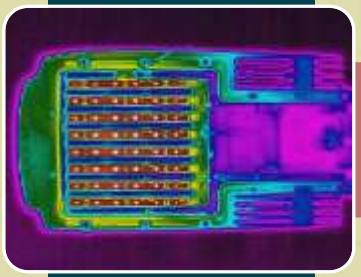
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

Ipar 4.0 szerű folyamat LED-es lámpatestek tervezésére:

a Delphi4LED projekt legújabb eredményei

Dr. Poppe András



Delphi4LED

eet.bme.hu

X. LED Konferencia, 2019. február 6.

A Delphi4LED projekt

- **Honlap**: https://delphi4led.org

From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of LEDs: *towards predictive and efficient modeling and simulation of LEDs at all integration levels along the SSL supply chain*

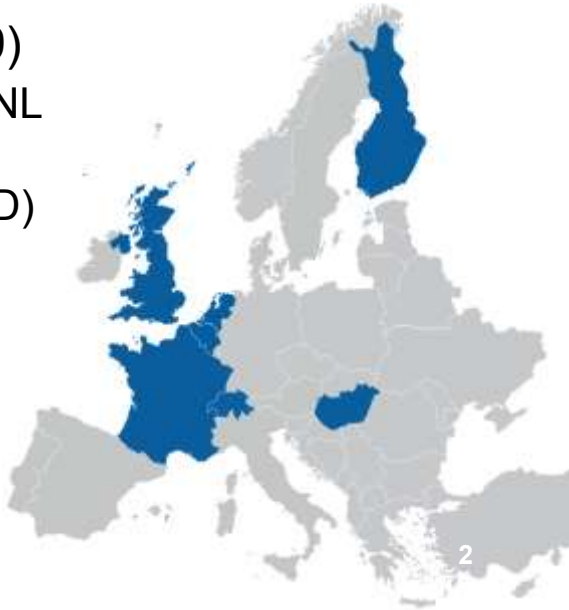
A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modeljeiig: *szimulációs modellek a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára*

H2020 ECSEL és NKFIH NEMZ_17 projekt (2016-2019)

Koordinátor: **Signify** (ex Philips Lighting), Eindhoven, NL

Magyar partnerek: **BME Elektronikus Eszközök Tanszéke**
Mentor, a Siemens business (ex MicReD)

A következőkben a Delphi4LED projektben végzett munkánkat mutatom be



© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Delphi4LED célkitűzések

- **Összekapcsolni a LED chip tervezést a világítástervezéssel: digitalizált lámpatest tervezés – Ipar 4.0 szemlélettel**
- A termikus aspektusok az előtérben (limitáló tényező)
  - Pontos hőellenállás / termikus impedancia információ
  - Több hőforrásos model
    - **több LED chip** egy tokban
    - **a fénypor, mint hőforrás** figyelembevétele
  - Fénypor hőmérséklet, forraszpont hőmérséklet, PN átmenet hőmérséklete
    - néhány százalék pontossággal
- LED lapka **multi-domain modellezése**
  - Szimulálni azt, amit mérni nagyon nehézkes vagy lehetetlen
  - **Lámpatest szintű vizsgálatok**
  - **Spektrális teljesítményeloszlás modellezése** a fentiek adataival
  - Ebből **fénytechnikai jellemzők számítása**, pl.: Φ_V, CIE 1931 °2 x,y, T_{cc}, CRI
- Fenti modellek paramétereinek meghatározása **mért** karakterisztikákból
  - Statisztikai módszerek alkalmazása, Monte Carlo módszerek
- Fenti modelleket kezelni képes **kereskedelmi** szimulációs programok
  - Ezekhez **szabványos** adattartalom és adatformátum szükséges

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

A Delphi4LED vízió

The aim of Delphi4LED are to develop a standardized method to create multi-domain LED compact models from thermal-optical-electrical performance data where test data are reported in standardized e-datasheet format, compact models are published in a standard compact model file format.

Végfelhasználó
(modul és lámpatest tervezők)

Ipar 4.0 szemlélet

Virtuális prototípusgyártás

Szimulációs Programok

LED kompakt modellek
(multi-domain)

E-adatlapok

Mérési eredmények
(optikai, termikus, elektromos)

LED tokok / modulok

Digitális ikrek

Szabványos modell interfészek

LED kompakt modellek és paramétreik előállítása

Delphi4LED

Delphi4LED

CIE TC 2-84

Fizikai eszközök

LED karakterisztikák egységes formátumban

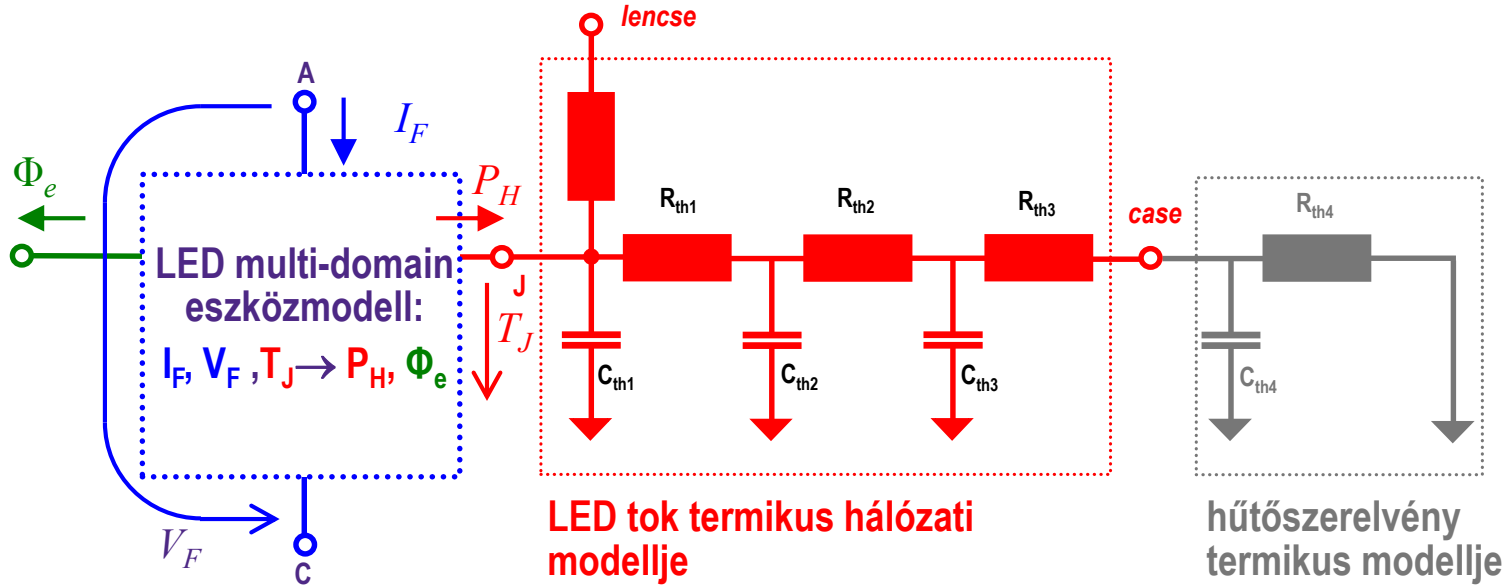
Szabványos mérési eljárások

CIE 225:2017, 226:2017
JEDEC JESD51-51, 51-52

Világítástechnikai Évkönyv 2016-2017

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

LED-ek és LED-es rendszerek modellezése



- **Termikus modell:** a hőforrástól a környezettől való hőátadás leírása hálózati modellel (kompakt modell)
  - CFD szimulátorba építve: csak a tok hálózati modellje
  - Elektro-termikus hálózatszimulátorba épíitve: tok és hűtőszerelvény modellje
- **LED eszközmodell**: elektro-termikus és számolja a kisugárzott optikai teljesítményt is → **multi-domain**
  - További számítások: V_F, I_F, T_J ismeretében fényáram (Φ_V), ill. spektrális teljesítmény-eloszlás számítása → **üzemi fényáram (hot lumens)**
  - ***Fekete doboz***: csak nagyjából ismerjük az eszközt, nem részletezzük túl a modellben a LED működésének fizikai alapját → **ez a kompakt modell**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Moduláris megközelítés: pl. Spice makrok

