

# LED apšvietimas - norintiems žinoti daugiau

Apšvietimo sektoriuje didelę revoliuciją sukėlė kietakūnių šviesos šaltinių technologija (angl. *solid-state lighting*). Ši technologija grindžiama puslaidininkiniais šviesos diodais, arba LED (angl. *light-emitting diode*). Kietakūnis apšvietimas, arba paprasčiau - LED apšvietimas, užima vis didesnę rinkos dalį, randa pritaikymą vis įvairesnėse srityse ir turi didžiulį potencialą tiek šviesos prietaisų funkcinių galimybių plėtroje, tiek energijos taupymo ir ekologijos srityse.



## 1. Šviesos diodo atsiradimas, sandara ir veikimo principas

Dar 1907 m. silicio karbido (SiC) kristale buvo pastebėtas elektroluminescencijos efektas. Šis reiškinys buvo suprastas tik 1951 m. remiantis p-n sandūros teorija. Tobulinant puslaidininkinius kristalus ir technologijas pirmasis komercinis infraraudonosios spinduliuotės šviesos diodas pasirodė 1962 m. Tie patys metai siejami ir su regimosios spinduliuotės šviesos diodo atsiradimu (R. N. Hall'o GaAs lazerinis diodas). Nuolat buvo ieškoma šviesos diodams tinkamų medžiagų, nes tuo metu naudoti GaAs, GaP, AlGaAs junginiai netenkinavo sąlygų didelio skaisčio šviesos diodų gamybai. XXI a. pradžioje susintetinus AlGaInP kristalus pagaminti pirmieji didelio skaisčio raudonos, oranžinės ir geltonos spinduliuotės šviesos diodai. Netrukus buvo susintetinta medžiaga (galio nitridas, GaN) tinkama trumpesniųjų bangų spinduliuotei. Iš šios medžiagos junginių (GaN bei InGaN) pagaminti didelio skaisčio žali, žaliai mėlyni, mėlyni ir violetiniai šviesos diodai. Tokiu būdu buvo gauti praktiškai visą regimosios spinduliuotės spektrą dengiantys puslaidininkiniai šviesos šaltiniai.

Nepaisant to, kad šviesos diodų gamyboje naudojamos įvairios puslaidininkinės medžiagos, jų veikimo principas praktiškai tas pats - šie šviesos šaltiniai veikia dėl injekcinės elektroluminescencijos. Tai yra dirbtinis šviesos generavimo principas ir galimas tik puslaidininkinėse medžiagose, kuriose yra tam tikra tvarka sudarytos  $p$  (skylinio) ir  $n$  (elektroninio) laidumo sritys. Spinduliuotė gaunama per šią  $p$ - $n$  sandūrą tekant elektros srovei, tiksliau - aktyvioje šios sandūros terpėje spinduliniu būdu rekombinuojant nepusiausviriesiems krūvininkams. Spinduliuojamos šviesos bangos ilgis (spalva) priklauso nuo draustinio juostų tarpo (angl. *band-gap*) tarp  $p$  ir  $n$  laidumo puslaidininkių, kitaip tariant, nuo energijos, kurią rekombinacijos metu krūvininkas išspinduliuoja fotono pavidalu. Taigi, naudojant medžiagas, turinčias skirtingus draustinės juostos tarpus, gausime skirtingus spinduliuotės bangos ilgius.

Realizuoti baltą šviesą emituojančius šviesos diodus yra kiek sudėtingiau. Baltos šviesos spektras yra daug platesnis su sąlyginai siaurais spalvotų diodų spektrais. Baltą šviesą išgauti galima tik maišant spalvas. Todėl kuriant kietakūnius baltos šviesos šaltinius galima maišyti raudonus, žalius, mėlynius (RGB); raudonus, gintarinius, žalius, mėlynius (RAGB) ar kitus šviesos diodus.

Tačiau paprastai bendrajame apšvietime naudojami konversijos fosfore šviesos diodai. Konversija fosforuose - tai toks pat principas, kuris naudojamas ir fluorescencinėse lempos, kur aukštesnę energiją turinti ultravioletinė spinduliuotė fosforuose yra verčiama į žemesnę energiją turinčią matomą spinduliuotę. Dažniausiai baltuose šviesos dioduose yra naudojama dalinė šviesos konversija fosfore. Tokie šviesos diodai yra pagaminti naudojant trumpabangę (gilią mėlyną - 450 nm) šviesą emituojantį kristalą ir vieną ar kelis fosforus, kurie spinduliuoja geltonai žalioje- raudonoje srityje. Šiais fosforais būna padengtas puslaidininkinis kristalas arba naudojama nutolusio fosforo (*angl. remote-phosphor*) technologija.

