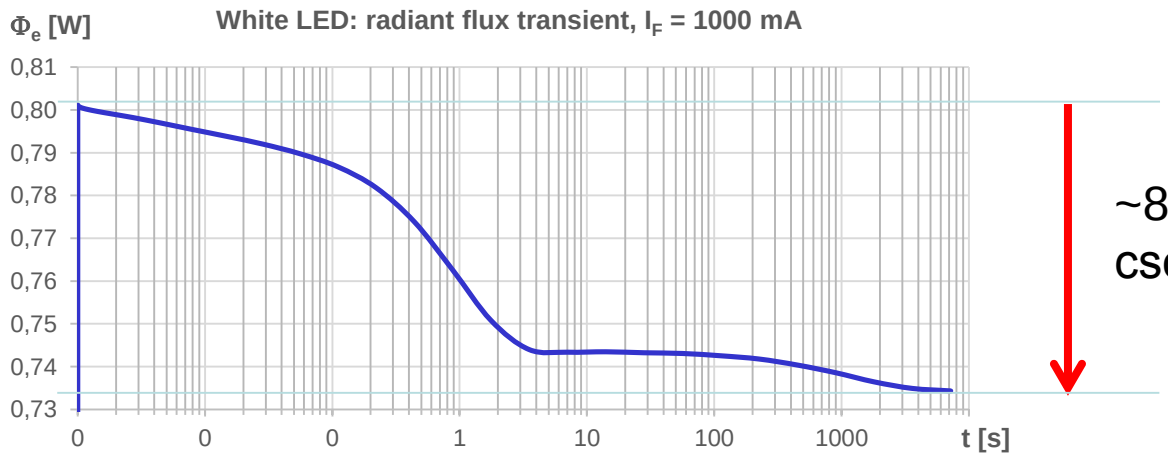
Rendszerszintű szimulációval számított tranziensek (BME, 2016)

Hőmérséklet



~30 °C
növekedés

Kibocsájtott optikai teljesítmény / fényáram

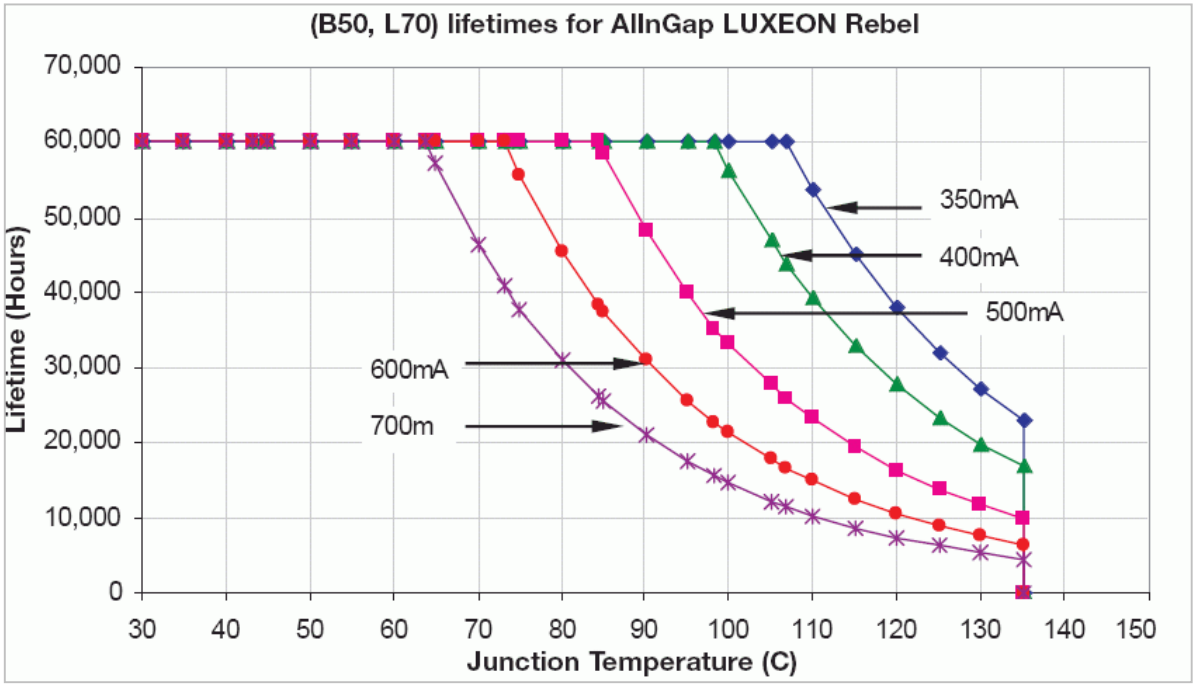


~8%
csökkenés

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Miért fontos a jó hűtés?

- **Kibocsájtott fény jellemzői erősen hőmérsékletfüggőek**:
  - spektrális teljesítményeloszlás (csúcs hullmhossz, szélesség)
  - teljes fluxus (fényáram), energiakomverziós hatásfok, fényhasznosítás
- **A LED-ek megbízhatósága, élettartama is erősen függ a hőmérséklettől**:
  - élettartam (termikusan asszisztált meghibásodási mechanizmusok)
  - termo-mechanikai feszültségek ⇒ delaminálódó kötések / határfelületek



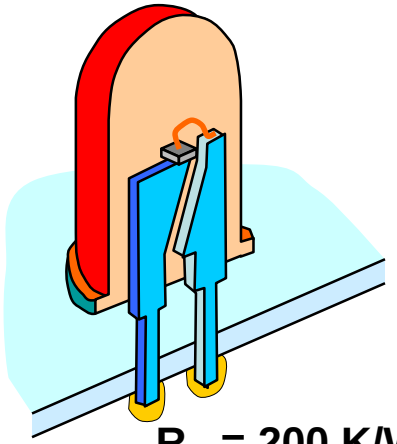
Forrás: Philips Lumileds, Rebel Reliability Data, 2007

