



UVOD

- Ograničenost izvora energije i stanje životne sredine
- Jedna petina proizvedene električne energije se troši na osvjtljenje
- Primjena izvora svjetlosti:
 - medicina (sterilizacija, hirurške intervencije, estetska medicina)
 - umjetnost
 - priprema hrane
 - javna bezbjednost

Dva veoma značajna pitanja na globalnom nivou su izvori energije i njihova održivost i sve lošije stanje životne sredine.

Kako se velika količina energije troši upravo za osvjtljenje, jednostavno je procijeniti značaj tehnologije izvora svjetlosti kako sa ekonomskog tako i sa aspekta životne sredine.

Svjetlost je vitalna za život ljudi, a izvori svjetlosti imaju nezamjenjivu ulogu u svakodnevnom životu. Kvalitet urbanog života, aspekti tipa zdravlja, javne bezbjednosti, kulture zavise od kvaliteta svjetlosti.

Od sredine XIX vijeka, razvijaju se različite metode generisanja svjetlosti upotrebom električne energije, što je veoma povoljno uticalo na unaprjeđenje kvaliteta života ljudi.

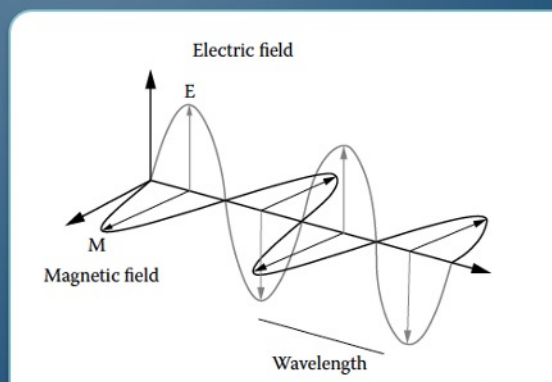
PRIRODA I SVOJSTVA SVJETLOSTI

PRIRODA
SVJETLOSTI

KORPUSKULARNA

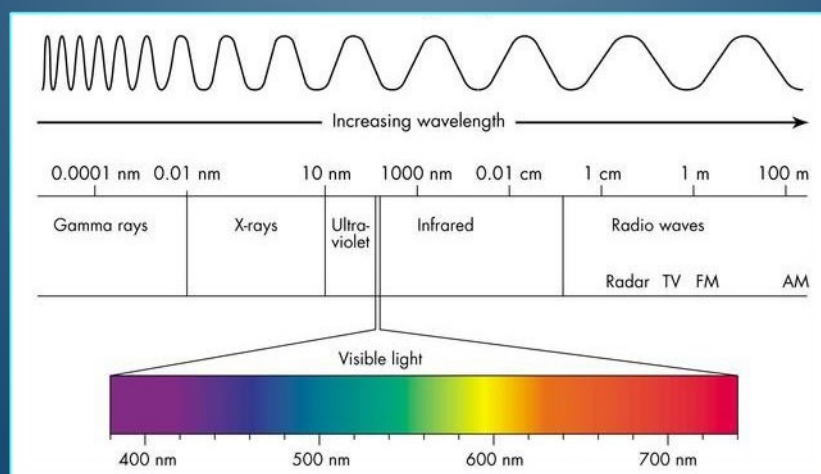
TALASNA

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



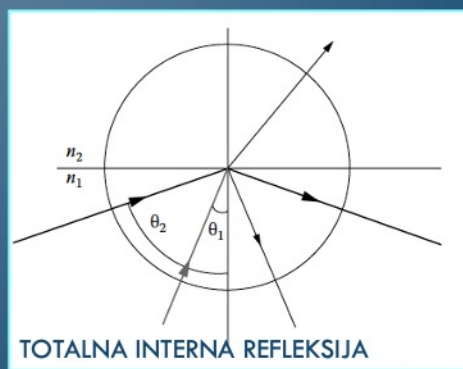
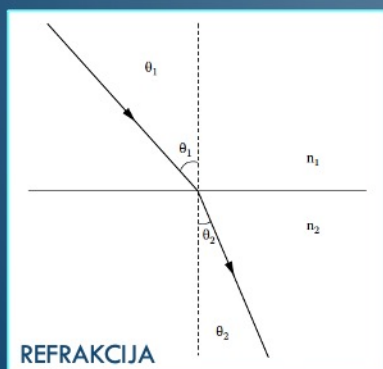
Polovinom XVII vijeka naučnici su imali podijeljeno mišljenje o prirodi svjetlosti. Jedni su smatrali da je svjetlost korpuskularne prirode (*Newton*), dok su drugi podržavali talasnu prirodu svjetlosti (*Christian Huygens*). "Sukob" je riješen početkom XX vijeka, kada su *Albert Einstein* i *Louis de Broglie* uveli novu sliku kvantne fizike ukazujući na dualnu prirodu materije i energije na nivou atoma. Serija eksperimenata je pokazala da se fotoni ponašaju kao čestice, kako je demonstrirano fotoelektričnim efektom i rasijanjem, ali i kao talasi. U smislu talasne prirode svjetlosti, svjetlost se može definisati kao elektromagnetni talas koga karakteriše intenzitet, talasna dužina i polarizacija. Elektromagnetni talasi su transverzalni talasi gdje su oscilacije upravne na pravac prostiranja talasa, opisani *Maxwell*-ovim jednačinama. Električno polje koje se mijenja u vremenu kreira magnetno polje i obratno. Ova dva polja osciluju upravno jedno na drugo. Bez obzira na talasnu dužinu, brzina prostiranja svjetlosnog talasa u vakumu je konstantna i iznosi 299 792 458 m/s.

PRIRODA I SVOJSTVA SVJETLOSTI



Elektromagnetni spektar se prostire od radio talasa sa talasnom dužinom reda nekoliko kilometara do kosmičkih zraka čija talasna dužina iznosi reda 10^{-10} m. Vidljiva svjetlost je samo mali dio elektromagnetnog spektra na koji je ljudsko oko osjetljivo i uključuje talasne dužine od oko 390 nm do oko 780 nm. Na strani nižih energija, čitav spektar počinje radio talasima kojima se prenose slike i zvuk (radio, televizija), preko mikrotalasa (radari, mikrotalasne pećnice), do infracrvenih zraka koje osjećamo kao toplotu. Na strani viših energija sa manjim talasnim dužinama su UV zraci. Postoje tri grupe UV zraka: UVA (315 nm do 400 nm), UVB (280 nm do 315 nm) i UVC (100 nm do 280 nm). UVC zrake u potpunosti apsorbiraju ozonski omotač.