- Kb. megfelel az SSL beszállítói lánc szerinti integrációs szinteknek:
  - chip – tok – szubsztrát/lámpatest

LED lapka multi-domain modell

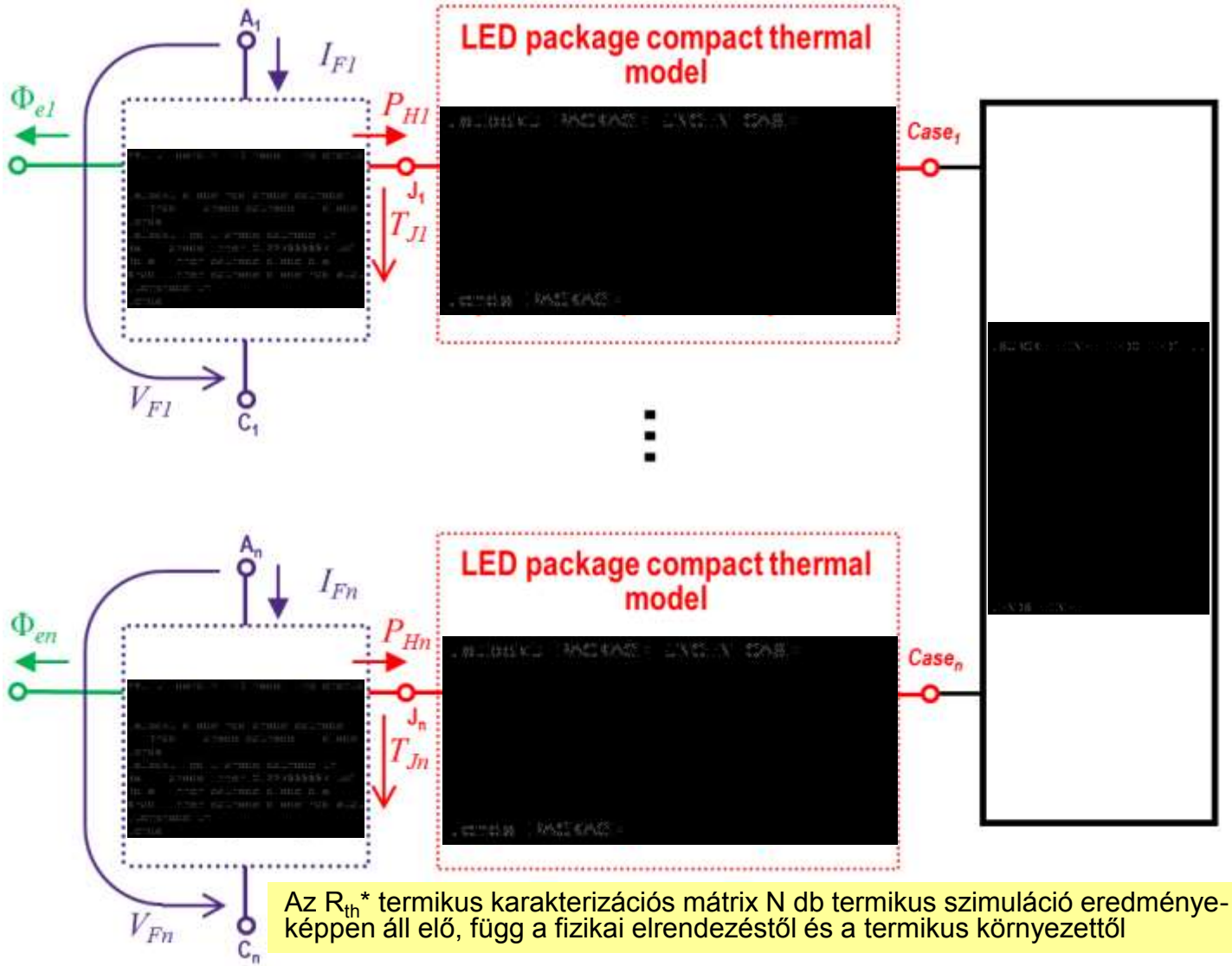
Mért izotermikus I-V-L karakterisztikák alapján

LED tok termikus kompakt modell

Mért, illetve részletes 3D szimulációval kapott eredményekhez illesztve, termikus határfeltételtől független modellek

Lámpatest vagy szubsztrát termikus kompakt modellje

Több hőforrásos rendszer $\mathbf{R_{th}}$* matrixából kapjuk, mint analóg IC layout-ok esetében is



Az R_{th}* termikus karakterizációs mátrix N db termikus szimuláció eredménye-képpen áll elő, függ a fizikai elrendezéstől és a termikus környezettől

Ipar 4.0 munkafolyamat

Delphi4LED

Fizikai LED példányok

Fizikai eszköz

LED gyártók, mérő laborok

Kombinált termikus / elektromos / optikai mérés

Mérési szabványok, kombinálva:

JESD 51-51 | JESD 51-52

JESD 51-14 | CIE 225:2017

E-adatlapok

CIE TC2-84

$\Phi_e(T_J, I_F)$ és $SPD(T_J, I_F)$ karakterisztikák

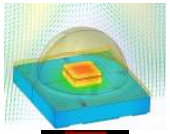
$V_F(T_J, I_F)$ karakterisztikák

$Z_{th}(t)$ görbék, T_J értékek

Termikus mérési adatok feldolg.

Digitális ikrek

Struktúra függvény



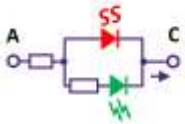
3D LED tok modell

Modellek

LED modellezés

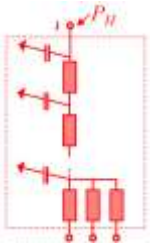
LED gyártók, mérő laborok,
LED alkalmazás tervezők