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Toktípusok

Radial LED

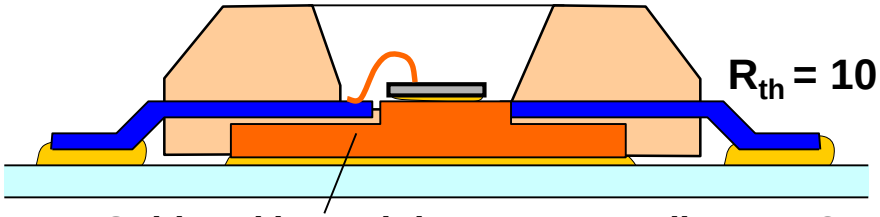
Chip 250 x 250 µm



R_{th} = 200 K/W

High Power LED

Chip 700 x 700 µm



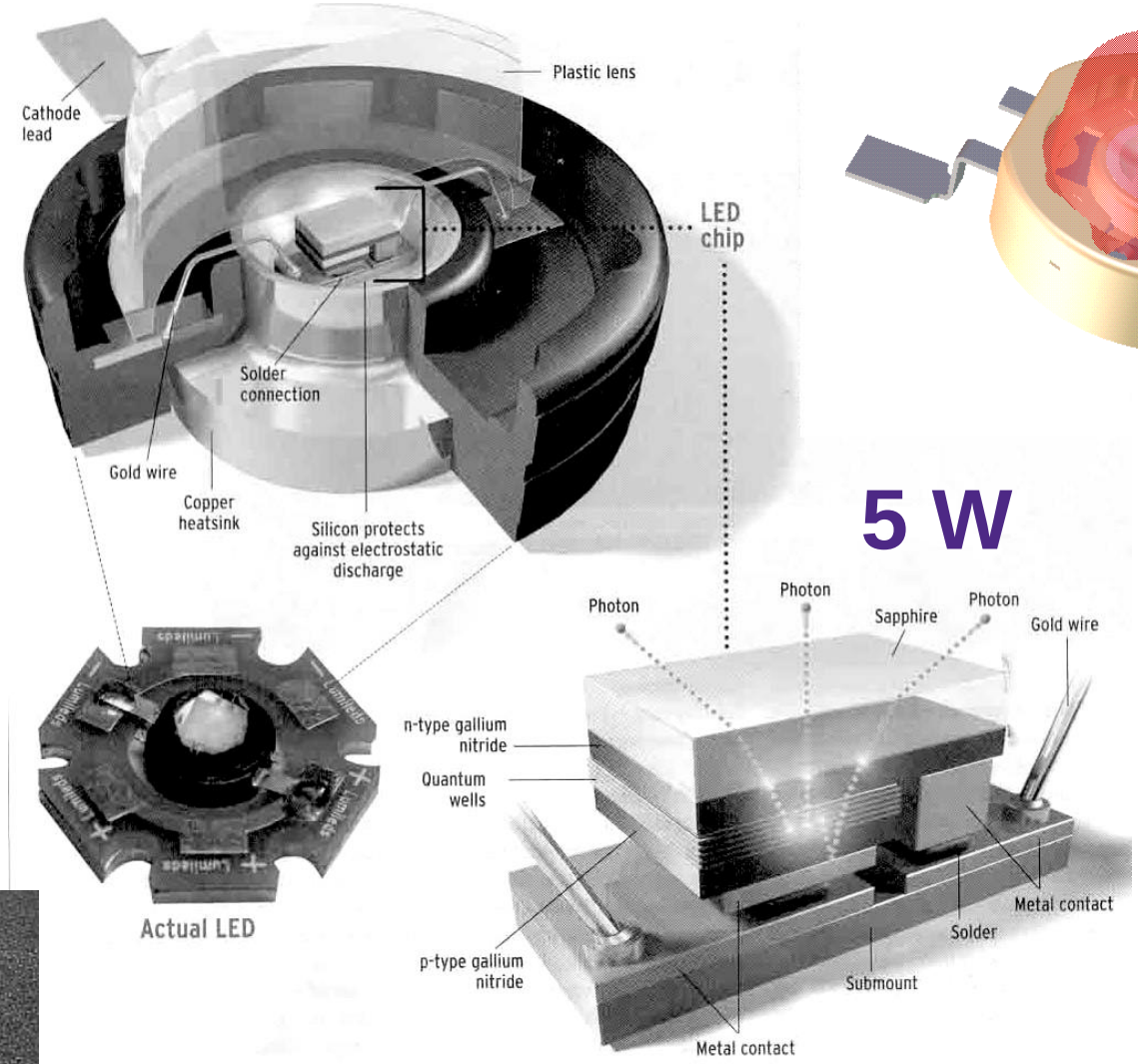
R_{th} = 10 K/W

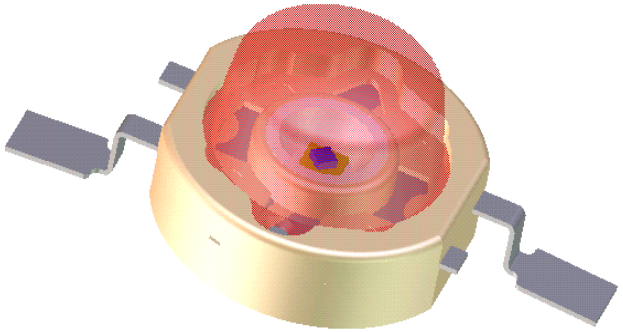
Soldered heat sink

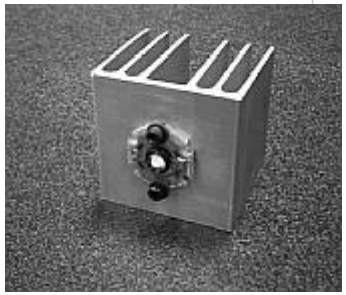
Metall core PCB

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Az első nagyteljesítményű LED-ek





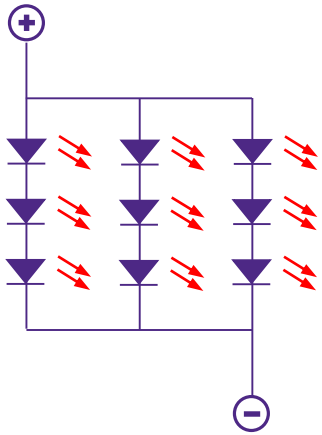


Lumileds

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Legújabb tokozási trendek: CoB

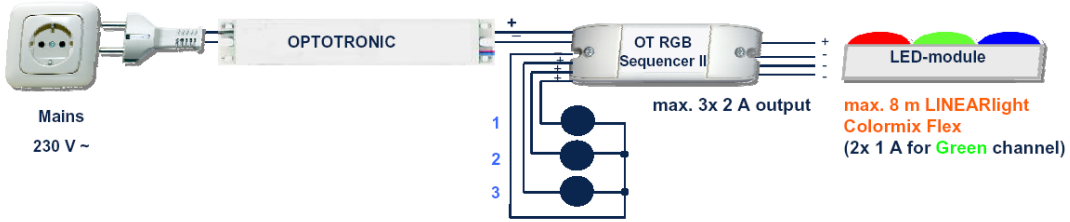
- Több chip-es tokok CoB (chip on board)
  - Kerámia hordozóra közvetlenül szerelt lapkák
  - Soros-párhuzamos
    - Nem lehet V_F szórás
    - Termikusan jól tervezett elhelyezés
  - Fénypor közvetlenül felvíve
  - **Kis hőellenállás:** $R_{th} < 1$ K/W
  - Nagy teljesítmény (pl. P_{el}: ~150 W , Φ_V: ~8000 lm, R_{th} = ~ 0.25 K/W)
  - HID-ek kiváltása – nagyon nagy disszipációsűrűség, extrém hűtés!

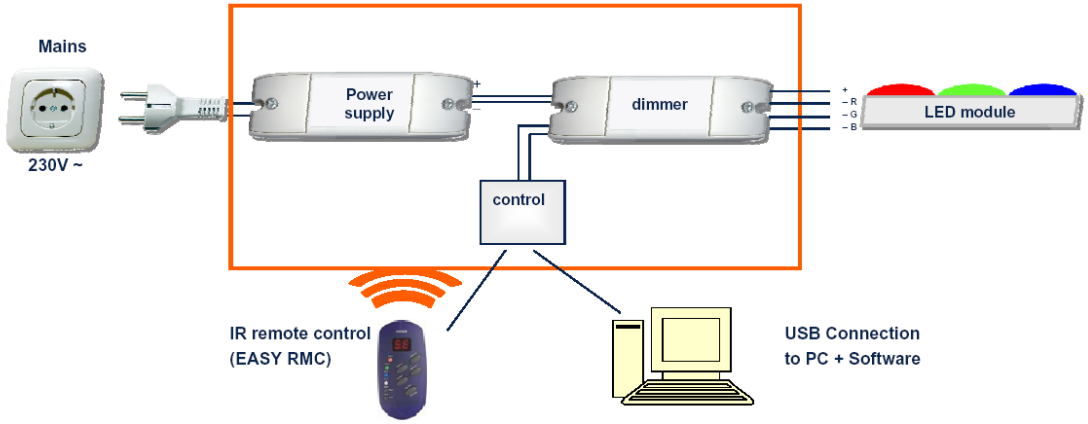


© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED-ek elektromos környezete

- Példák, jellegzetes összetevőkkel:



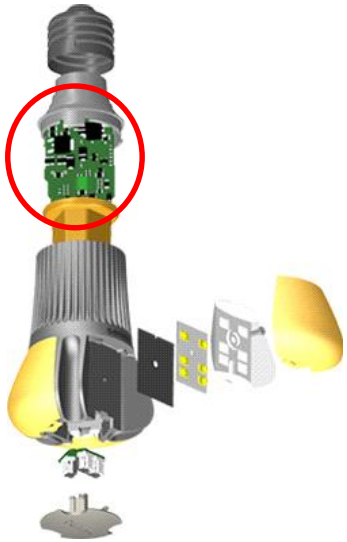


- A jellegzetes összetevők
  - tápegység (pl. AC bemenet, DC kimenet)
  - fényerőszabályzó egység
  - kommunikációs egység
  - LED / LED modul

Forrás: OSRAM – LED Light For You oktatási anyag, 2006 (Electrical basics for LED)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED-ek elektromos környezete



- A jellegzetes összetevők
  - tápegység (AC bemenet, DC kimenet)
  - fényerőszabályzó egység
  - kommunikációs egység
    - fizikai réteg?
    - protokoll?
  - LED / LED modul
- Retrofit LED lámpáknál ezek a lámpákba be vannak építve
- LED-es világítótest: külön egység

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

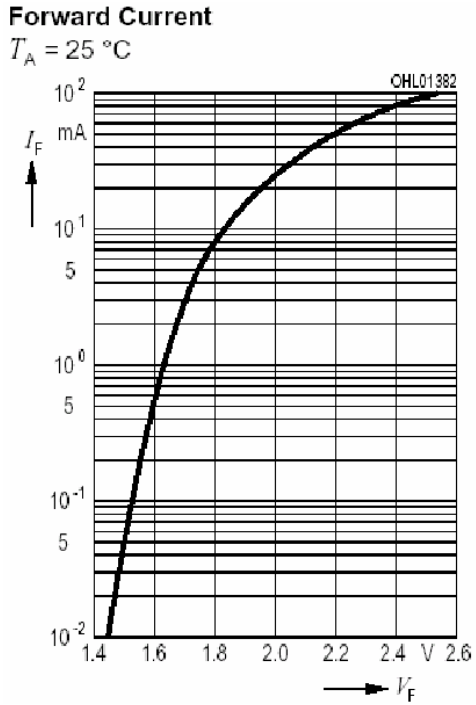
MUNKAPONT BEÁLLÍTÁS, ALAPVETŐ LED KONFIGURÁCIÓK

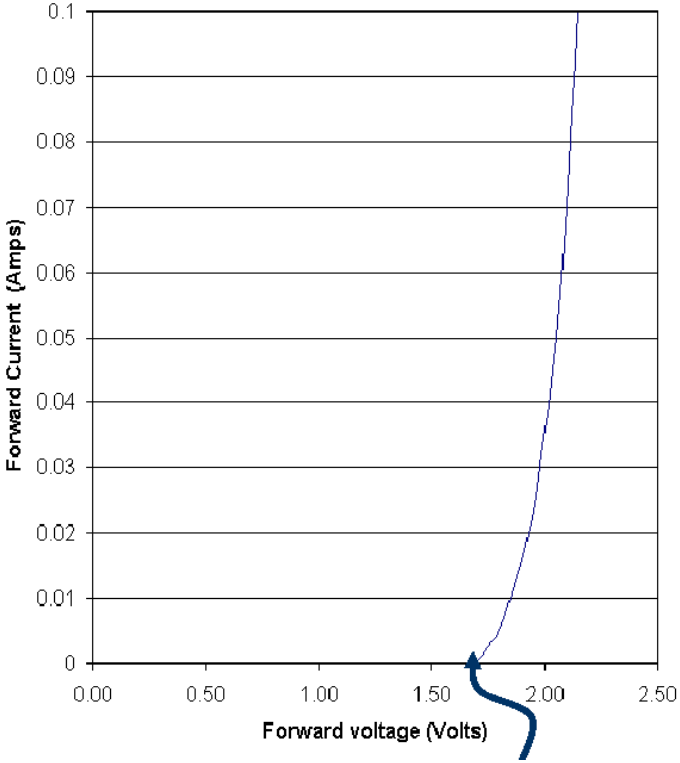
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED karakterisztikák

- Elektromos, termikus, fotometriai
- A LED-ek is csak diódák...