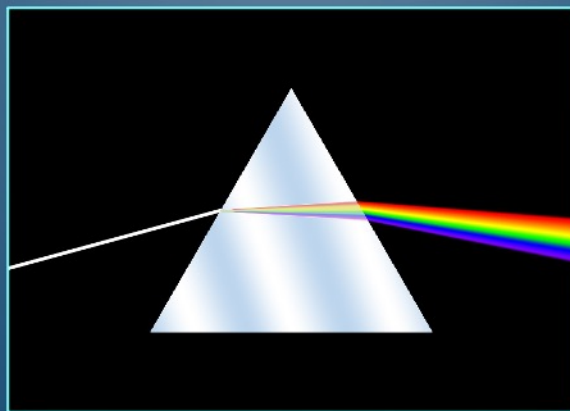
PRIRODA I SVOJSTVA SVJETLOSTI



U toku propagacije, može doći do odbijanja svjetlosti. Mjeru refleksije određuje vrsta reflektujućeg materijala. Srebro i aluminijum se najčešće koriste kao reflektujući materijali. Od ostalih svojstava svjetlosti, izdvajaju se refrakcija (prelamanje) i interferencija.

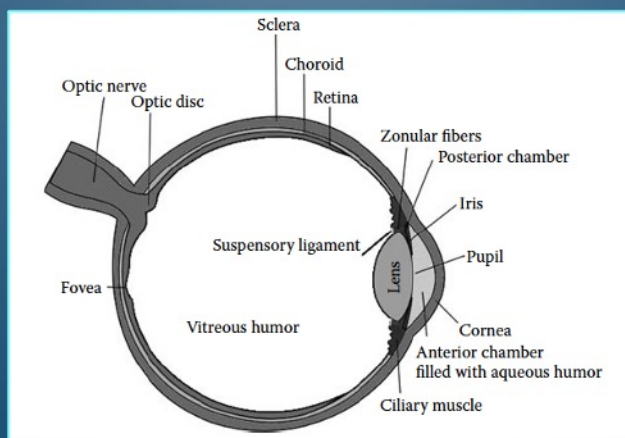
Princip refrakcije (prelamanja) se sastoji u promjeni pravca prostiranja i brzine svjetlosti prilikom prelaska iz jedne optičke sredine u drugu, pri čemu su n_1 i n_2 indeksi prelamanja koji se odnose na optičku gustinu sredine i zavise od talasne dužine svjetlosti (dispersija svjetlosti). Svjetlost veće talasne dužine “manje usporava” i “manje mijenja pravac” u odnosu na svjetlost manje talasne dužine. Optička vlakna koriste princip totalne interne refleksije. Naime, ukoliko je upadni ugao svjetlosti iznad određene vrijednosti, neće doći do prelamanja svjetlosti, već do potpune refleksije. Do ove pojave može doći ukoliko se talas prostire iz sredine veće optičke gustine prema sredini manje optičke gustine (iz stakla prema vazduhu).

PRIRODA I SVOJSTVA SVJETLOSTI



Na slici lijevo je prikazana disperzija bijele svjetlosti kroz prizmu. Svaka boja se prelama pod različitim uglom zbog različite talasne dužine, što rezultira razdvajanjem boja.

VIZIJA

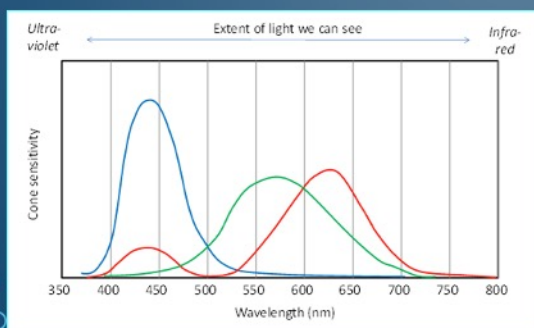


Ljudsko oko funkcioniše slično kameri. Dužica oka kontroliše količinu upadne svjetlosti, dok sočivo fokusira i projektuje sliku. Aktiviraju se određeni senzori, i slika se uz pomoć neurotransmitera prenosi prema mozgu na procesiranje. Do problema sa vidom (između ostalih) dolazi i kada se svjetlost izvora ne fokusira na tačno odgovarajuću tačku oka.

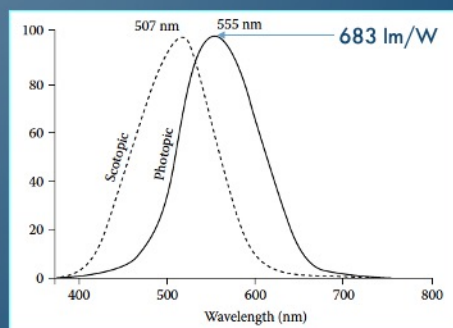
Svjetlost prolazi kroz rožnjaču, zjenicu, dužicu, sočivo, staklasto tkivo (*virteous humor*), retinu, optički nerv, okcipitalni korteks, i napokon stiže do mozga, gdje se obrađuje primljena informacija. Na slici je prikazana anatomija ljudskog oka.

Ljudsko oko ima dva tipa fotoreceptorskih ćelija: štapićaste (cilindrične) i kupaste. Kupaste ćelije su odgovorne za percepciju boja. Postoje tri grupe kupastih ćelija za tri različita dijela vidljivog dijela spektra. Štapićaste ćelije su osjetljive na intenzitet svjetlosti i aktiviraju se više u mraku. Štapićaste ćelije su osjetljivije i brže od kupastih ćelija. Boja se dalje zasniva na nijansi (*hue*) i zasićenju (*saturation*). Oko, kao fotoreceptor, je osjetljivo samo na uzak opseg elektromagnetnog spektra (vidljiva svjetlost) od 390 nm (ljubičasta) do 780 nm (crvena).

VIZIJA



Osjetljivost svake od grupa kupastih ćelija



Funkcija spektralne svjetlosne efikasnosti $V(\lambda)$

Na slici lijevo je prikazana osjetljivost svake od grupa kupastih ćelija.