Šiuo metu rinkoje populiarios iš kelių ar keliasdešimt kristalų sudaryti šviesos diodų telkiniai. Taip pat gaminami ir daugiaspalviai šviesos diodai, kurie sudaryti iš kelių skirtingus bangos ilgius spinduliuojančių kristalų.

## **2. Pagrindinės šviesos diodų savybės**

### **2.1. Ilgaamžiškumas (šviesinė išlaika)**

Ilgaamžiškumas - vienas svarbiausių šviesos diodų parametrų ir vienas didžiausių pranašumų lyginant šviesos diodus su kitais dirbtiniais šviesos šaltiniais. Skirtingai nuo kaitinamųjų, fluorescencinių ar išlydžio lempų, kurios charakterizuojamos gyvavimo trukme iki perdegimo (visiško prietaiso sugedimo), šviesos diodų veikimo trukmė nusakoma veikimo trukme iki tam tikros šviesinės išlaikos, t.y. tam tikros išlikusios pradinės šviesos srauto dalies. Šviesos diodams nėra būdingas katastrofiškas sugedimas, o šviesos srauto mažėjimas susijęs su tam tikrais degradacijos procesais puslaidininkiniame kristale ir šviesos diodą dengiančiame lęšiuke. Šiuo metu dar nėra priimta vieningo standarto nusakyti šviesos diodų ilgaamžiškumą, tačiau paprastai šviesos diodų ilgaamžiškumas nusakomas veikimo laiku per kurį šviesos srautas sumažėja iki 70% pradinio srauto.

Vienų patikimiausių ir didelę rinkos dalį užimančių šviesos diodų Luxeon Rebel deklaruojamas veikimo laikas yra 50 000 val., kai maitinimo srovė 1000 mA, o kristalo sandūros temperatūra 135°C. Ne visi šviesos diodai, kurie gaminami iš tų pačių medžiagų, turi tokį patį ilgą veikimo laiką. Tai priklauso nuo kristalų auginimo kokybės ir technologijų, todėl norint įsigyti kokybišką gaminį, reikėtų rinktis patikimą gamintoją.

Pažymėtina, kad šviesos diodų spinduliuojamas srautas mažėja palaipsniui, o pasibaigus deklaruojamam veikimo laikui, šviesos diodas vis dar veikia, tačiau norint didesnio efektyvumo, šviesos diodus galima pakeisti naujais.

### **2.2. Šviesos kokybė**

Šviesos kokybės nustatymas paprastai taikomas baltos šviesos šaltiniams ir yra susijęs su šių šaltinių gebėjimu atkurti spalvas. Nepaisant to, kad šviesos diodų spektras skiriasi nuo kaitrinių ar liuminescencinių lempų spektro, jiems vis dar taikoma Tarptautinės apšvietimo komisijos (CIE) 1995 metais patvirtinta metodika, kuri remiasi spalvos skirčių įvertinimu keturiolikai Munsello spalvinių bandinių apšvietus juos testuojamu ir etaloniniu šviesos šaltiniu. Gautas suminis rezultatas, žymimas  $R_a$  simboliu, baltiems šviesos šaltiniams paprastai yra 0-100 ribose. Šis parametras vadinamas spalvų atgavos rodikliu (*ang. color rendering index, CRI*) ir kuo jis yra arčiau 100, tuo šviesos šaltinis geriau atkuria spalvas. Pažymėtina, kad etaloninio šviesos šaltinio (kaitinamosios arba halogeninės lempos),  $R_a = 100$ , tuo tarpu aukšto slėgio natrio lempos  $R_a = 24$ .