Szokásos adatlapi karakterisztika:





Nemlineáris eszközkarakterisztika

Munkaponti áramot (kívülről) korlátozni kell

Tipikus az áramgenerátoros táplálás

Minden fontos jellemző (pl. fényesség, szín) függ az áramtól

Nyitó feszültség: ahol már nagy áram folyik

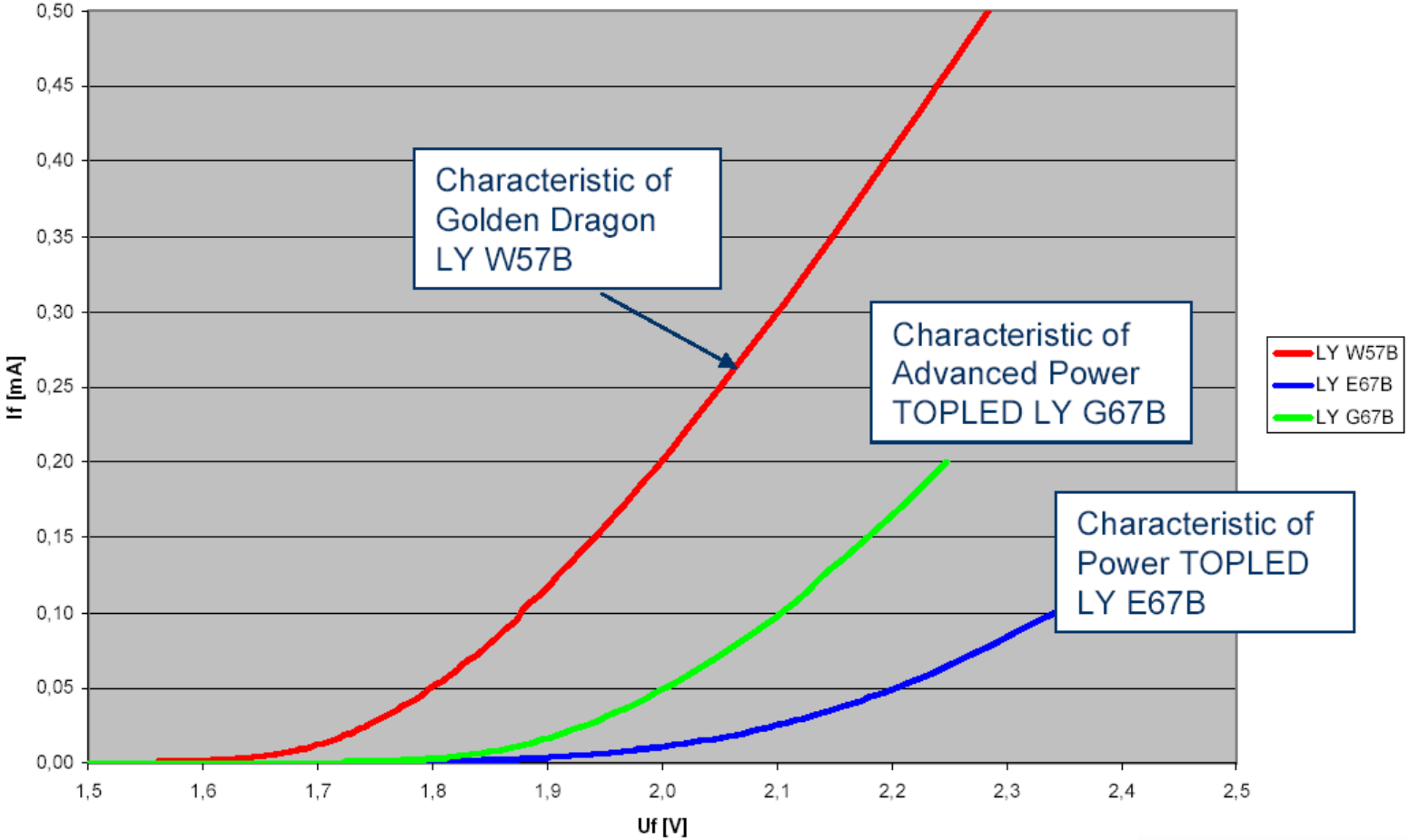
1.5 V...3.5 V 1 mA...700 mA (szín, típus, gyártó)

Forrás: OSRAM – LED Light For You oktatási anyag, 2006 (Electrical basics for LED)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED karakterisztikák

- Elektromos pl. néhány Osram R, G, B LED nyitó karakterisztikáia

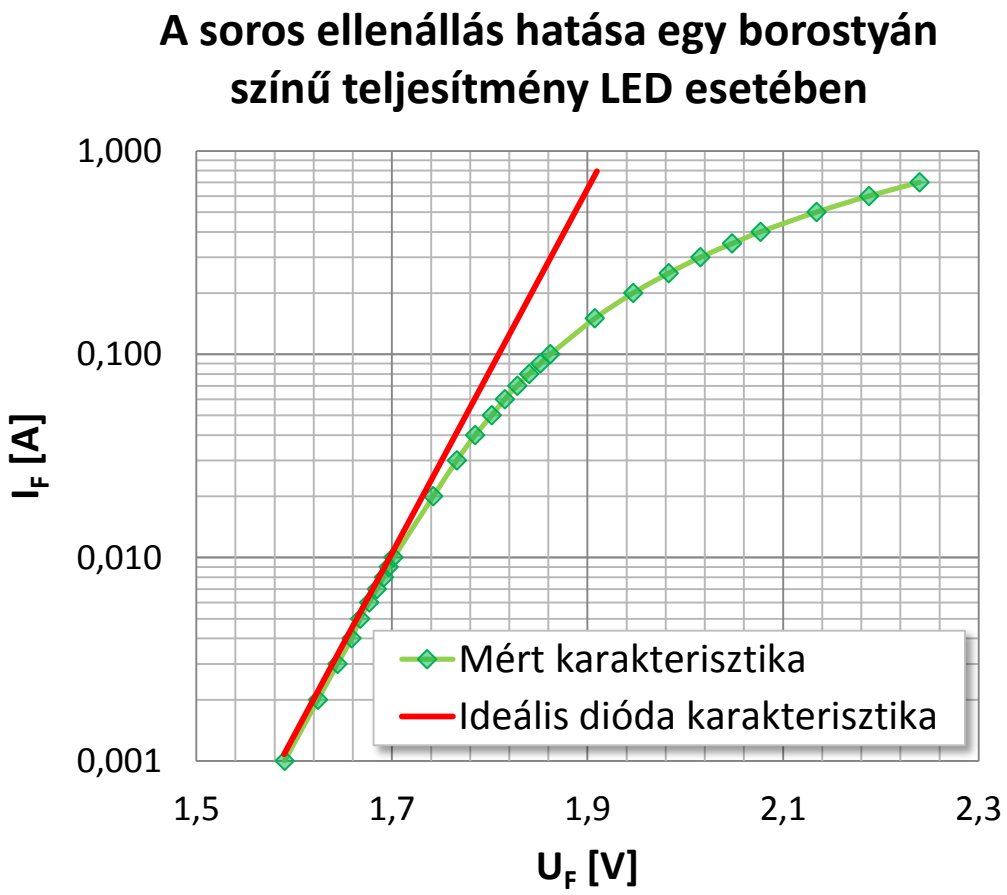


Forrás: OSRAM – LED Light For You oktatási anyag, 2006 (Electrical basics for LED)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Ideális és valós LED karakterisztika

- A LED soros ellenállása dominál a 100 mA ... 1000 mA nyitóáram tartományban:



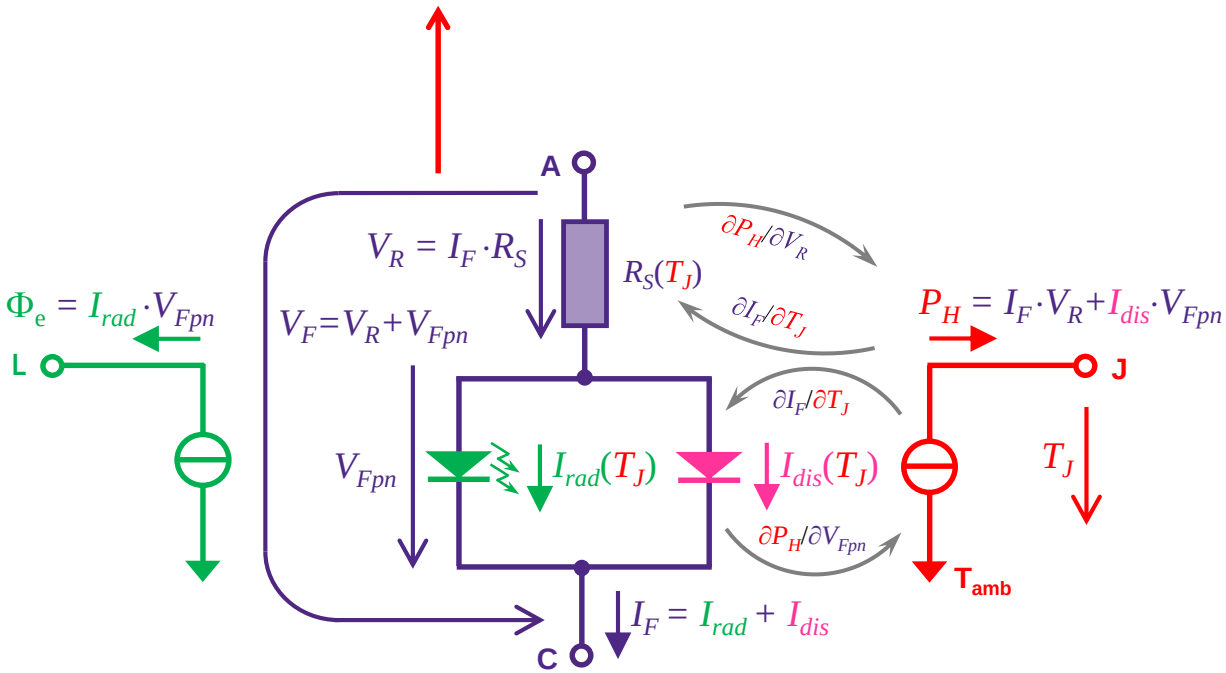
- Ez mit jelent számunkra a gyakorlatban?

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Valós LED karakterisztika – R_S hatása

- A soros ellenállás disszipációja a nyitóáram négyzetével arányos:

$$P_H = I_F \cdot V_R + I_{dis} \cdot V_{Fpn} = \boldsymbol{I_F^2 \cdot R_S} + I_{dis} \cdot V_{Fpn}$$

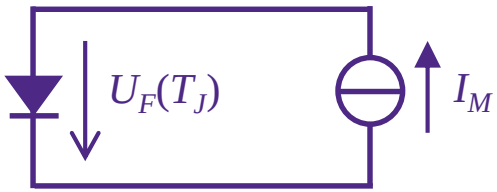


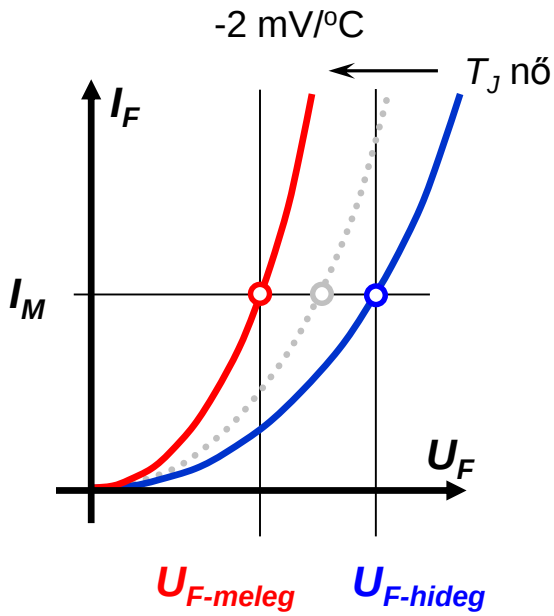
- A LED belső pn átmenetében a hőtermelés a nyitóáramtól sokkal enyhébben függ

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Alapkapcsolás: áramgenerátoros

- A nyitófeszültség a hőmérséklettől függ





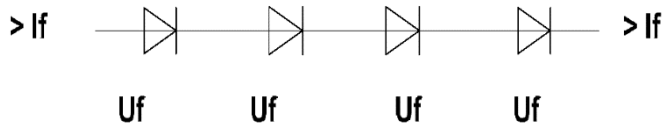
- ... és minden egyéb, így a hatásfok is és a fényhasznosítás is
- De mindezek sokkal stabilabbak áramgenerátoros meghajtásnál, mint feszültséggenerátors meghajtás esetében
  - *Dióda* emlékeztető:

$$\Delta U_F = 60\ \text{mV} \rightarrow 1\ \text{nagyságrendnyi változás}\ I_F\text{-ben}$$

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

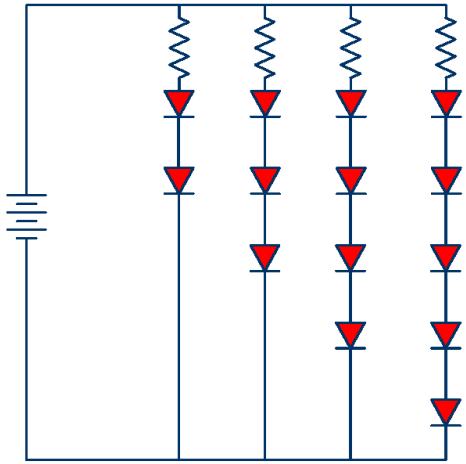
Elektromos környezet tervezése

- A LED-eket kössük mindig sorosan!
  - ugyanaz a nyitóáram
  - egyforma fényesség és színkoordináták



- Az áramgenerátor legegyszerűbb közelítése: ***munkaellenállás***
  - Áramkorlát munkaellenállásokkal beállítható

    Ilyen LED sorok már párhuzamosan köthetők

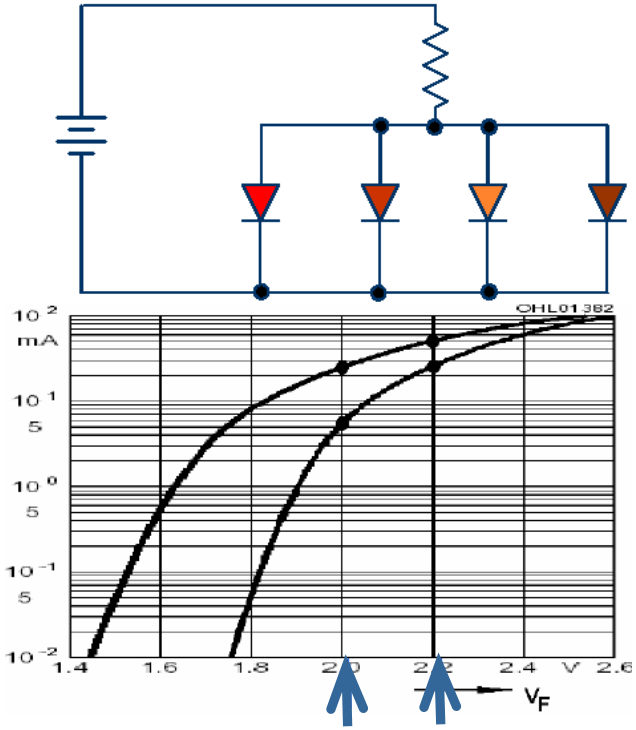


Forrás: OSRAM – LED Light For You oktatási anyag, 2006 (Electrical basics for LED)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Elektromos környezet tervezése

- Mi van, ha mégis párhuzamosan kötünk LED-eket?