Kupaste ćelije su fotoreceptorske ćelije u retini oka koje funkcioniraju najbolje u uslovima veće osvijetljenosti. Ove ćelije postaju sve rjeđe prema periferiji retine. Kupaste ćelije su manje osjetljive u odnosu na štapićaste na intenzitet svjetlosti, ali su osjetljive na boje. Na slici desno je prikazana osjetljivost ljudskog oka u uslovima različitog osvjetljenja.

Fotopična vizija je vizija oka u uslovima dobrog osvjetljenja. Kod ljudi i mnogih životinja fotopična vizija omogućava percepciju boja, posredstvom kupastih ćelija.

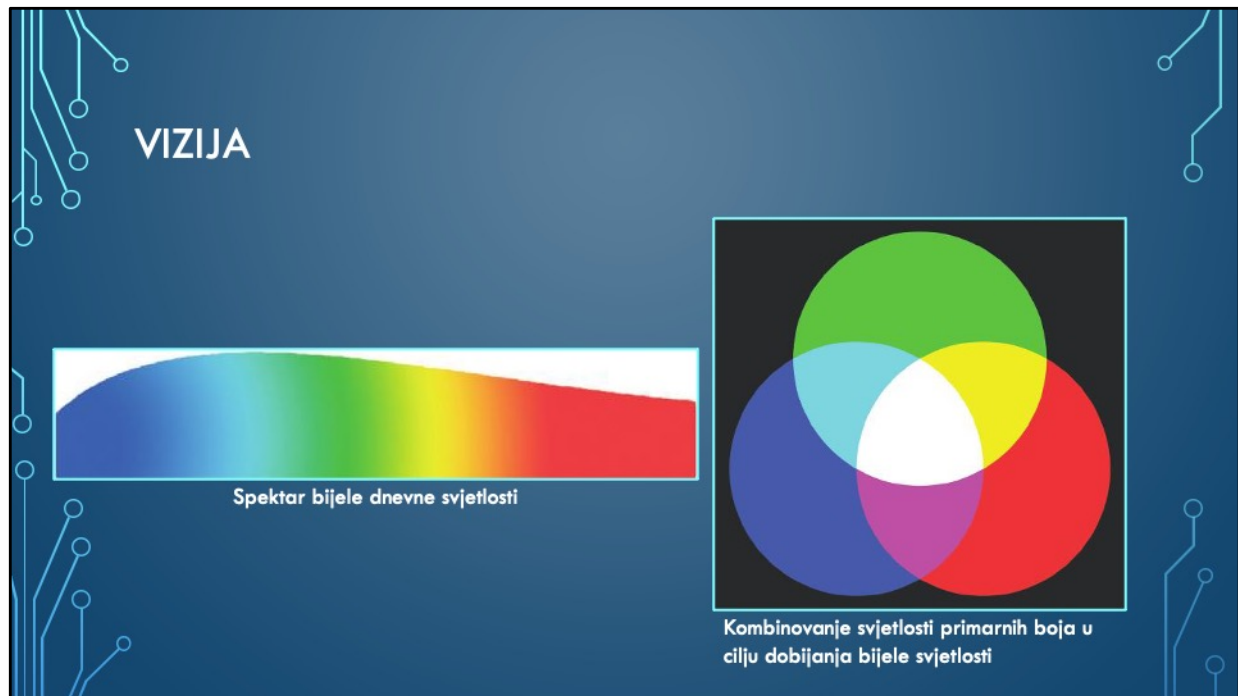
Skotopična vizija je vizija oka u uslovima slabe osvijetljenosti. Skotopična vizija je rezultat štapićastih ćelija koje su najosjetljivije na talasne dužine oko 500 nm (zeleno-plava) i neosjetljive na veće od oko 640 nm (crveno-narandžasta). Postoje životinjske vrste koje razlikuju boje u uslovima slabe osvijetljenosti.

Mezotopična vizija se vezuje za uslove srednje osvijetljenosti kao kombinacija fotopične i skotopične vizije. Upravo se mezotopična vizija koristi u cilju štednje električne energije u sistemima za uličnu rasvjetu.

U fotopičnim uslovima, osjetljivost ljudskog oka ima maksimum na 555 nm. Kako se osvjetljenje smanjuje, maksimum osjetljivosti se pomjera ka manjim talasnim

dužinama. Maksimalna osjetljivost ljudskog oka u skotopičnim uslovima je na 507 nm. Krive prikazane na slici desno se označavaju kao funkcija spektralne svjetlosne efikasnosti $V(\lambda)$, a opisuju „odziv“ tipičnog ljudskog oka na svjetlosnu pobudu. Ne postoji ekvivalentan standard za mezotopični region još uvijek.

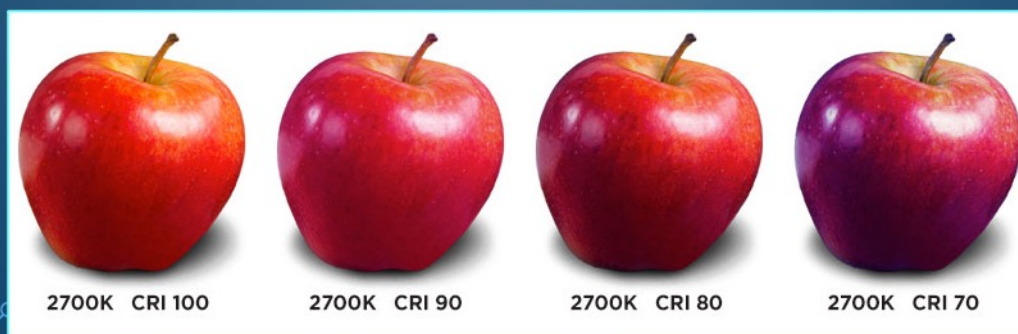
Pri maksimalnoj osjetljivosti za fotopičnu viziju na 555 nm, jednom watu emitovane svjetlosne snage od strane svjetlosnog izvora odgovara 683 lm. Dakle 683 lm/W je maksimalna vrijednost fotopične svjetlosne efikasnosti zračenja (koji dio snage elektromagnetnog zračenja je koristan kao osvjetljenje).



Bijela dnevna svjetlost se sastoji od svih boja, ili talasnih dužina, kako je prikazano kontinualnim spektrom, slika lijevo. Ipak, moguće je kreirati bijelu svjetlost uz pomoć samo jedne komponente tj. talasne dužine iz tri dijela spektra koji stimulišu svaku od tri grupe kupastih ćelija oka. Preciznije, impresija dnevne svjetlosti se može dobiti kombinacijom crvene, zelene i plave svjetlosti, slika desno.