Lapka szintű multi-domain modellezés



LED lapka multi-domain modellje

LED tok termikus kompakt modelljének előállítása



LED tok termikus kompakt modell

Lámpatest 3D MCAD modellje

LED tok multi-domain kompakt modellezés

LED tok kompakt modell

Rendszer szintű modellezés

LED alkalmazás tervezők

Rendszer szintű multi-domain modellezés

Lámpatest / NYHL kompakt modellező eszköz

Lámpatest termikus kompakt modellje

Üzemi paraméterek, pl. *üzemi fényáram*

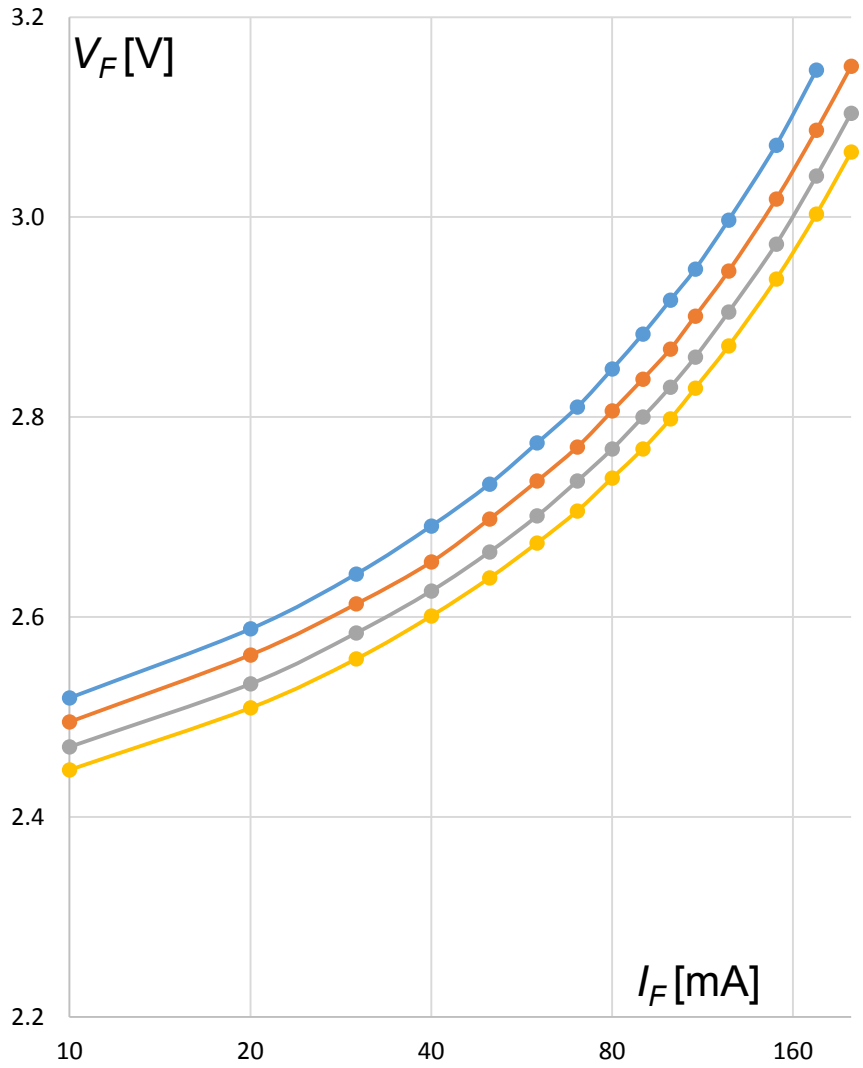
Virtuális prototípus gyártás

Világítástervezés

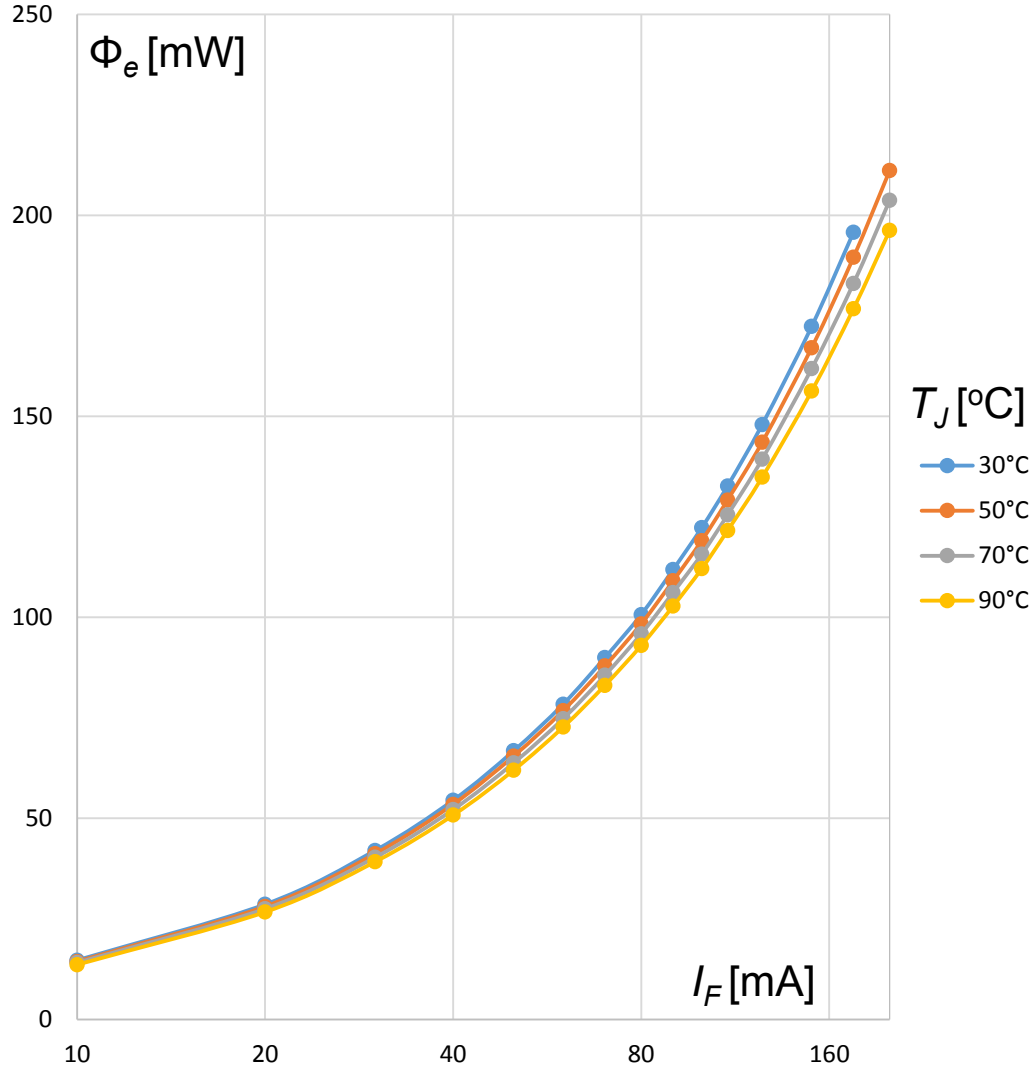
A megvalósítás elemei MicReD / Mentor hardver és szoftver eszközökkel

Delphi4LED **multi-domain modellezés és paraméter meghatározás**

Példa: egy kék LED mért karakterisztikái



Izotermikus I-V karakterisztikák

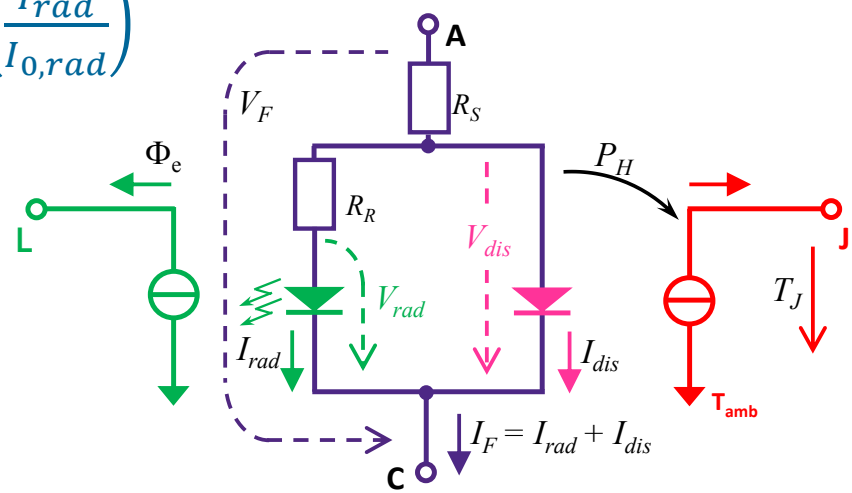


Izotermikus I-L karakterisztikák

Javított LED modell

- A korábbi modell (2014) nagy áramoknál a radiometriai fluxust túlbecsüli, nem vesz tekintetbe egyes optikai veszteségeket
- R_R ellenállás beépítésével jobb eredményeket kapunk