### 2.3. Spalvinė temperatūra

Dar vienas labai svarbus baltų šviesos šaltinių parametras - spinduliuojamos šviesos spalvinė temperatūra. Šis parametras tinka apibūdinti šviesos šaltinius, kurių spinduliuotės spektras yra artimas juodojo kūno spinduliuotės spektrui. Šviesos diodų ar fluorescencinių lempų spalvinės koordinatės nėra tiksliai ant Planko lanko, kuris nurodo juodojo kūno spinduliuotės koordinatės, todėl tokie šaltiniai apibūdinami koreliuotąja spalvine temperatūra (*angl. correlated color temperature - CCT*). Spalvinė temperatūra matuojama temperatūros matavimo vienetais kelvinais (K) ir yra siejama su juodojo kūno temperatūra jam spinduliuojant tam tikro atspalvio šviesą. Keletas standartinių šviesmenų spalvinės temperatūros verčių: volframas ties 2790 K (kaitinamoji lemputė) - 2856 K, tiesioginė saulės šviesa - 4874 K, dienos šviesa - 6500 K.

Dirbtiniame apšvietime naudojami šviesos šaltiniai paprastai skirstomi į tam tikras grupes pagal koreliuotosios spalvinės temperatūros vertes: šiltai balta šviesa (2200 - 3000K), neutrali balta šviesa (3000 - 4500K), šaltai balta šviesa (4500 - 6500K).

Žmogaus regos sistema per milijonus metų prisitaikė prie natūralios (saulės) šviesos, todėl svarbu žinoti apie šios šviesos savybes ir į jas atsižvelgti kuriant dirbtinį apšvietimą. Viena iš žmogaus regos ypatybių yra apibrėžta Kruithofo kreive, kuri nurodo kokiose ribose esant tam tikrai apšvietimui ir spalvinei temperatūrai žmogus jaučiasi komfortiškai. Palyginimui galima paimti silpną žvakės šviesos sukuriama šilto atspalvio (žemos spalvinės temperatūros) apšvietimą ir palyginti su labai intensyvia, aukštos spalvinės temperatūros saulės sukuriama apšvieta dienos metu (abiems atvejais žmogus jaučiasi komfortiškai).

Lyginant su kitais dirbtinės šviesos šaltiniais, kurie neturi galimybės valdyti šviesos parametru, šviesos diodai yra puiki priemonė gauti įvairias spalvinės temperatūros vertes ir valdyti šviesos intensyvumą. Taip pat, šviesos diodai turi dideles trumpabangės (mėlynos) šviesos valdymo galimybes. Mėlyna šviesa stipriai veikia žmogaus cirkadinį ritmą (biologinius procesus) ir yra atsakinga už hormono melatonino gamybą. Atsižvelgiant į šiuos dėsningumus, svarbu pasirinkti tinkamą dirbtinį apšvietimą. Paprastai gyvenamosioms patalpoms, miegamiesiems yra rekomenduojama šiltos spalvos apšvietimas, darbo patalpoms - šaltos ar neutraliai baltos šviesos.

### 2.4. Šviesinis našumas

Šviesos diodai - vieni našiausių šviesos šaltinių. Laboratorijos sąlygomis jau yra pasiektas 254 lm/W šviesinis našumas baltai šviesai. Komerciniai šviesos diodai, priklausomai nuo spalvinės temperatūros, pasižymi 65-120 lm/W šviesiniu našumu.

Palyginimui: kaitinamosios 100W lempos šviesinis našumas apie 14 lm/W, fluorescencinių lempų (priklausomai nuo galios) - 40-100 lm/W, gatvių apšvietime naudojamų aukšto slėgio natrio lempų (priklausomai nuo galios) - 85-150 lm/W.

Taigi, šviesos diodai ženkliai našesni už kaitinamąsias bei halogenines lempas, tačiau šiuo metu stipriai konkuruoja ir su kitais palyginti našiais šviesos šaltiniais.

Pažymėtina, kad galutinio gaminio (lempos, ar šviestuvo) šviesinis našumas būna mažesnis dėl elektros energijos nuostolių maitinimo šaltinyje, neoptimalios veikimo temperatūros, šviesos nuostolių optinėje sistemoje (įvairiuose lęšiuose ar reflektoriuose, atsispindint nuo stiklo ir t.t.). Tačiau naudojant šviesos diodus, kurie yra kryptiniai šviesos šaltiniai, šviesos optinėje sistemoje prarandama santykinai mažiau lyginant su įprastomis kaitinamosiomis, fluorescencinėmis ar natrio lempomis.