KARAKTERISTIKE IZVORA SVJETLOSTI

- CRI (*Color Rendering Index*)

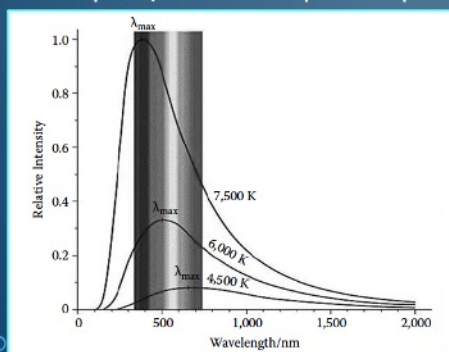


Maksimalna vrijednost CRI-a je 100. CRI = 100 se odnosi na izvor svjetlosti koji reprodukuje boje kao da je u pitanju bijela svjetlost. CRI = 0 se odnosi na izvor koji emituje monohromatsku svjetlost, dok se CRI = 100 odnosi na izvore koji emituju kontinualan spektar vidljivih boja. Što manje boja iz vidljivog dijela spektra pokriva izvor svjetlosti, CRI ima manju vrijednost.

Razlike u CR indeksu između dva izvora bijele svjetlosti dovode do fenomena koji se označava kao metamerizam (ista boja se vidi drugačije).

KARAKTERISTIKE IZVORA SVJETLOSTI

Svjetlosno zračenje crnog tijela u funkciji talasne dužine svjetlosti, za različite temperature tijela



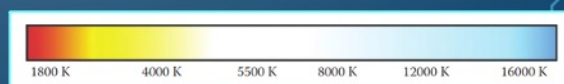
- Temperatura boje

- Wien-ov zakon:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, b = 2.897771955 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

- Stefan-Boltzmann-ov zakon:

$$E = \sigma T^4, \sigma = 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$



Osim pokrivenosti vidljivog dijela spektra, od velikog značaja za izvor svjetlosti je i intenzitet radijacije za pojedine djelove spektra. Na primjer, izvor svjetlosti koji emituje bijelu boju, ali sa crvenom svjetlošću većeg intenziteta nego plavom daje utisak toplije bijele. Ovo svojstvo se označava kao temperatura boje. Temperatura boje je u direktnoj vezi sa radijacijom apsolutno-crnog tijela.

Crno tijelo se definiše kao tijelo koje može da emituje svjetlost svih talasnih dužina, pri čemu procenat zračenja manje talasne dužine raste kako se povećava temperatura tijela. Dakle, temperatura boje izvora svjetlosti je temperatura izražena u Kelvinima na kojoj crno tijelo dobija istu boju koju emituje izvor. Ukoliko je temperatura boje manja od 3300 K, svjetlost koju emituje izvor se označava kao “topla”, dok je za temperature boje preko 5000 K boja izvora “hladna”. Ukupna energija oslobođena radijacijom opisana je *Stefan-Boltzmann*-ovim zakonom.

KARAKTERISTIKE IZVORA SVJETLOSTI

Izvor svjetlosti	CCT (K)	CRI
Živa (bez fosfornog sloja)	6410	17
Natrijum pod visokim pritiskom	2100	25 - 85
Topla bijela fluorescentna	2940	55 - 99
Hladna bijela fluorescentna	4080	55 - 99
Metal halogena	5400	70 - 90
Incandescentna	2700	100

Primjeri karakteristika nekih tipičnih izvora svjetlosti dati su u tabeli.

BIJELA SVJETLOST



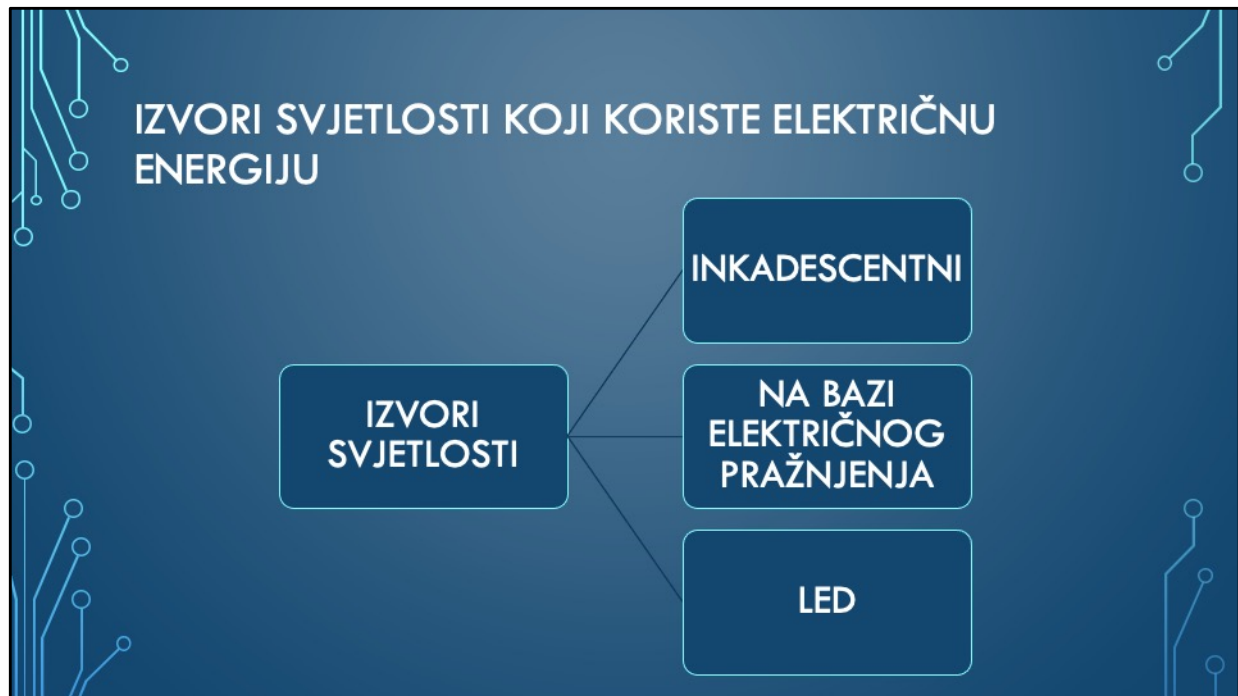
Ukoliko izvor emituje sve talasne dužine iz vidljivog dijela spektra, kao što je to slučaj kod inkandescentnih sijalica, spektar se označava kao kontinualan, i svjetlost je bijele boje. Kod ovakvih izvora svjetlosti CRI ima najveću vrijednost.