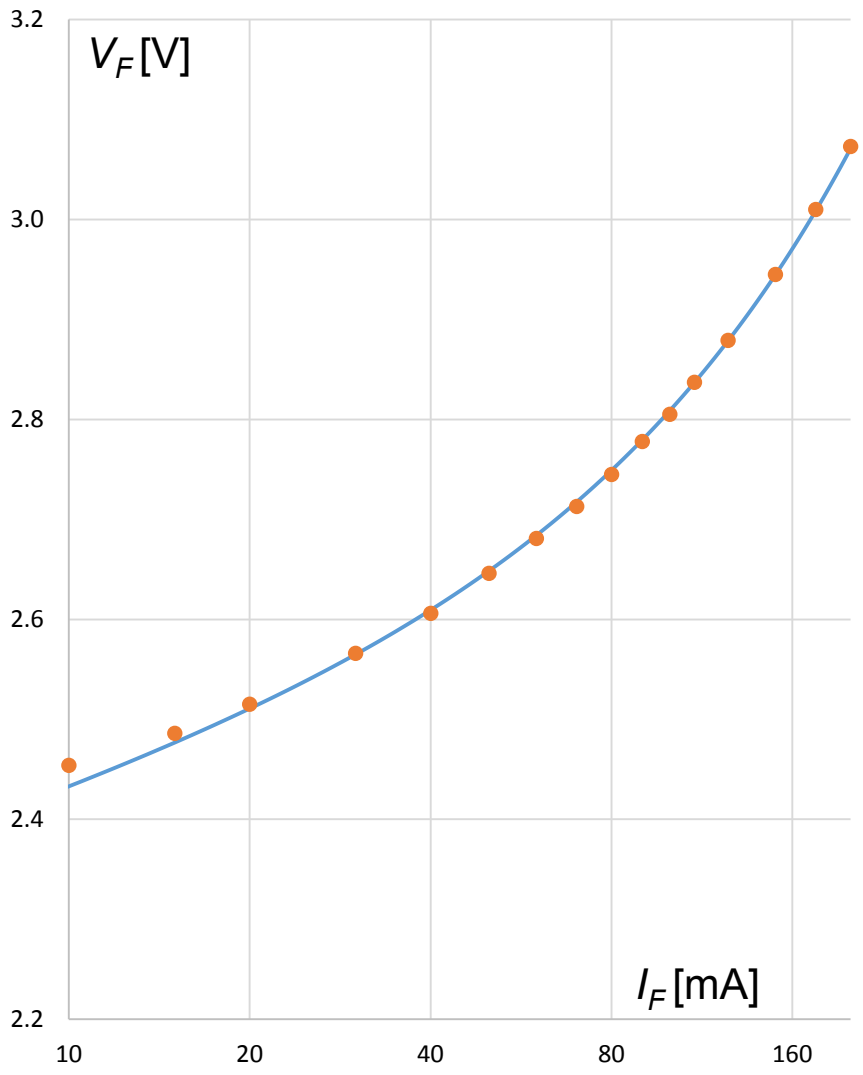
$$V_{dis} = I_{rad} \cdot R_R + m_{rad} \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{rad}}{I_{0,rad}}\right)$$

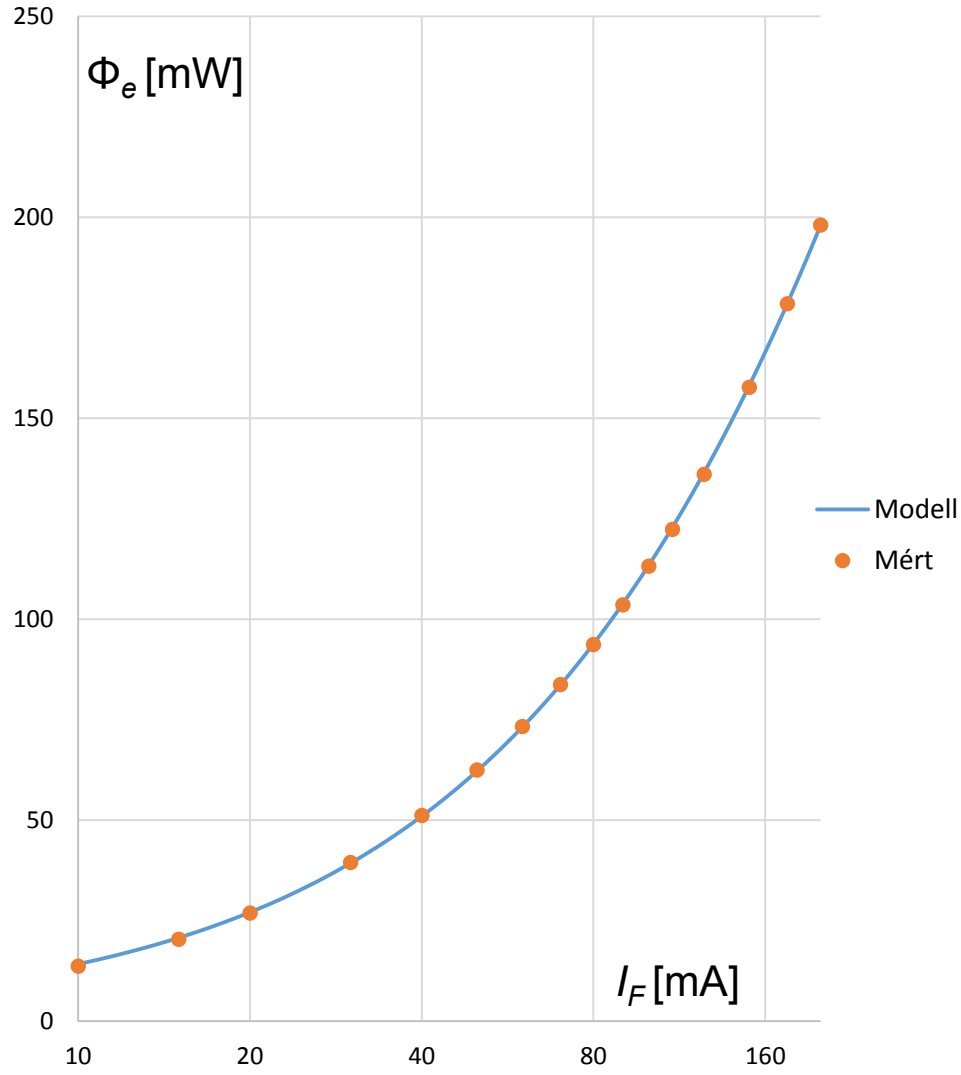


- Visual Basic makro implementáció Excel alkalmazáshoz
  - *Luminaire Design Calculator*
- Generikus SPICE makro implementáció
  - LT-Spice

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Modellezett V_F és Φ_e karakterisztikák





Karakterisztikák egy adott T_J hőmérsékleten

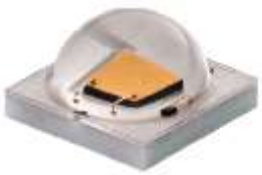
A megvalósítás elemei

Delphi4LED **LED tok termikus kompakt modellezési eljárás**

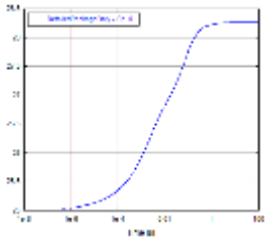
LED tokok termikus kompakt modellezése

A folyamat:

Új modell kalibrációs eljárás:
Új teszt PCB, struktúra függvények különbségének automatizált minimalizálása
(Mentor HU, Mentor UK, BME)

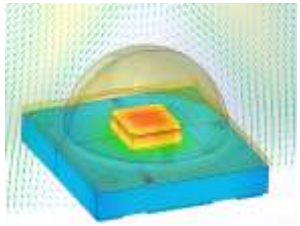


Fizikai LED tok

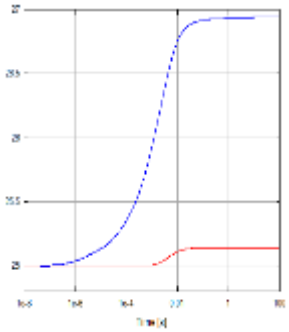


Valós termikus impedancia mérése (JEDEC JESD51-51/51-52, CIE 225:2017), abból **struktúra függvény meghatározása**

karakterizálás

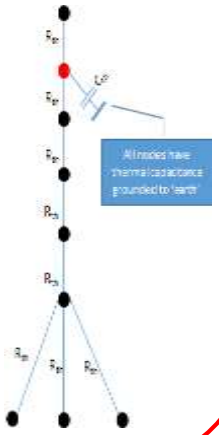


Méréssel kalibrált részletes 3D tok modell (CFD szimulációk számára)



Szimulált tranziens válasz függvények (CFD szimulációkból)

Kompakt modell elemértékeinek optimalizálása a legjobban illeszkedő tranziens válaszra



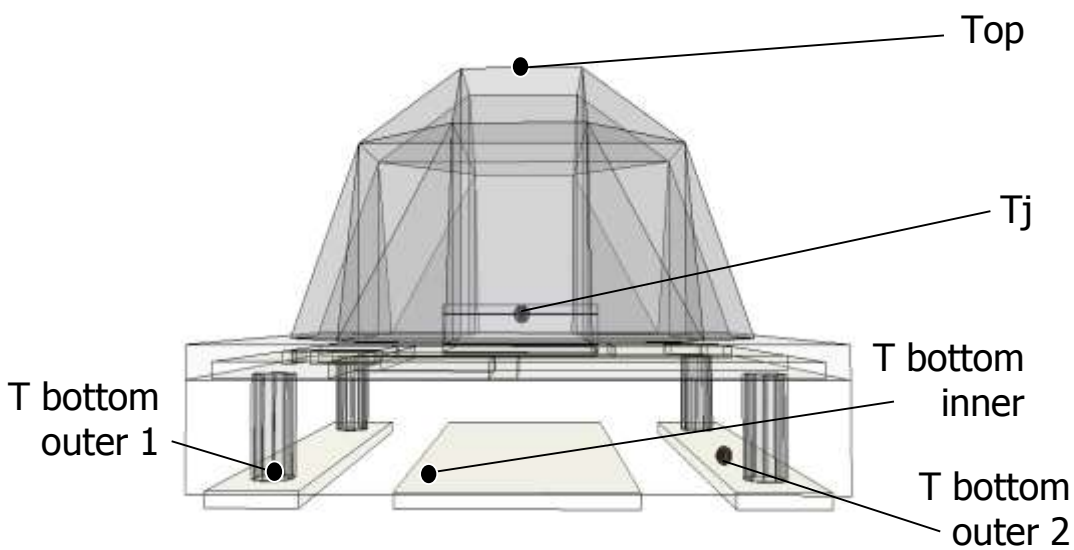
modellezés

Új mérési eljárás:
JEDEC JESD51-5x és CIE 225:2017 kombinálása
(Mentor HU, BME)

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

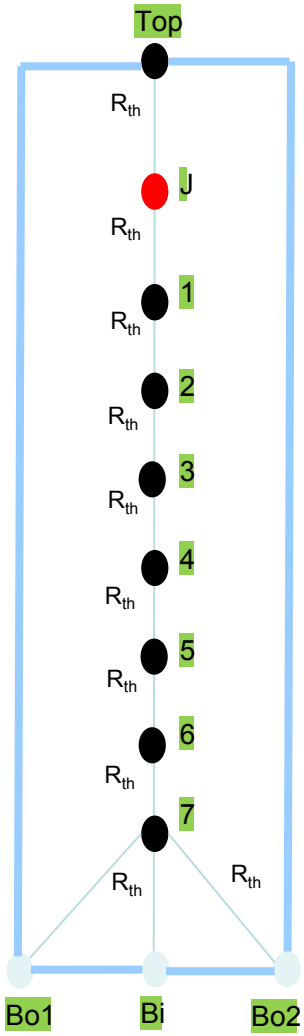
LED tokok termikus kompakt modellezése

Klasszikus JEDEC DELPHI modell terminológia (JESD15-4)