A feszültséget a legkisebb nyitófeszültségű LED korlátozza

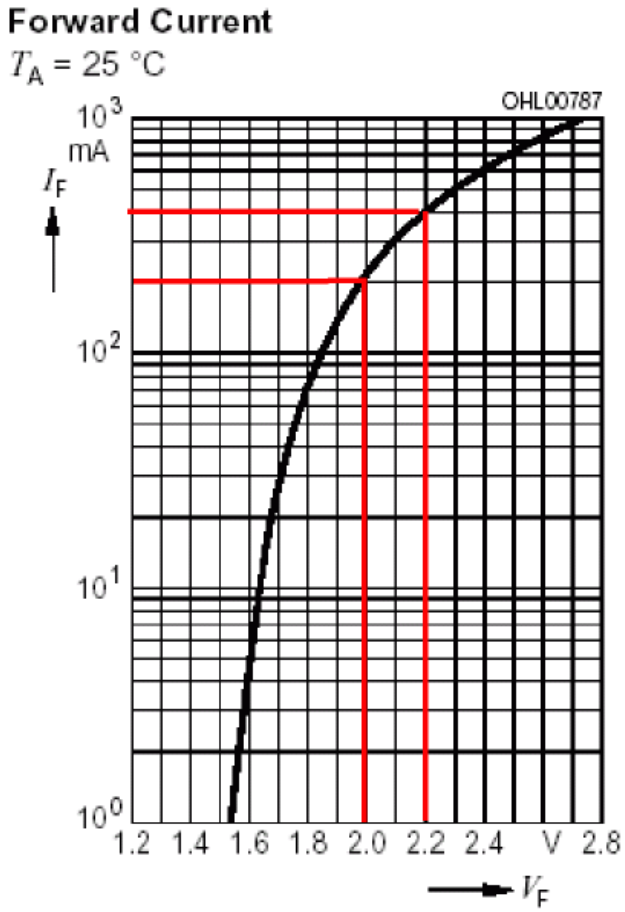
- A legkisebb nyitófeszültségű LED korlátozza a feszültséget
- Nagyon fog különbözni az egyes LED-ek nyitóárama
- E különbségek azt is jelenthetik, hogy egyes LED-ek túlterhelődnek és kiégnek
- Lehet, hogy egyes LED-ek egyáltalán nem világítanak a legkisebb közös nyitófeszültségnél (pl. ha nem azonos válogatási csoportból valók)
- A gyártósori válogatás sosem tökéletes, így a nyitófeszültségnek mindig van szórása. A különbségek szembeötlőbbek, ha az áram kisebb, mint a válogatási csoport árama

Forrás: OSRAM – LED Light For You oktatási anyag, 2006 (Electrical basics for LED)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Elektromos környezet tervezése

- Jó-e az ellenállásos áramkorlátozás teljesítmény LED-eknél?

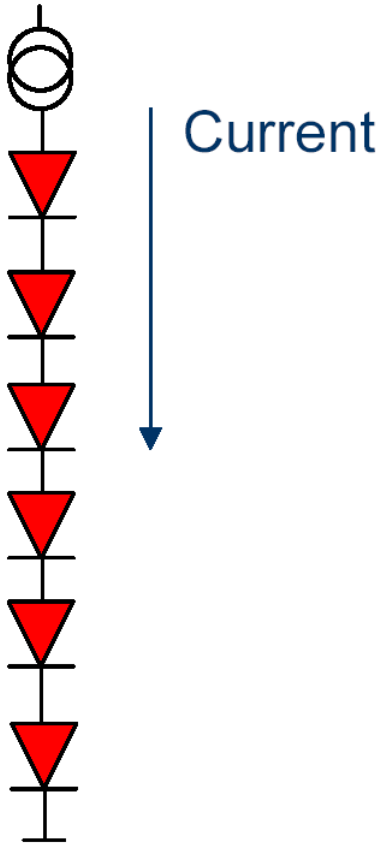


- Az áramszabályozás kvázi kötelező teljesítmény LED-eknél, mert az egyszerű munkaellenállásos megoldással bajok vannak:
  - tápfeszültség változása
  - ellenállásértékek szórása
  - nyitófeszültség hőmérsékletfüggése
  - nyitófeszültség gyártási szórása
- Példa: 1W-os OSRAM Golden Dragon LED
  - Nyitófesz.: 2 V → 2.2 V
  - Áram: 200 mA → 400 mA
- ±0.1 V bizonytalanság ±100 mA áramváltozást okozhat ⇒ kiéghet a LED
- Áramfigyelés kell ⇒ LED driver

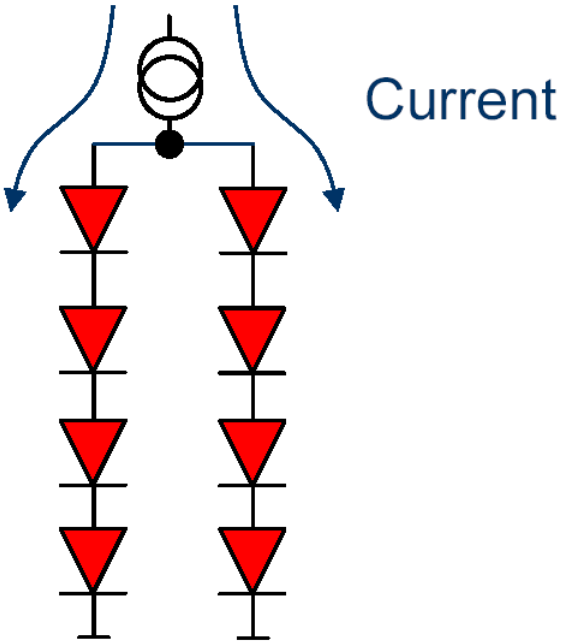
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Elektromos környezet tervezése

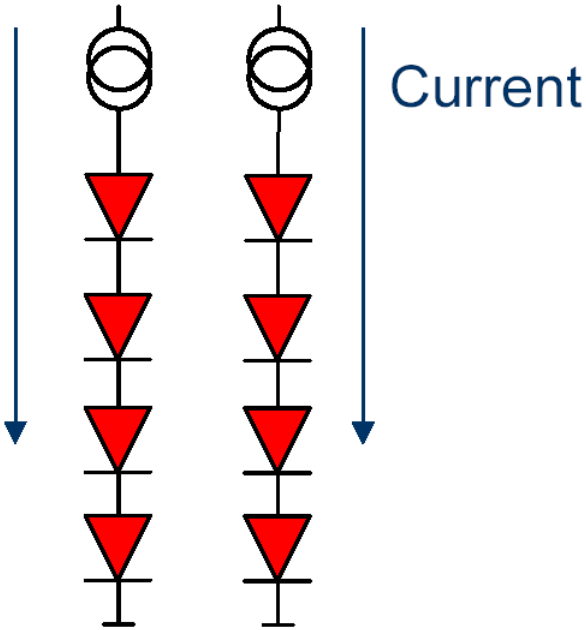
- LED meghajtókkal lehetséges megoldások:



1 füzér,
1 meghajtó



több füzér,
1 meghajtó

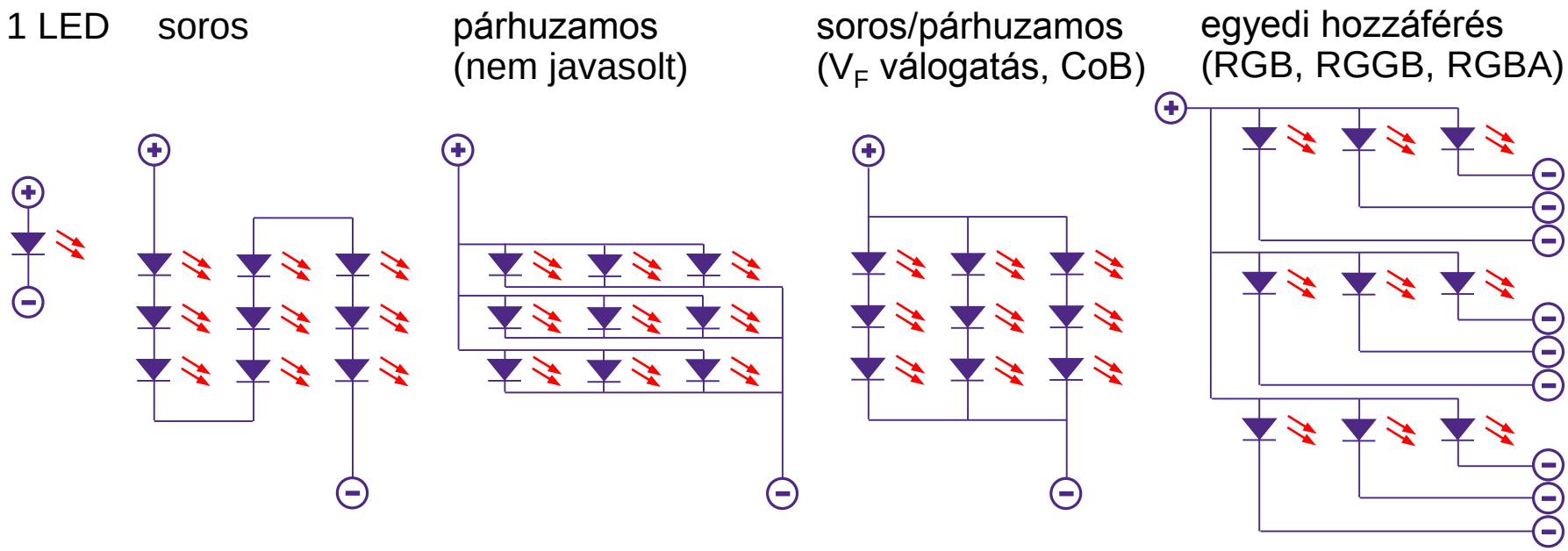


több füzér,
több meghajtó

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED tokok elektromos konfigurációi

- 1 tok – 1 LED lapka (1 db dióda)
- 1 tok – 1 LED lapka; sok LED azonos lapkán: AC LED-ek (lásd később)
- 1 tok – sok LED: multi-chip LED tok vagy CoB LED
- 1 MCPCB – sok LED (LED array, LED module)