Kako je ljudsko oko najviše osjetljivo na tri primarne boje, izvor svjetlosti koji ima samo tri komponente (sa uskim varijacijama talasne dužine) crvenu, zelenu i plavu generisaće osjećaj bijele boje. Ovakav izvor svjetlosti odlikuje značajno niži CRI. Temperatura boje zavisi od udjela pojedinih komponenti vidljivog dijela spektra. Ukoliko je svjetlost iz crvenog dijela spektra intenzivnija, temperatura boje će biti reda 3000 K i riječ je o toploj bijeloj svjetlosti. Ukoliko plava svjetlost ima veći udio, temperatura boje je reda 5000 K i riječ je o hladnoj bijeloj svjetlosti.

Bijela svjetlost se može dobiti pobuđivanjem fosfora. Kako se dijagrami osjetljivosti oka na tri primarne boje preklapaju, slijedi da se žutom bojom mogu stimulirati senzori u oku za crvenu i zelenu boju. Drugim riječima, izvor koji emituje plavu i žutu svjetlost može poslužiti kao izvor bijele svjetlosti. Naravno, ovakav izvor bijele svjetlosti ima veoma nizak CRI. Kako je prisutna plava boja, riječ je o hladnoj bijeloj svjetlosti. Ovaj jednostavan metod generisanja bijele boje koristi se u LED tehnologiji (plava LED sa fosfornim premazom).

PARAMETRI IZVORA SVJETLOSTI

- **Svjetlosni fluks Φ** se definiše kao energija zračenja (količina svjetlosti) po jedinici vremena koju emituje svjetlosni izvor. Izražava se u lumenima [lm].
- **Intenzitet svjetlosti** (u datom smjeru) se definiše kao fluks emitovane svjetlosti po jedinici prostornog ugla. Jedinica je candela [cd].
- **Osvjetljaj** se definiše kao svjetlosni fluks po jedinici površine. Jedinica je lux [lx] = [lm/m²].
- **Svjetlosna efikasnost** – odnos generisanog svjetlosnog fluksa iz vidljivog dijela spektra i ukupne utrošene električne snage [lm/W].



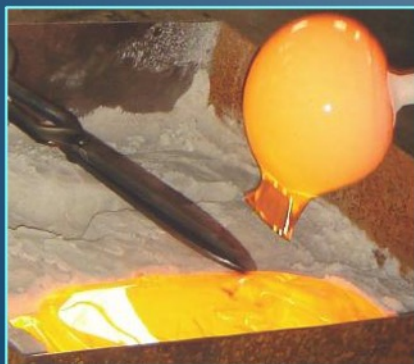
Postoje tri osnovne tehnologije generisanja svjetlosti upotrebom električne energije kao i veliki broj izvedenih grupa.

Prva tehnologija na bazi užarenog vlakna, inkadescencija razvijena je naporima *Heinrich Gobel*-a sredinom XIX vijeka, i *Joseph Swan*-a i *Thomas Edison*-a nekoliko godina kasnije.

Druga tehnologija, električno pražnjenje kroz gasove, razvijeno je početkom XIX vijeka zahvaljujući *Humphry Davy*-ju.

Treća tehnologija, diode koje emituju svjetlost, na bazi poluprovodnika, razvijena je mnogo kasnije, sredinom XX vijeka.

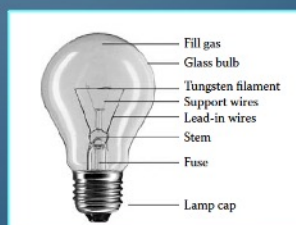
ELEKTRIČNI INKADESCENTNI IZVORI SVJETLOSTI



topljeno staklo emituje vidljivu svjetlost

Više od jednog vijeka inkadescentne sijalice su bile osnovni izvor vještačkog osvjetljenja. Iako se danas razmatra zabrana njihove upotrebe, još uvijek imaju značajnu ulogu u smislu osvjetljenja. Mnoge evropske zemlje su zabranile upotrebu ovih izvora svjetlosti, koja se ne odnosi na reflektorske lampe i halogene sijalice. Bazirane su na fenomenu inkadescencije. Princip se ne razlikuje od zračenja crnog tijela koje zrači svjetlost kako se zagrijava pokrivajući sve širi opseg vidljivog dijela spektra sa povećanjem temperature. Na slikama je prikazano topljeno staklo koje počinje da zrači u vidljivom dijelu spektra kako se temperatura povećava. Zagrijavanje se ostvaruje proticanjem struje kroz vlakno. Sa povećanjem temperature, elektroni provodnog vlakna prelaze na viši energetski nivo. Prilikom povratka u osnovno stanje, oslobađaju energiju emisijom fotona. Zahvaljujući kontinualnoj radijaciji, inkadescentne lampe imaju CRI = 100. Najveći dio zračenja je u infracrvenom dijelu spektra, i oko 90 % električne energije se gubi oslobađanjem toplote. Preostalih 10 % je uglavnom u crvenom dijelu spektra što svjetlost čini "toplijom". Slijedi da inkadescentne lampe veoma dobro reprodukuju boju osvijetljenog objekta. Međutim, one nisu nikako ekonomično rješenje kako njihova efikasnost ne prelazi 20 lm/W.

KONVENCIONALNE INKADESCENTNE LAMPE



spiralno vlakno
od tungstena

Ime koje se vezuje za otkriće inkadescentne lampe je *Thomas Alva Edison* i 1879. godina. Te godine *Edison* je prijavio patent za lampu sa karbonskim vlaknom. Ipak, naučna istraživanja koja predstavljaju osnov ovog otkrića trajala su čitav vijek. Početkom XX vijeka uveden je tungsten (volfram) kao materijal za sijalično vlakno. Razlog je veoma jednostavan, tungsten ima visoku tačku topljenja (3660 K), što je značajno iznad radne temperature konvencionalne inkadescentne lampe od 2800 K. Većim temperaturama odgovara veća efikasnost jer je veći dio svjetlosnog zračenja u vidljivom dijelu spektra, ali i kraći vijek trajanja. Postoje sijalice sa više vlakana. Kako bi se poboljšala efikasnost, nekada je vlakno spiralnog oblika.