Katód Termikus pad Anód

LED-es terminológia

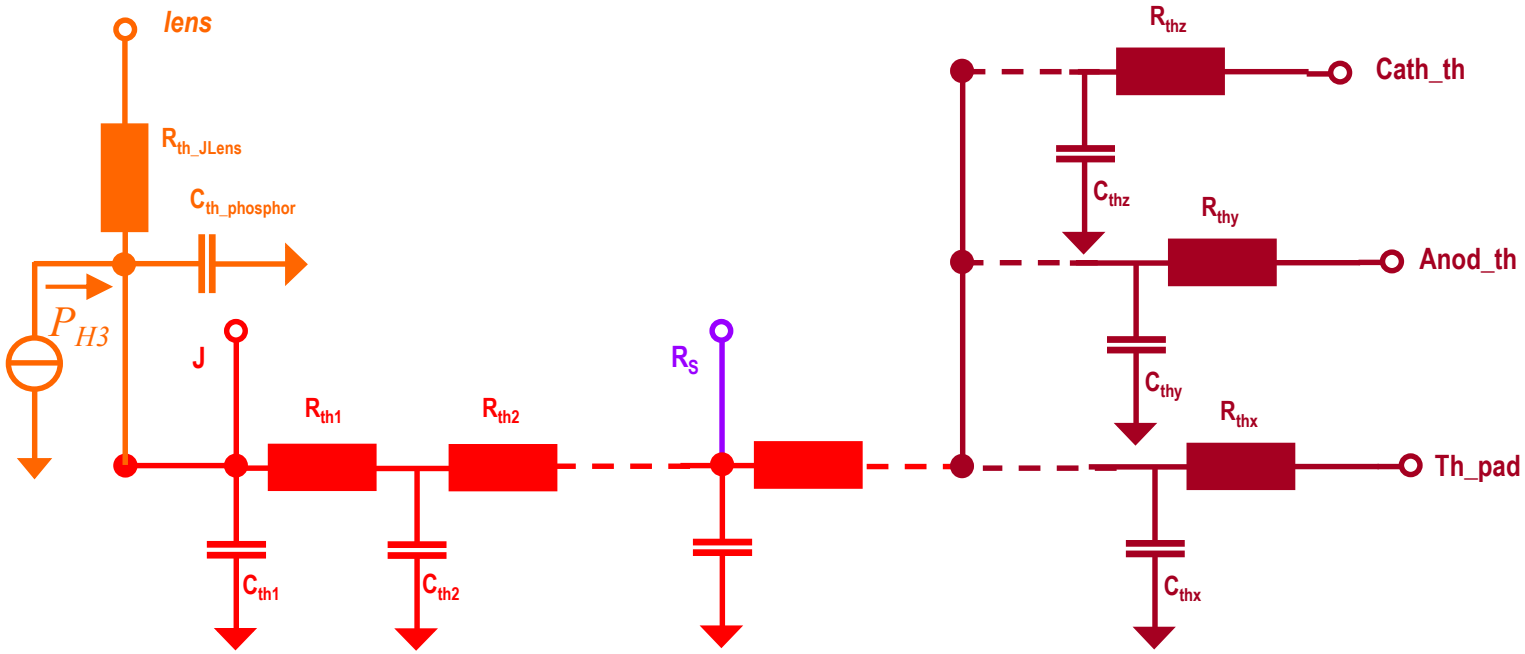


A hálózati topológia visszatükrözi a LED tokok jellegét

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

A LED tokmodell részletesebben

- Kiindulás: a korábbi *junction-to-case* Cauer RC létra
- Kiegészítések:
  - Elágazás a tok forrasz tappancsainál (katód, anód, termikus)
  - Chip soros ellenállása (R_S) disszipációja számára külön input csomópont (ha a chip architektúra igényli)
  - A fénypor réteg termikus hatásának figyelembe vétele
    - Extra hőkapacitás
    - Hőellenállás a lencsén keresztül
    - A pn-átmenettől eltérő helyen fellépő termikus veszteség



© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

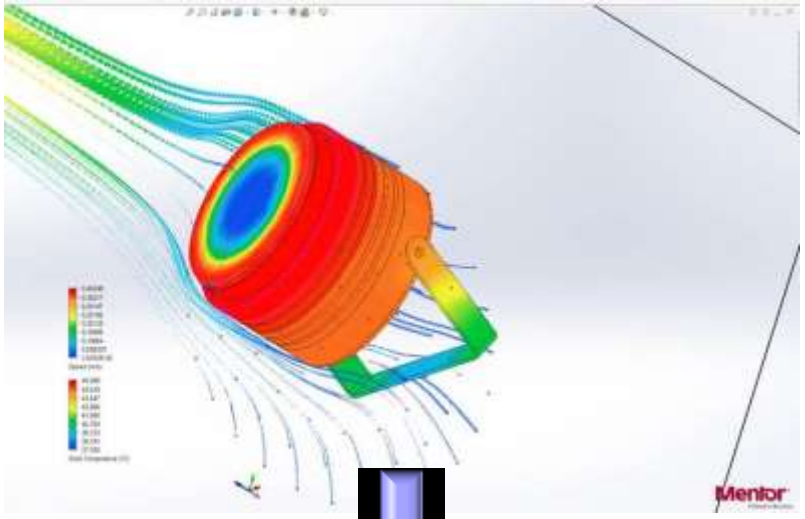
A megvalósítás elemei

Delphi4LED **lámpatest/szubsztrát termikus kompakt modellezés**

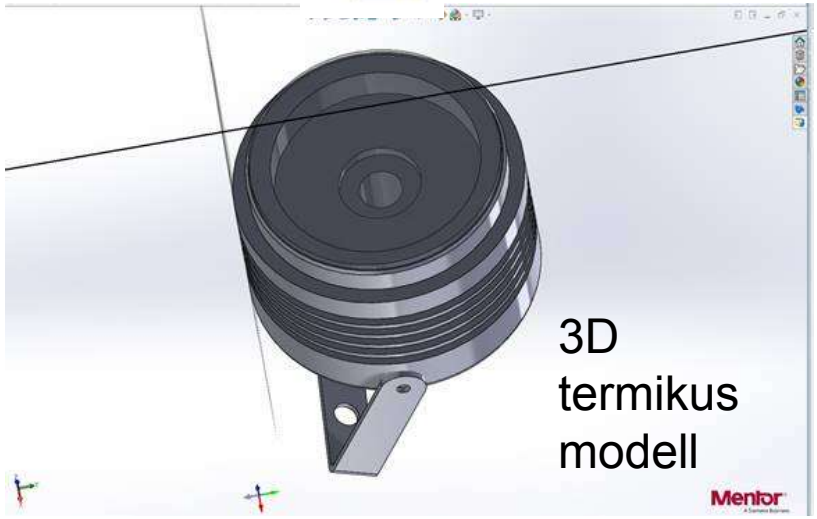
Lámpatest / szubsztrát modellezése

Mechanikai CAD model

Lámpatest / szubsztrát terv termikus karakterizálása CFD szimulációk sorozatával



Geometria importja a 3D CFD termikus szimulátorba



3D termikus modell

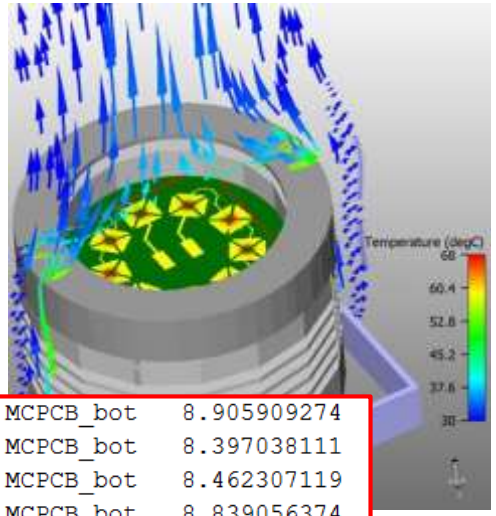
A lámpatest / szubsztrát $\mathbf{R_{th}}^*$ termikus karakterizációs mátrixának előállítása és hálózati modellé konvertálása

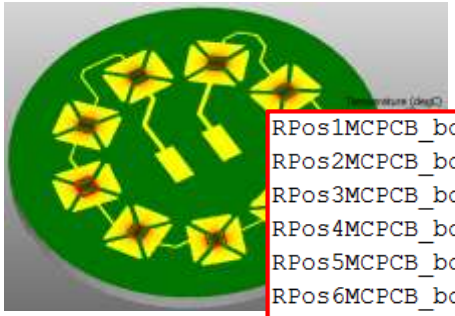
Lámpatest / szubsztrát **termikus kompakt modell Spice netlist formátumban**

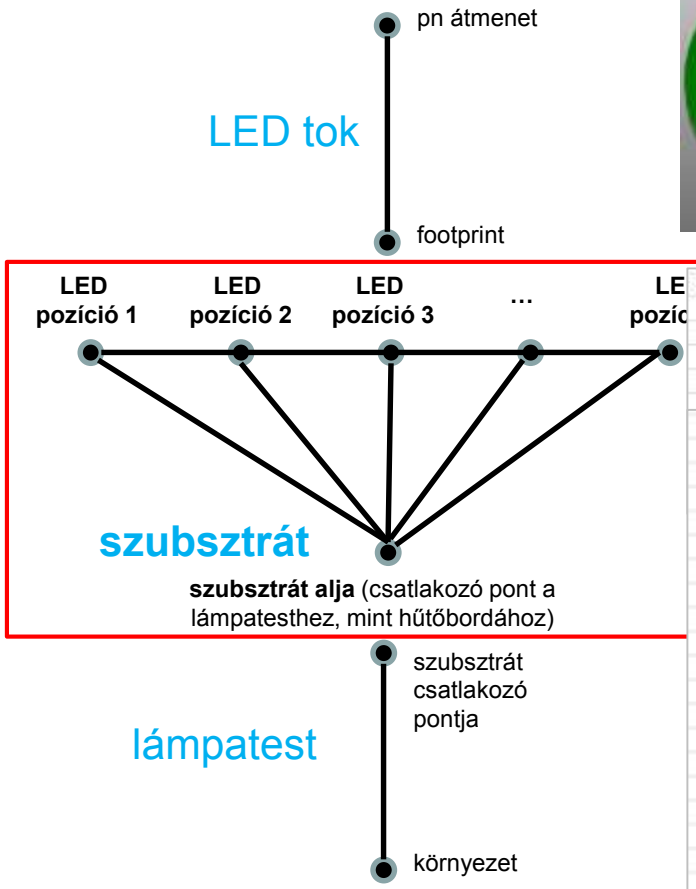
© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Példa:

Delphi4LED projektdemonstrátor szubsztrát és lámpatest modellezése





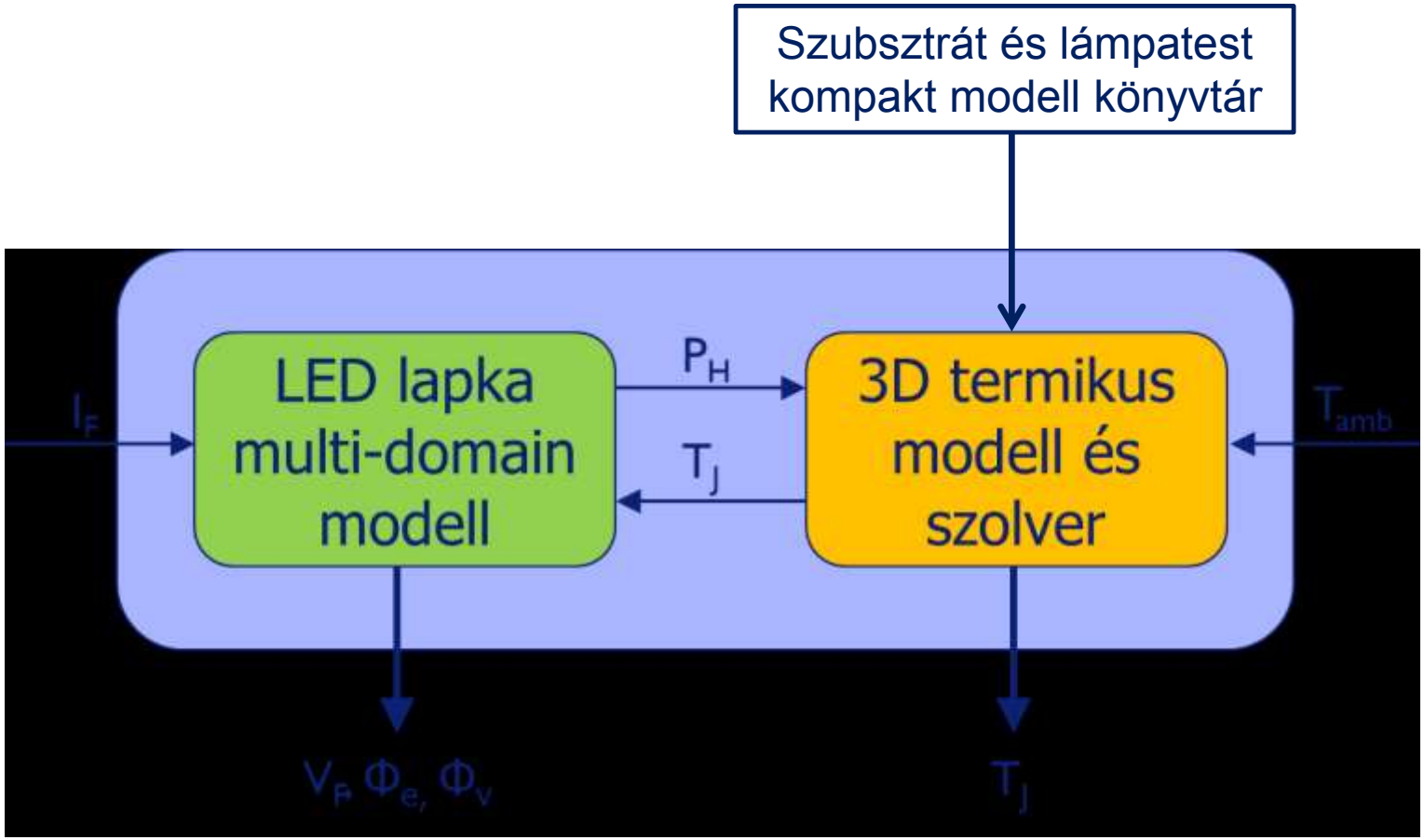


RPos1MCPCB_bot	Pos1	MCPCB_bot	8.905909274
RPos2MCPCB_bot	Pos2	MCPCB_bot	8.397038111
RPos3MCPCB_bot	Pos3	MCPCB_bot	8.462307119
RPos4MCPCB_bot	Pos4	MCPCB_bot	8.839056374
RPos5MCPCB_bot	Pos5	MCPCB_bot	8.832498774
RPos6MCPCB_bot	Pos6	MCPCB_bot	8.879584255
RPos7MCPCB_bot	Pos7	MCPCB_bot	8.870603828
RPos8MCPCB_bot	Pos8	MCPCB_bot	8.506230548
RPos9MCPCB_bot	Pos9	MCPCB_bot	8.707730701
RPos1Pos2	Pos1	Pos2	829.5982526
RPos2Pos3	Pos2	Pos3	818.3373091
RPos3Pos4	Pos3	Pos4	881.7643185
RPos4Pos5	Pos4	Pos5	841.5554918
RPos5Pos6	Pos5	Pos6	838.6877354
RPos6Pos7	Pos6	Pos7	819.3514046
RPos7Pos8	Pos7	Pos8	853.5095604
RPos8Pos9	Pos8	Pos9	847.774583
RPos9Pos1	Pos9	Pos1	855.5876525
RPos1Pos3	Pos1	Pos3	3740.853548
RPos2Pos4	Pos2	Pos4	2119.639289
RPos3Pos5	Pos3	Pos5	3370.046818
RPos4Pos6	Pos4	Pos6	2475.190628
RPos5Pos7	Pos5	Pos7	2367.609253
RPos6Pos8	Pos6	Pos8	3105.90339
RPos7Pos9	Pos7	Pos9	2111.819513
RPos8Pos1	Pos8	Pos1	3517.053552
RPos9Pos2	Pos9	Pos2	2003.774258

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Megvalósítás: *Luminaire Design Calculator*

Microsoft Excel alkalmazás:



LED tok, áramköri hordozó + lámpatest ház kompakt termikus modellje **kombinálva** a LED lapka multi-domain modelljével **lámpatest rendszerszintű virtuális prototípusában**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Megvalósítás: *Luminaire Design Calculator*

Microsoft Excel alkalmazás:

GOALS	
Luminous Flux (lm)	1200
CONSTRAINTS	
Tj max (degC)	150
Ts max (degC)	85
Ta (degC)	45
Total Power Consumption (W)	15
DESIGN	
Number of LEDs	6
Substrate Type	SMI 3W
Heatsink Rth (K/W)	2.5
Forward Current (A)	1.5
Optics Efficiency	0.8
Driver Efficiency	0.9

SIMULATE

RESULTS	
Highest Tj (degC)	**85.38**
Highest Ts (degC)	**79.27**
Total System Power Consumption (W)	**29.96**
Total System Luminous Flux (lm)	**2465**
Total Luminous Flux from LEDs (lm)	3082
Total System Optical Power (mW)	7582
Total Optical Power from LEDs (mW)	9478
Total System Lumens/Watt (lm/W)	82.28
Total Lumens/Watt from LEDs (lm/W)	113.1