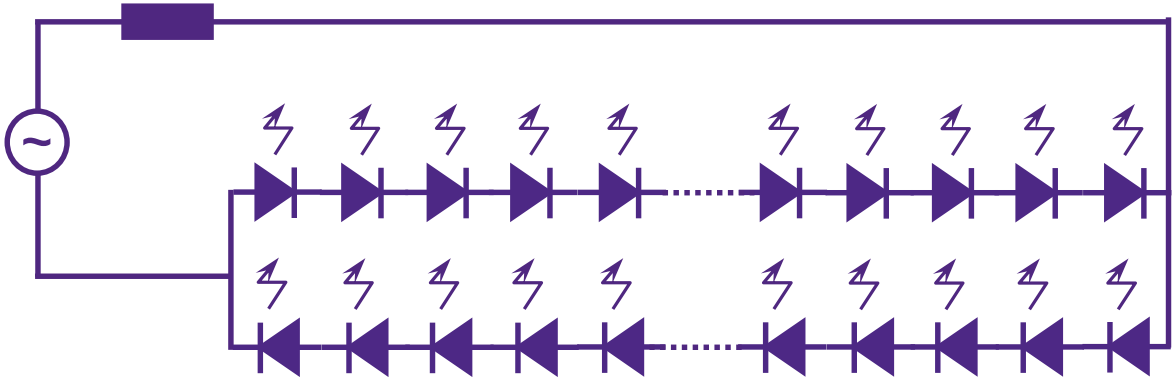


- Soros/párhuzamos konfigurációjú CoB LED tömböknél a nyitófeszültség hőmérsékletérzékenységének az azonossága, és a LED-ek elhelyezkedése is (lásd: a szubsztrát hőmérsékleteloszlása) is fontos

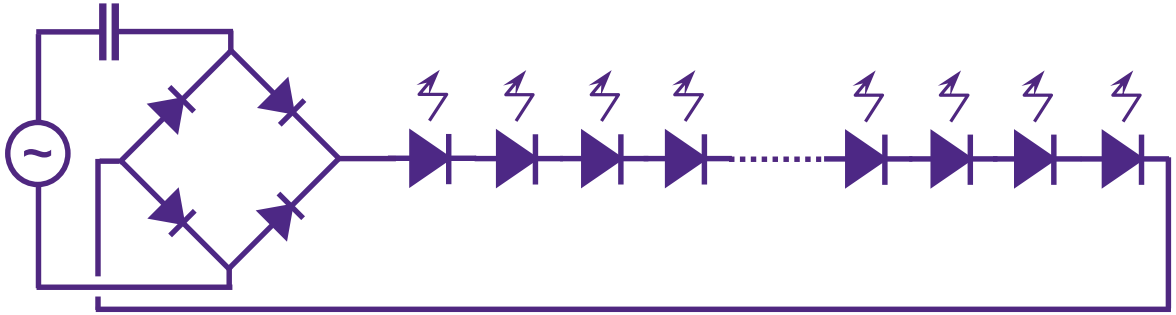
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

AC LED-ek tipikus kialakítása

- Anti-parallel LED sor (tokon belül) + munkaellenállás:



- Graetz-híd és kondenzátor:

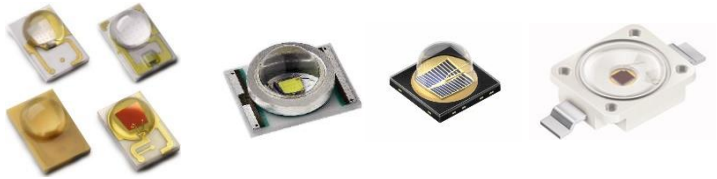


- Ezek harmonikus torzítását nehéz kiszámolni…

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

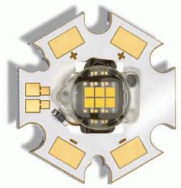
Konfigurációk különböző LED termékekben

- 1 lapka 1 pn átmenettel egy tokban

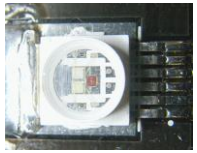


- 1 lapka nagyon sok pn átmenettel sorba kötve egy tokban: HV LED, pl. direkt AC hálózati meghajtású LED tok

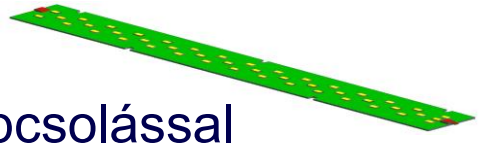
- Több lapka 1 pn átmenet/lapka egy tokban, sorba kötve: nagy nyitófeszültségű LED tok (pl. 12 V-os fehér LED → 4 lapka)



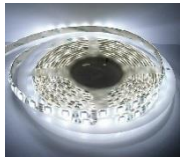
- Több lapka, 1 pn átmenet/lapka egy tokban, több LED tok egy MCPCB-n önálló kivezetésekkel (RGB modul)



- Sok 1 pn átmenetes LED tok sorba kötve: LED füzér / LED sor
  - MCPCB-re szerelt LED modul retrofit alkalmazásokban



- Sok 1 pn átmenetes LED tok (soros-)párhuzamos kapcsolással
  - LED szalag



© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

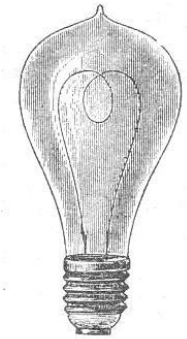
LED-ES VILÁGÍTÁSTECHNIKAI MEGOLDÁSOK A NAPI GYAKORLATBAN

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Lehetséges megoldások: *retrofit*

► Az ún. retrofit LED lámpák

- Meglévő lámpatestbe becsavarható
- Csatlakozó interfész: a **foglalat**
  - Edison korából való
  - Nem volt cél a jó hőelvezetés biztosítása
  - ~1000 h lámpa élettartam mellett indokolt volt az ízzók egyszerű cserélhetősége
- Fontos a fényeloszlás
- Fontos az esztétika
  - Hasonlítson a megszokotthoz



Majdnem a teljes térbe világít (~4π sr)

Csak kb. a fél térbe világít (~2π sr)

Majdnem olyan a fényeloszlása, mint egy hagyományos izzólámpáé (~4π sr)

Olajhűtésű LED lámpa

- Fontos a fényáram (pl. 700 lm) , a fényhasznosítás (pl. 100 lm/W), a színhőmérséklet (pl. 2700 K), a színvisszaadási index (pl. 90), az élettartam (pl. 50 000 h)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Különböző E27/E14-es retrofit LED lámpák

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Izzólámpa vs. retrofit LED lámpa

- **Hogy döntsünk a boltban, hogy mit vegyünk?**
  - 25 W-os, 40 W-os, 60 W-os, 100 W-os normál ízzólámpákhoz, illetve 20 W-os vagy 50 W-os halogén spot lámpákhoz vagyunk szokva...
- Az alapvető mennyiség, ami segít összehasonlítani a LED-es retrofit lámpákat pl. az ízzólámpákkal, az a **fényáram**
  - 100 W-os ízzólámpa,
    - fényhasznosítása: 10 lm/W
    - **teljes fényárama: 1000 lm**
    - *színhőmérséklete: kb. 2700 K*
  - Ekvivalens LED-es lámpa teljes **fényárama 1000 lm legyen**!
    - 2700 K színhőmérsékletű LED lámpát válasszunk, ha az ízzólámpa fényéhez hasonló érzetet keltő fényt szeretnénk
    - Ha lehet, Ra > 85 színvisszaadási indexű LED lámpát válasszunk
    - A fenti szempontok szerint ekvivalens LED lámpák közül a legjobb fényhasznosítású lámpát válasszuk → az kevesebb elektromos teljesítményt vesz fel
    - Pl.: η_V = 100 lm/W fényhasznosítás esetén P_{el} = 10 W
  - A lámpatesttől függ, milyen fényeloszlású LED lámpa felel meg a céljainknak
    - Normál ízzólámpa közel a teljes térszögbe (4π sr) sugároz

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

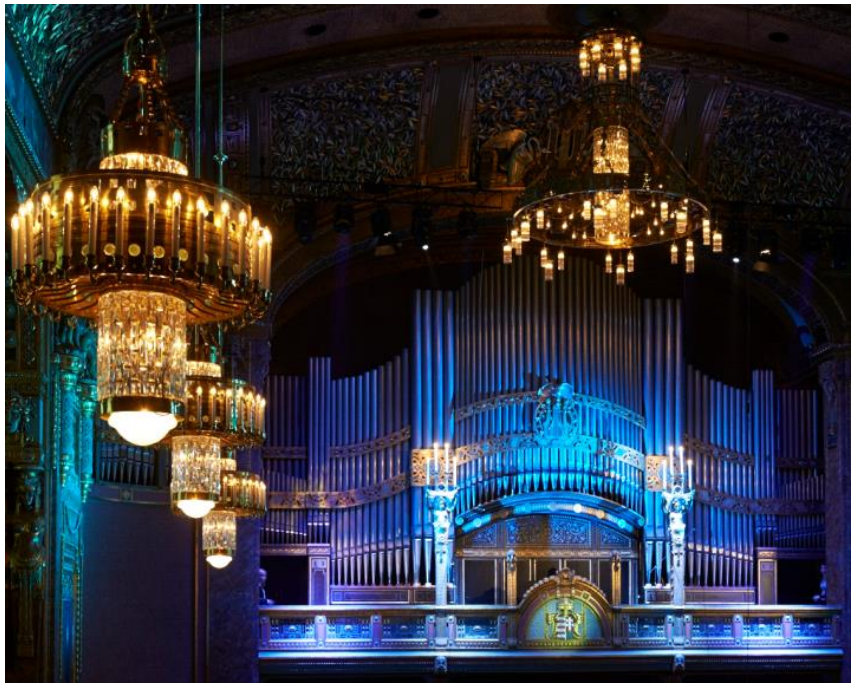
Izzólámpa vs. retrofit LED lámpa

- Ebben a lámpatestben nem kritikus, hogy nem a teljes térszögben sugároz a retrofit LED lámpa
- A természetes konvekciós hűtés zavartalansága persze kérdéses…