Snaga lampe zavisi od radnog napona i otpornosti vlakna kada se zagrijava. Otpornost vlakna opet zavisi od njegove dužine i poprečnog presjeka. Za datu snagu lampe, napon i temperaturu, vlakno ima specifičnu dužinu i prečnik. Male razlike u otpornosti duž vlakna, koje su uglavnom uzrokovane malim razlikama u prečniku, rezultiraju generisanjem *hot-spot*-a. Tungsten isparava brže na mjestima *hot-spot*-a, što dovodi do dramatičnog smanjenja vijeka trajanja lampe.

Ukoliko dođe do pregrijavanja, potporne žice se tope (ponašaju se kao osigurači).

Lampa je pod vakumom, ili je ispunjena plemenitim gasom (jedinjenja argona i azota) niskog pritiska u cilju čuvanja vlakna od kiseonika (pregorijevanja) tj. produženja vijeka trajanja lampe.

Inkadescentne lampe mogu raditi na naponu od 1.5 V do 300 V. Prednost im je što mogu raditi na DC i AC napajanju, kao i niska proizvodna cijena.

Vijek trajanja im je u prosjeku 1000 h i veoma zavisi od radnog napona.

HALOGENE INKADESCENTNE LAMPE



halogena lampa sa reflektorima

Princip funkcionisanja je veoma sličan konvencionalnim inkadescentnim lampama, ali im je životni vijek duži. Ova prednost se zasniva na hemijskom balansu koji je postignut između vlakna od tungstena i halogenog gasa (brom ili jedinjenja broma). Upravo ovaj "balans" omogućava da radna temperatura bude veća nego u slučaju konvencionalnih inkadescentnih sijalica 3000 K – 3500 K u poređenju sa 2800 K, sa većom svjetlosnom efikasnošću reda 30 lm/W i većom temperaturom boje. Kako je radna temperatura veća, koristi se "čvršće" staklo kao na primjer kvarc. Dimenzije su manje, dok je vlakno deblje. Kvarc propušta UV zračenje, za razliku od običnog stakla, pa je potreban dodatni filter ukoliko ovo zračenje nije poželjno. Kao filter UV zračenja koristi se i posebno dopirano kvarcno staklo. Halogena lampa bez UV filtra se koristi kao izvor UV zračenja u specifičnim aplikacijama.

Važno je čuvati halogenu sijalicu od nečistoća (otisaka prstiju) jer se na taj način može oštetiti kvarc u uslovima visoke temperature.

Halogene lampe sa aluminijumskim reflektorima se mogu koristiti za usmjereno osvjetljenje.

Prednosti halogenih lampi su trenutno maksimalno osvjetljenje, kontrola osvjetljenja,

odsustvo štetnih materijala kao što je živa, vijek trajanja koji ne zavisi od frekvencije uključenja/isključenja.

U skorije vrijeme proizvode se i halogene lampe sa IRC (*Infrared Reflecting Coating*). Unutrašnji zid je presvučen IRC-om koji propušta vidljivu svjetlost, ali reflektuje dio infracrvene svjetlosti prema vlaknu, povećavajući na taj način temperaturu do željenog nivoa čime se povećava efikasnost i do 40 % kao i prosječni vijek trajanja do 5000 h.

Kao i kod konvencionalnih inkadescentnih lampi, životni vijek se značajno redukuje sa povećanjem napona. Povećanjem napona za 10 %, životni vijek se smanjuje u prosjeku 50 %.

Kako oslobađaju veliku količinu toplote u toku rada, koriste se i za grijanje u specifičnim primjenama.

LAMPE NA BAZI ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA



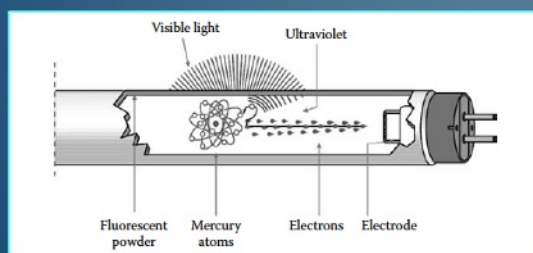
Sunce se sastoji od plazme vodonika



Intenzivna struja između oblaka i površine zemlje jonizuje molekule vazduha

Plazma, koja se često označava i kao četvrto stanje materije je zapravo jonizovani gas sa izuzetno interesantnim i korisnim svojstvima. Termin plazma je uveden 1927. godine od strane *Irving-a Langmuir* nakon što ga je gas koji sobom nosi elektrone velike brzine, jone i nečistoće podsjetio na krvnu plazmu koja nosi krvna zrnca. Stanje plazme je uobičajeno za spoljašnje slojeve atmosfere. Sunce se sastoji od plazme vrelog vodonika. Jedno od osnovnih svojstava plazme je emisija svjetlosti zahvaljujući kome je ovaj fenomen dobio veliku praktičnu primjenu.

FLUORESCENTNE LAMPE



prikaz lampe sa gasovitom živom niskog pritiska na bazi električnog pražnjenja



Ballast

1938. godine realizovana je prva fluorescentna lampa.

Lampe na bazi plazme sa gasovitom živom niskog pritiska su dominirale tržištem osvetljenja decenijama. Postižu efikasnost do 120 lm/W. Samo ih lampe na bazi pražnjenja sa natrijumom niskog pritiska prestižu sa svojih 200 lm/W.

Živa se intenzivno koristi za osvetljenje na bazi električnog pražnjenja bez obzira na svoju toksičnost. Prolazak elektriciteta kroz živu dovodi je u gasovito stanje (inicijalno je u tečnom stanju), dok sudaranje elektrona sa atomima žive rezultuje UV zračenjem na 254 nm. Ovo je najefikasniji način dobijanja svjetlosti do danas. UV zračenje se konvertuje u bijelu svjetlost nanošenjem fosfornog sloja. U zavisnosti od specifične primjene, postoji veliki broj vrsta fosfornih slojeva. Na primjer, ukoliko je važna reprodukcija boje, odabira se fosforni sloj koji pokriva širok opseg vidljivog dijela spektra. Neke lampe ovog tipa imaju CRI veći od 95. Ukoliko je važnija efikasnost od CRI-a, onda se bira trihromatski fosforni sloj.