## 2.5. Kitos šviesos diodų savybės

- Šviesos diodai pasižymi ypač greitu įsidegimu - paprastai tai kelios nanosekundės. Ši savybė labai naudinga šviesos srauto valdyme. Taip pat, tai labai didelis privalumas sceniniame apšvietime, automobilių šviesos signaluose, LED televizoriuose ir kitur.
- Šviesos diodai savo spinduliuotėje neturi nepageidaujamos ultravioletinės (UV) ir infraraudonosios (IR) spinduliuotės. Apšvietime naudojamų diodų šviesos spektras yra 380 - 780 nm ribose, t.y. žmogaus akims matomoje srityje.
- Šviesos diodai puikiai veikia esant žemai ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) temperatūrai. Be to, šviesos diodų spinduliuotės srautas priklauso nuo temperatūros - kuo žemesnė temperatūra, tuo didesnis išskiriamas srautas esant tai pačiai maitinimo srovei. Pvz. šviesos diodo sandūros temperatūrai sumažėjus nuo  $+75^{\circ}\text{C}$  iki  $-25^{\circ}\text{C}$ , šviesos srautas gali padidėti apie 30-40%. Tai yra susiję su spindulinės rekombinacijos koeficiento kitimu, krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybe nuo temperatūros ir nuo kitų fizikinių procesų. Tuo tarpu fluorescencinės lempos yra optimizuotos naudoti kambario temperatūroje ir jų šviesos srautas stipriai mažėja mažėjant ant didėjant temperatūrai. Pvz. esant  $-15^{\circ}\text{C}$  temperatūrai šviesos srautas tēra apie 30% optimalaus srauto, o esant  $60^{\circ}\text{C}$  - apie 70%.
- Dėl šviesos diodų konstrukcinių ypatumų jų veikimui jokios įtakos neturi vibracijos, taigi LED apšvietimą labai patogu naudoti judančiuose įrengimuose, mašinose ar automobiliuose. Taip pat, nereikia jaudintis dėl šviestuvo sugedimo jį atsitiktinai pajudinus, kai tuo tarpu, kaitinamųjų lempų volframo siūlelis yra ypač jautrus vibracijoms.
- Šviesos diodai, skirtingai nei kiti įprasti šviesos šaltiniai, turi labai plačias šviesos srauto intensyvumo valdymo galimybes. Šviesos intensyvumas valdomas keičiant per šviesos diodą tekančios srovės stiprį. Šviesos srauto priklausomybė nuo tiesioginės maitinimo srovės yra beveik tiesinė, tuo tarpu šviesos diodo šviesinis našumas mažinant maitinimo srovę didėja. Tai yra susiję su mažesne kristalo temperatūra, sumažėjusia tiesiogine maitinimo įtampa ir kitais reiškiniais. Tuo tarpu fluorescencinių, kaitinamųjų ar aukšto slėgio natrio lempų šviesinis našumas ženkliai krenta mažinant maitinimo galią, todėl šių lempų temdymas (srauto mažinimas) nėra ekonomiškąs sprendimas.
- Šviesos diodų srauto valdymo galimybė labai plačiai naudojama kuriant daugiaspalvius šviesos šaltinius. Paprastai tokie šviesos šaltiniai būna sudaryti iš 3-4 skirtingų spalvų šviesos diodų. Naudojant tokius šviesos šaltinius spalvų maišymo metodu galima išgauti praktiškai bet kurią spalvą, atspalvį ar bet kurios spalvinės temperatūros baltą šviesą. Tai naudojama dekoratyviniame, akcentiniame apšvietime, LED televizoriuose bei tokiose nišinėse apšvietimo srityse kaip meno dirbinių, prekių apšvietimas ar medicinoje siekiant gauti spalvų sodrinimo, blukinimo ar kitus efektus.
- Šviesos diodai ekonomiškumu pasižymi ne vien dėl didelio šviesinio našumo. Tam tikrose srityse, kuriose nebūtinai yra reikalinga baltos spalvos spinduliuotė, šviesos diodų ekonomiškumas dar labiau jaučiamas, nes generuojama tik tokio bangos ilgio šviesa, kuri yra reikalinga tam tikrai apšvietimo sričiai. Tuo tarpu naudojant įprastinius šviesos šaltinius dalis šviesos yra nufiltruojama. Spalvotų šviesos diodų privalumai plačiai naudojami šviesos signaluose, taip pat augalininkystėje, kur šviesos spektras parenkamas pagal chlorofilo ir kitų pigmentų sugerties spektrus. Šiuo metu spalvoti šviesos diodai pradėti taikyti ir mezopinei žmogaus regai ( $0,001 - 10 \text{ cd/m}^2$ ), t.y. pereinamojoje srityje tarp fotojonės ir skotopinės regos.
- Šviesos diodai yra kryptiniai šviesos šaltiniai. Jų šviesos sklaidos kampas dažniausiai būna apie  $120^{\circ}$  (kampinė diagrama artima lambertinei). Dėl šios priežasties labai patogu valdyti šviesos kryptingumą, gauti norimą kryptinę diagramą ar tolygią apšvietą su minimaliais šviesos srauto

nuostoliais optinėje sistemoje. Šiuo metu gaminami šviesos diodai ir su šikšnorparnine, šonine ar siauro kampo kampine diagrama.