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Amikor fontos a jó helyettesítés:

- Pl. műemlék csillárok
  - A retrofit LED-esítés után is azt várjuk, hogy a csillár ugyanúgy nézzen ki, mint korábban:



↑
Régi otthoni csillár, **LED szálas** gyertya égőkkel

←Zeneakadémia nagyterme, ízzólámpás csillárokkal: fontos az autentikus megjelenés.
Mindig van kiégett izzólámpa. Ide egy jó retrofit LED-es megoldás kellett volna.

  - **Amit a LED-es megoldás nyújthat**: *hosszú élettartam* olyan helyen, ahol *nehéz cserélni* a fényforrásokat

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A LED-es gyertya égők evolúciója

A spirált imitáló ún. *LED filament* lámpa: **LED szálas lámpa**

Átlátszó ballonos gyertyaízzó helyett, kb. 40 W-ig

Olajhűtésű retrofit LED lámpa (mára elhalt).

Opál vagy festett fehér ballonos gyertyaízzó helyett, kb. 60 W-ig

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

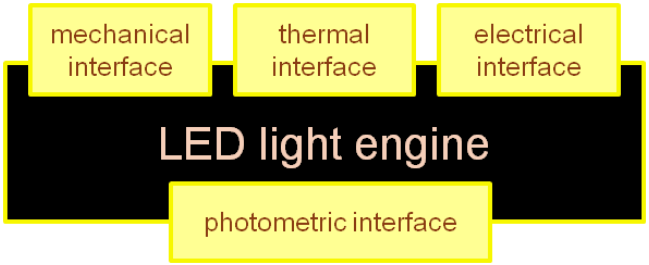
Okostelefonnal vezérelt retrofit LED lámpa

- Állítható szín, fényerősség
- Egyedi, gyártói megoldás
  - Még nincsenek szabványok protokollokra, fizikai médiumokra

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Szabványos, foglalatos LED modulok

- Zhaga szabvány
  - Edison foglalatok meghaladása
    - Egységes mechanikai kivitel
    - Hűtés biztosítása fontos szempont volt



http://www.zhagastandard.org/specifications/lightengine.html

  - Fél úton a fixre szerelt LED-ek és a retrofit LED lámpák közt
  - Csereszabatosság biztosítása különböző gyártók termékei közt
    - LED engine
    - Hűtőborda
    - Foglalat
    - Optika

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Dedikált LED-es lámpatestek

- Hosszú LED élettartam:
  - A világítótest élettartama alatt nem megy tönkre egy LED sem
    - Egy generációt ki tud szolgálni
  - Fixre lehet szerelni a LED-eket
  - A jó hűtés garantált, nem esetleges, mint retrofit esetben

- Van néhány hátrány is:
  - Nagy kezdeti költség
    - A teljes *cost of ownership* mégis kicsi lehet
  - Nem követhetjük a LED-ek fejlődését
  - Javítás, *second sourcing*: problémás

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Összefoglalás

- A vákuumtechnikát a világítástechnikában is felváltja a félvezető technológia
- Az új működési elv új tervezési és üzemeltetési elvek alkalmazását igényli
  - Hőmérsékletfüggő minden főbb paraméter
    - Multi-domain karakterizáció kell: mérés, modellezés, szimuláció
  - Összetettebb optimalizálás
  - Hosszú élettartam:
    - Nem indokolt a fényforrás cserélhetőségének biztosítása
    - Retrofit megoldások: hosszabb távon csak a műemlékeknél
    - Dedikált LED-es lámpatestek (fix beépítésű LED-ekkel)
      - Pl. a közvilágításban
  - *Cost of ownership* – intézményi üzemeltetők
  - Háztartásokban nem egyszerű a csere: a **fényáram** az új metrika
- **A jövő:** smart SSL (kommunikáció, beépített intelligencia)

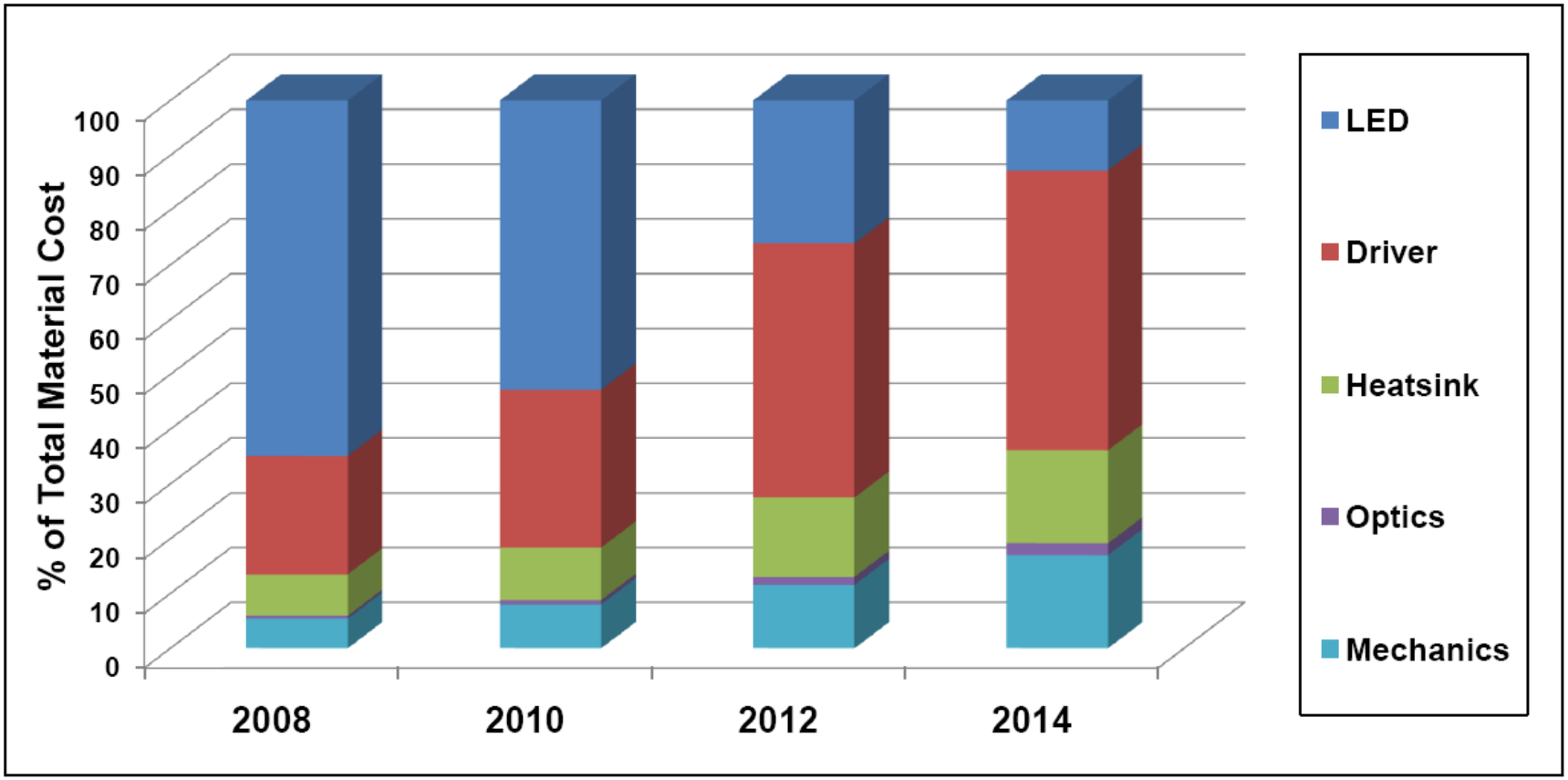
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