Naravno, postoje mnogobrojne primjene gdje je UV zračenje poželjno, kao na primjer sterilizacija prostorija i opreme. Tada je fosforni sloj izuzet, a umjesto stakla se koristi kvarc, jer staklo blokira zračenje ispod 300 nm). U primjeni potamnjenja kože u

solarijumima, lampa sadrži fosforni sloj koji konvertuje UV zračenje žive u UVA zračenje 310 nm – 380 nm.

Na slici je dat prikaz fluorescentne lampe. Elektroni napuštaju elektrodu, putuju kroz prostor, sudaraju se sa atomima žive i pobuđuju ih. Prilikom povratka atoma žive u stacionarno stanje emituje se zračenje. Fosforni sloj (luminator) konvertuje to zračenje u vidljivu svjetlost.

Sa povećanjem struje, provodnost jonizovanog gasa (u toku pražnjenja) se takođe povećava. Iz tog razloga, neophodno je koristiti uređaj koji limitira struju - *ballast* za regularan rad fluorescentne lampe. Kako se intenzitet struje povećava, otpornost plazme opada zbog većeg broja jona. *Ballast* je neophodan da kontroliše struju i dovede je na prihvatljiv nivo, prije nego dođe do uništenja cijevi. Funkcija *ballast*-a je i da primijeni dovoljan napon kako bi otpočeo proces jonizacije. Elektronski *ballast* takođe ima mogućnost regulacije osvjetljenja tj. zatamnjenja do nekoliko procenata maksimalne osvjetljenosti.

CFL (COMPACT FLUORESCENT LAMPS)



Još jedna široka kategorija lampi su kompaktne fluorescentne lampe (CFL), koje se široko koriste umjesto inkadescentnih sijalica zbog svoje ekonomičnosti. *Ballast* je smješten u bazu same lampe, što ih čini značajno praktičnijim. Generalno, fluorescentne lampe su mnogo ekonomičnije od inkadescentnih, svjetlosna efikasnost im je do 4 puta veća od najefikasnijih halogenih lampi, dok im je vijek trajanja značajno duži. CRI ovih lampi može imati visoku vrijednost, po cijenu slabije efikasnosti.

LAMPE NA BAZI ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA NISKOG PRITISKA SA PLEMENITIM GASOVIMA

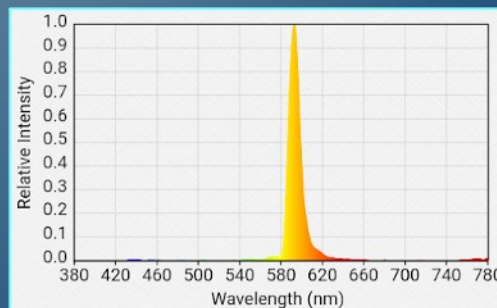


DBD Xenon lamp, Osram

Ukoliko se živa zamijeni nekim od plemenitih gasova, pražnjenje je trenutno kako je aktivni medijum već u gasovitom stanju i na njega ne utiče temperatura lampe ili ambijentalna temperatura. Iako plemeniti gasovi (helijum, neon, argon, kripton i ksenon) emituju svjetlost iz vidljivog dijela spektra, većina zračenja je u UV čak i opsegu ispod 200 nm. To znači da je i ovdje neophodan sloj fosfora kako bi se dobila bijela svjetlost. Kako uvođenjem sloja fosfora za transliranje iz UVC u vidljivi dio spektra, efikasnost značajno opada, ove lampe se češće koriste za svijetleće reklame nego za klasično osvjetljenje. Jedan od najčešće korišćenih plemenitih gasova je neon, koji emituje vidljivu svjetlost dominantno u crvenom dijelu spektra. Koristi se i za indikatorske lampice raznih električnih uređaja. Ostali gasovi imaju primjenu npr. u laserima. Ksenon u impulsnom režimu reda nekoliko stotina herca emituje intenzivne svjetlosne impulse koji se koriste u fotografiji (blic).

Vijek trajanja DBD ksenonske lampe novije generacije za standardno osvjetljenje je i do 100 000 sati, sa efikasnošću od 30 lm/W, pri čemu izbjegavaju upotrebu štetnih materijala kao što je živa.

LAMPE NA BAZI ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA NISKOG PRITISKA SA NATRIJUMOM



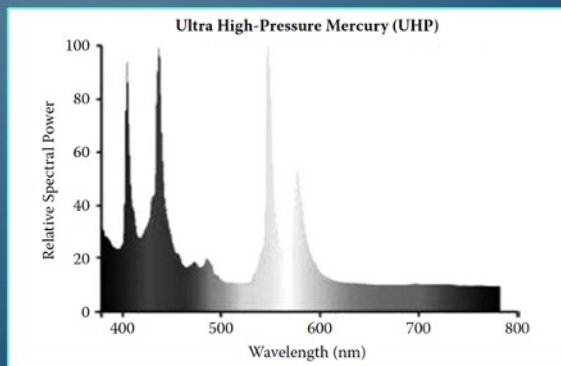
spektar svjetlosti koji emituje Na lampa niskog pritiska

Lampa na bazi električnog pražnjenja sa natrijumom niskog pritiska ima najveću efikasnost do 200 lm/W u klasi plazma lampi niskog pritiska. Visoka efikasnost je posljedica toga što natrijum emituje vidljivu svjetlost i ne postoji potreba za fosfornim slojem. Sa druge strane, spektar emitovane svjetlosti je veoma uzak oko 589 nm, pa je CRI veoma nizak. Ove lampe se uglavnom koriste za osvetljavanje ulica i slične primjene, gdje CRI nije od velikog značaja. Prosječan vijek trajanja ovih lampi je oko 20 000 sati. Za prevođenje natrijuma u gasovito stanje potrebna je visoka temperatura što zahtijeva specijalnu konstrukciju pod vakuumom. Zagrijavanje traje izvjesno vrijeme, pa se uvodi bafer, na primjer neonski. Iz tog razloga, svjetlost je najprije crvene boje, a poslije nekoliko minuta prelazi u žutu.

LAMPE NA BAZI ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA VISOKOG PRITISKA SA ŽIVOM



Philips UHP video projector lamp 120 W



Sa povećanjem pritiska dolazi do intenzivnijih sudara emitovanih elektrona i atoma gasa, pa je i spektar emitovanog zračenja širi.