- Dar vienas neabejotinas šviesos diodų privalumas - žema maitinimo įtampa. Šviesos diodui, priklausomai nuo naudojamų puslaidininkinių medžiagų, pakanka 2-3,5 V tiesioginės įtampos, todėl jungiant juos įvairiais būdais į nuoseklias ar lygiagrečias grandines, galima gauti optimalią maitinimo sistemą. Tai ypač aktualu taikymuose, kur reikalinga saugi žema įtampa arba naudojant fotovoltinius (saulės baterijų) elementus ar akumuliatorius. Pažymėtina, kad šviesos diodas yra srovės įtaisas, todėl jiems maitinti naudojami ne įtampos, o specialūs stabilizuotos srovės šaltiniai.
- Šviesos diodai, skirtingai nei gyvsidabrio garų (liuminescencinės) lempos, neturi kenksmingų ar pavojingų aplinkai medžiagų, todėl juos eksploatuoti galima nesibaiminant.
- Kaip jau minėta, šviesos diodų ilgaamžiškumas yra labai didelis (6-8 ir daugiau metų nepertraukiamo veikimo), todėl jų praktiškumas ir ekonomiškumas dar labiau išryškėja LED apšvietimą naudojant sunkiai pasiekiamose, aukštose vietose, kur lempų keitimas ar sistemos priežiūra tradicinio apšvietimo atveju sudaro nemenką apšvietimui išleidžiamų pinigų dalį. LED apšvietimo sistemų ilgaamžiškumui turi įtakos tinkamo maitinimo šaltinio parinkimas bei šviesos diodų aušinimo užtikrinimas, todėl patariama rinktis patikimus ir kokybiškus LED gaminius bei atkreipti dėmesį į suteikiamą garantiją ir pogarantinį aptarnavimą.

### Tendencijos

LED apšvietimo technologija nuolat ir sparčiai tobulėja, kuriamos naujos medžiagos ir technologijos siekiant padidinti šviesos diodų šviesinį našumą. Šiuo metu maksimalus komercinių baltos šviesos diodų šviesinis našumas sudaro apie 50% teorinių baltos šviesos generavimo galimybių, kai tuo tarpu fluorescencinių ar natrio lempų našumo didinimo techninės galimybės praktiškai išsemtos, o kaitinamųjų lempų gamyba ir naudojimas palaipsniui draudžiami įstatymu (ES šalyse draudžiama 100 W kaitinamųjų lempučių prekyba).

1 lentelėje pateikiamos mokslininkų prognozės apie šviesos diodų šviesinio našumo ir ekonominio atsiperkamumo parametrus ateinantiems 5-10 metų.

1 lentelė. Šviesos diodų šviesinio našumo ir ekonominių parametrų 5-10 metų prognozė pagal Haitz ir Tsao (2010).

Metai	Spalvinė temperatūra	Šviesinis našumas lm/W	Šviesos šaltinio kaina \$/klm	Elektros energijos kaina \$/kWh	Atsipirkimo laikas lyginant su kaitinamosiomis lempomis veikimo laikas valandomis	Atsipirkimo laikas lyginant su fluorescencinėmis lempomis veikimo laikas valandomis
	Šaltai balta	150				
2015	Šiltai balta	125	5	0,15	500	2000
	Šaltai balta	180				
2020	Šiltai balta	150	2,5	0,2	200	800

Įvertinus visus LED apšvietimo privalumus ir galimybes, elektros energijos kainos didėjimo tendencijas, bei technologijų progresą, galime drąsiai teigti, kad LED apšvietimo technologija jau keičia mūsų požiūrį į apšvietimą plačiąja prasme bei sudaro visas prielaidas ją vadinti šiuo metu pažangiausia apšvietimo technologija.