PER LED RESULTS	Vf (V)	Luminous Flux (lm)	Tj (DegC)	Ts (DegC)	P (W)	Pdis (W)
1	3.03	513.47	85.38	79.27	4.5	2.96
2	3.03	513.69	85.17	78.84	4.5	2.96
3	3.03	513.61	85.25	79.00	4.5	2.96
4	3.03	513.63	85.23	78.96	4.5	2.96
5	3.03	513.62	85.24	78.98	4.5	2.96
6	3.03	513.65	85.21	78.92	4.5	2.96

LED tok, áramköri hordozó + lámpatest ház kompakt termikus modellje **kombinálva** a LED lapka multi-domain modelljével **lámpatest rendszerszintű virtuális prototípusában**

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Demonstrációs példa:

“10 W-os” kültéri LED-es spot lámpatest

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

“10 W-os” LED spot – főbb specifikációk

- Szokásos kültéri spot architektóra (Ingelux, Franciaország)

- Főbb fénytechnikai adatlapi specifikációk
  - 10 W el. teljesítményfelvétel
  - 1200 lm / 30°-os sugárzási szög

TYPE : INC-01

Description: Exterior MidPower Projector

LUMINAIRE	
Mounting type :	Mounting bracket
Optic :	30°
Orientability :	Yes 180° vertical / 360° horizontal
Diffuser :	No
Material :	
Trim :	
Color/Finish :	
Luminous efficacy :	
Protection Index (IP) :	IP65
Output flux (lm) :	≥1200 lm (between 1200 and 1500lm)
Total power (inc ballast) :	≤15 W
Manufacturer warranty :	≥5 years
UGR :	
Impact resistance index (IK) :	≥IK08
aesthetic	Orientable spot
Diameter :	
Length :	
Dimensions :	<140 x 140 x 215 mm (without driver)

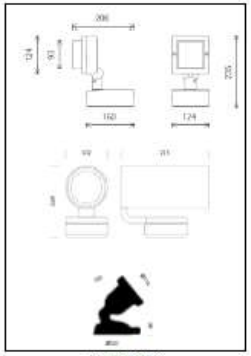
SOURCES	
Source :	LED
Lamp quantity	
Unitary power :	
Voltage/ amperage :	24V, deported driver
Luminous flux :	
Lamp cap :	
CRI :	≥80
Color temperature	4000K
Optic :	
Binning / McAdam :	≤ 3 SDCM
lifetime :	≥50 000 h
Remark	

ELECTRIC GEAR	
Control system :	24V DC
Control type :	Dimmable 24V
Integrated/deported	Deported
Gear lifetime :	≥50 000h
Power factor 100% :	≥90
Power factor 30% :	≥90
Protection index (IP) :	

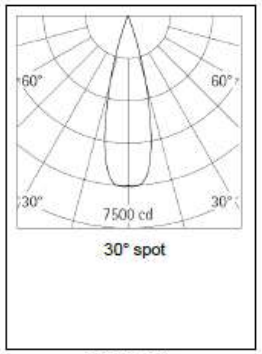
ACCESSORIES	
accessories :	
other :	

ILLUSTRATIONS

ASPECT



DIMENSIONS



30° spot

PHOTOMETRY

EXAMPLE	
Manufacturer :	ERCO / DISANO / Thorn / OSRAM / …
Product code :	Erco Grasshoper 15W 34034 / Erco Gecko 34074 / Disano Koala ES 1537 13W / Thorn TLG contrast 2LED 14W / OSRAM CL LED spotlight15W

Observations : see technical datasheets attached

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

A tervezési folyamat új megvalósításai

- **Új KKV folyamat:** a “próbálkozás” virtuális prototípusokkal
  - LED chip multi-domain model alkalmas paraméterekkel
  - Szubsztrátok és lámpatestek termikus modelljeinek könyvtárai
- **Új nagyvállalati folyamat:** fejlett 3D termikus szimulátor LED tokok multi-domain kompakt modelljeivel kiegészítve
  - Automatizált optimalizálás chip szintű multi-domain modell segítségével (Spice szimuláció)

	Concept / development	Tervezés, proto gyártás	Karakterizá-lás, végső mérés
nagy-vállalat	Régi mód: mérésen / karakterizáláson alapuló optimalizálás	A cég	C cég
	Új mód: optimalizálás kompakt modellel	A cég	C cég
KKV	Régi mód: prototípus-gyártás és mérés	B cég	C cég
	Új mód: virtuális prototípusgyártás kompakt modellekkel	B cég	C cég

A tervezési folyamat új megvalósításai

- Jelentős megtakarítás mind tervezési idő, mind tervezési költség tekintetében

Főbb költségek	KKV, régi folyamat	KKV, új folyamat	Megtakarítás
Személyi költségek	0,896	0,633	29%
Anyagköltség	0,049	0,028	43%
Mérések költségei	0,056	0,056	0%
Összesen	**1,000**	**0,717**	**28%**
Főbb költségek	**nagyvállalat, régi folyamat**	**nagyvállalat, új folyamat**	**Megtakarítás**
Személyi költségek	0,819	0,502	39%
Anyagköltség	0,055	0,028	48%
Mérések költségei	0,126	0,045	65%
Összesen	**1,000**	**0,575**	**42%**

Demo kísérletek a Delphi4LED projektben

Részletek:

C. Marty et al, THERMINIC'18, 26-28 September 2018, Stockholm, Svédország

Poppe A., Világítástechnikai Évkönyv 2018-2019

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

A KKV verzió számított és mért eredményei

GOALS	
Luminous Flux (lm)	1200

CONSTRAINTS	
Tj max (degC)	150
Ts max (degC)	85
Ta (degC)	25
Total Power Consumption (W)	15

DESIGN	
Number of LEDs	5
Substrate Type	SMI 8W
Heatsink Rth (K/W)	2.5
Forward Current (A)	0.8
Optics Efficiency	0.8
Driver Efficiency	1

SIMULATE

RESULTS	
Highest Tj (degC)	**47.55**
Highest Ts (degC)	**43.33**
Total System Power Consumption (W)	**11.71**
Total System Luminous Flux (lm)	**1302**
Total Luminous Flux from LEDs (lm)	1628
Total System Optical Power (mW)	3971
Total Optical Power from LEDs (mW)	4964
Total System Lumens/Watt (lm/W)	111.2
Total Lumens/Watt from LEDs (lm/W)	139

10,7 W mért adat

1339 lm mért adat

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Összefoglalás

- Paradigmaváltás várható a lámpatesttervezés folyamatában
  - Delphi4LED: digitalizáció az Ipar 4.0 jegyében ➔ virtuális prototípusok
  - Új munkafolyamatok KKV-k és nagyvállalatok számára, az általuk megszokott szimulációs / számítási környezeteket feltételezve
    - Excel applikáció
    - LT Spice modellek, CFD eszközökbe ágyazott modellek

- A lapka és tok szintű LED kompakt modellek elterjedése várható, a lámpatestek (kompakt) termikus modellezésével együtt
- A Delphi4LED kompakt modelleken alapuló virtuális prototípusainak felhasználásával 30-40% tervezési idő és költségmegtakarítás prognosztizálható

http://www.delphi4LED.eu

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Köszönetnyilvánítás

A Delphi4LED projekt

az Európai Unió H2020-as keretprogramja,
ECSEL Közös Kezdeményezése

és

a Nemzeti Kutatási és Innovációs Alap

ECSEL Joint Undertaking

NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL
AZ INNOVÁCIÓ LENDÜLETE

AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT

társfinanszírozásával valósul meg

a **H2020 ECSEL RIA 692465** sz. és a **NEMZ_16-1-2017-0002** sz. támogatási szerződések keretén belül.

Delphi4LED

www.Delphi4LED.org

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019

Köszönöm a figyelmet

© BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2019