ESETTANULMÁNY: ÍZZÓLÁMPÁK HELYETTESÍTÉSE FILAMENT LED LÁMPÁKKAL

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Motiváció

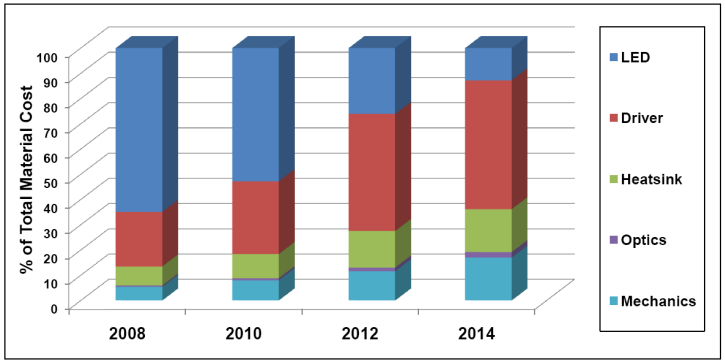
- Ár erozió: maga a LED chip egyre kisebb tényező
- Optika, driver, hűtés, egyéb mechanika: **ma ezeken kell spórolni**



Forrás: James Hooker et al: Development of Gas-Cooled 'LED Filament' Lamps, Lighting Symposium 2014, Como, Italy, June 2014

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Motiváció



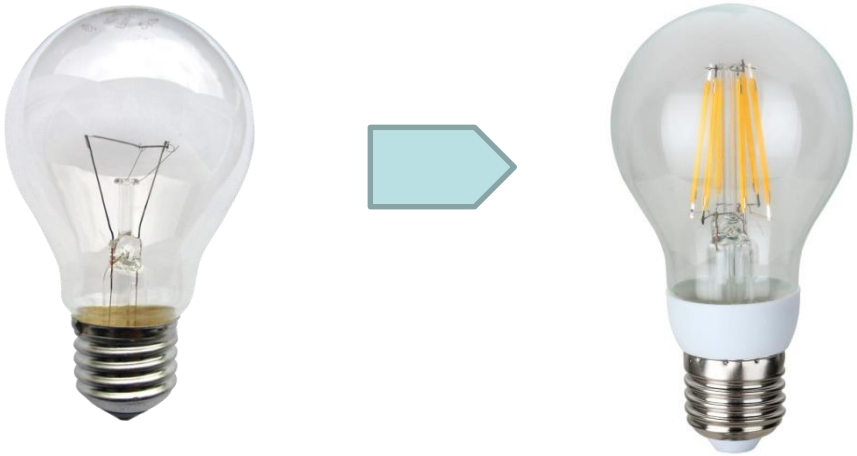
- Spórolás
  - Jól megfigyelhető a Philips teljes térszögbe sugárzó E27-es retrofit LED lámpájánál

- Drága és bonyolult fém szerelvény helyettesítése hővezető műanyaggal
- Nagy sárga fényporos, 3 cikkből álló búra felszámolása üveg diffúzorral
  - Fénykibocsájtás kisebb térszögben, a színhőmérséklet 50 K-nel megváltozott
- A lámpafejben még van meghajtó elektronika

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

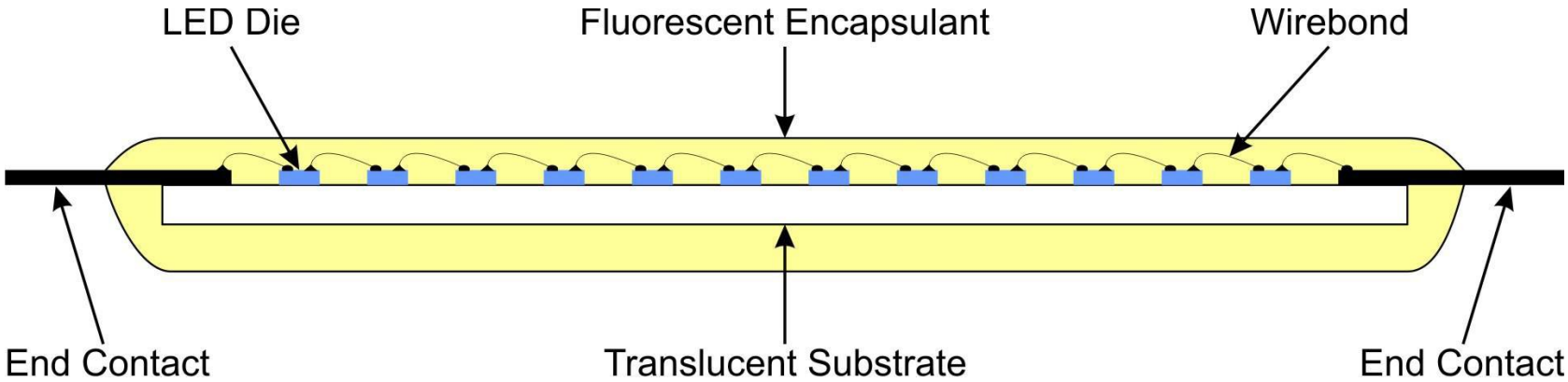
Motiváció

- A retrofit LED lámpa minél jobban hasonlítson egy klasszikus normál ízzólámpához, vagy akár egy régi szénszálas lámpához
- A helyzet a gyertya égőknél a legrosszabb
  - Általában az egész égő látszik, felfelé áll
  - A legtöbb LED-es retrofit gyertya égő ronda, nem jön ki belőlük a fény alul



© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A LED ”spirál” vagy LED-szál

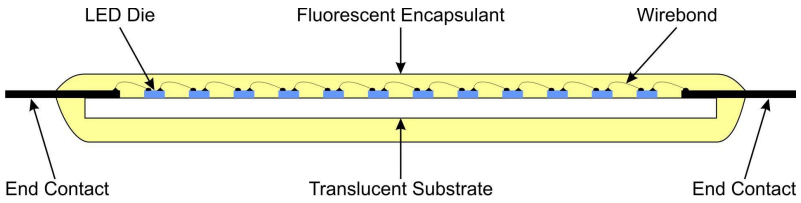


Forrás: James Hooker et al: Development of Gas-Cooled ‘LED Filament’ Lamps, Lighting Symposium 2014, Como, Italy, June 2014

- **Ízzószálas lámpa:** minimális hőátadás legyen a spirál felől a ballont kitöltő csökkentett nyomású védőgáz felé
  - dupla spirál: rövid, vastag (GE, Irving Langmuir, 1913)
- **LED-szálas lámpa:** *ellentétes a követelmény – jó hőátadás kell*
  - Vékony, hosszú, viszonylag jó hővezetésű szubsztráton CoB technikával elhelyezett, elektromosan sorba kötött és fényporral bevont kék LED chip-ek
  - Jó hővezetőképességű nemesgáz atmoszféra: a ballon felületére vezeti a hőt

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A LED-szálas lámpák



- Nem kell hűtőborda
  - Átlátszó szubsztrát
  - Kevesebb reflexió, kisebb optikai veszteségek

- Sorba kötött elemi LED chip-ek: a teljes feszültségesés eléri a hálózati feszültséget
  - 110 V-on egyszerűbb
  - Nincs szükség bonyolult meghajtó elektronikára
  - Ugyanahhoz a teljesítményhez nagy feszültség esetén kisebb áram elegendő
    - Hatékonyabb LED működés
    - Nagyobb élettartam

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

A ballont kitöltő hűtőgáz

- Hűtés gázzal

	Thermal Conductivity mW/m·K @ 300K
Air	26.2
Neon	49.8
Helium	156.7
Hydrogen	186.9

- A hidrogén vagy hélium töltés jó hőátadást biztosít a ballon teljes felületére. *Biztonsági okokból héliumot használnak.*
  - *Onnan természetes konvekciós hűtés*
  - Nem kell drága hűtőborda
  - A klasszikus lámpagyártási technológiák használhatóak
  - A lámpafej egyszerű lehet, nem kell komoly elektronikát belezsúfolni

Forrás: James Hooker et al: Development of Gas-Cooled 'LED Filament' Lamps, Lighting Symposium 2014, Como, Italy, June 2014

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

Összehasonlítás

- Olcsóbb, jobb fényhasznosítás:

	Conventional LED Lamp	Filament LED Lamp
Luminous Flux	806 lm	806 lm
Power Consumption	10.5 W	6.5 W
Luminous Efficacy	77 lm/W	124 lm/W
Colour Properties	2700K Ra85	2700K Ra85
Light Distribution	200 °	330 °

Forrás: James Hooker et al: Development of Gas-Cooled ‘LED Filament’ Lamps, Lighting Symposium 2014, Como, Italy, June 2014

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018

LED-szálas lámpák előnyei

- A klasszikus lámpagyártási technológiák és a LED-ek kombinációjának számos előnye van
  - Nincs szükség hűtőbordára
  - Nincs szükség termikus határfelületi anyagra (TIM-re)
  - Teljes térszögbe sugárzó lámpa, minimális optikai veszteséggel
  - Egyszerű mechanikai kivitel, olcsó anyag (üveg)
    - Párás környezetet is jól viseli
  - A lámpa kivitele jól illeszkedik a klasszikus lámpagyártásban használt teljesen automatizált végszerelő gyártósorokhoz
  - Nagyon jó fényhasznosítás érhető el
  - A lámpa alakja, megjelenése megfelel a vásárlói elvárásoknak
- Továbbfejlesztés még lehetséges az ilyen LED lámpák további termikus és optikai optimalizálásával
- A LED-szálak várhatólag a retrofit LED lámpák mellett egyéb alkalmazást is nyernek

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2018