Ove lampe odlikuje relativno dobra efikasnost, svjetlost visokog intenziteta i dobar CRI. Potrošnja im je veća nego lampi sa niskim pritiskom, ali ipak manja nego inkandescentnih lampi. Označavaju se i kao HID lampe (*High-Intensity Discharge*). Takođe im je potreban *ballast* za strujno ograničenje.

Zbog velikog intenziteta emitovane svjetlosti ove lampe se koriste za osvetljenje dvorana, stadiona, javnih mjesta, parkinga, puteva. Takođe se koriste i kao prednja svjetla automobila.

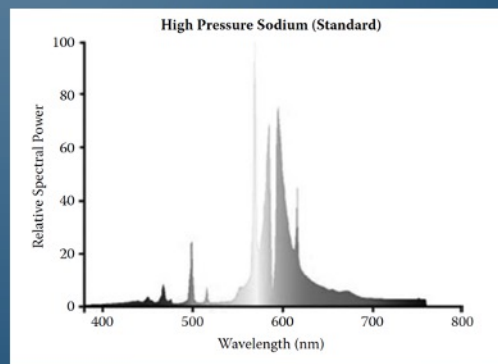
Umjesto običnog stakla koristi se kvarc, zbog visokih temperatura i pritiska, a sve je pod vakuumom u staklenom oklopu.

Prosječna efikasnost im je 60 lm/W, CRI od 15 do 55, temperatura boje od 3000 K do 4000 K, i prosječni vijek oko 15 000 sati.

LAMPE NA BAZI ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA VISOKOG PRITISKA SA NATRIJUMOM



natrijumska lampa visokog pritiska, 250 W

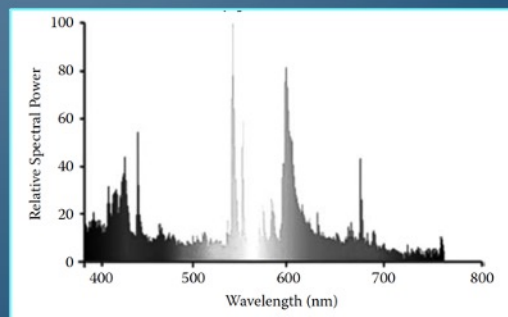


Veći CRI postižu natrijumske lampe visokog pritiska. Umjesto kvarca koriste polikristalni aluminijum (PCA), zbog specifičnih svojstava natrijuma na visokim temperaturama i pri visokim pritiscima. Prosječna efikasnost im je reda 100 lm/W, CRI do 85, temperatura boje od 2000 K do 2500 K, i prosječni vijek oko 30 000 sati. Natrijumove lampe visokog pritiska koriste se za osvjetljenje saobraćajnica, aerodroma, parkirališta i slično. Takođe se mogu koristiti za osvjetljenje radionica, ali i kao dekorativno osvjetljenja fasada.

LAMPE NA BAZI ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA VISOKOG PRITISKA SA HALOGENIDOM METALA



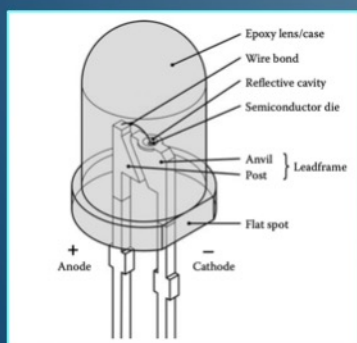
metal-halide lamp (Philips MHN-TC single-ended
Quartz 35 W).



Jedinjenja metala sa halogenom (metal-halogenidi) lakše isparavaju. Prilikom prelaska u gasovito stanje, jedinjenja se raspadaju, i dolazi do pobuđivanja slobodnih atoma metala. Prilikom “relaksacije” atoma, dolazi do oslobađanja energije u vidu svjetlosnog zračenja čija frekvencija zavisi od izbora metala. Približavanjem hladnijem zidu kućišta, metal-halogenidi se ponovno rekombinuju i ciklus se ponavlja. *Metal-halide* lampe imaju visok CRI do 90, temperaturu boje najčešće od 3000 K do 6500 K, efikasnost preko 110 lm/W, i prosječan životni vijek do 20000 h. Kućište im je od PCA, zbog korozivnog dejstva metal halogenida. Nije im potreban fosforni sloj, ali koriste filtere za UV zračenje koje emituju pojedini metali.

Koriste se za unutrašnju i javnu rasvjetu, foto rasvjetu, auto rasvjetu itd.

LED (LIGHT-EMITTING DIODE)



Tehnologija *solid-state* osvjetljenja je bazirana na efektu elektroluminescencije. Termin elektroluminescencija se odnosi na emisiju svjetlosti čvrstog tijela kada kroz njega protiče električna struja ili kada je ono izloženo djelovanju električnog polja. Prvi pokušaji da se emituje svjetlost na ovaj način vezani su za upotrebu fosforescentnog materijala u formi praha ili tankog filma kao pozadinsko svjetlo LCD-a. Ovi napori, uz razvoj poluprovodničke tehnologije u čijoj osnovi je PN spoj, doveli su do razvoja čitave generacije *solid-state* izvora svjetlosti.

LED emituju svjetlost u uskom opsegu talasnih dužina. Talasna dužina emitovane svjetlosti zavisi od poluprovodničkog materijala.

Ukoliko je materijal organsko jedinjenje, u pitanju je OLED (*organic light-emitting diode*), u slučaju polimera, dobija se POLED.

Na slici lijevo je prikazana struktura LED-a, dok je na slici desno prikazana raznovrsnost oblika i formi LED-a.

Najduže korišćeni poluprovodnički izvori svjetlosti su oni bazirani na GaAlAs / GaAs čiji opseg talasnih dužina je od 700 nm do 900 nm i čiji rani razvoj je podržan od strane telekomunikacione industrije. Ove LED su prvi komercijalni poluprovodnički izvori svjetlosti i intenzivno se koriste kod CD plejera i laserskih štampača. Životni vijek ovih dioda je 10 000 do 30 000 sati. Radi poređenja, životni vijek prvih LED je bio nekoliko desetina sati. LED bazirane na InGaAsP / InP koriste se za opseg talasnih

dužina od 900 nm do 1700 nm, sa veoma malim gubicima i veoma malom disperzijom i kao takvi su najpogodniji za telekomunikacije. Projektovani životni vijek ovih dioda je preko 1 000 000 sati.

LED (*LIGHT-EMITTING DIODE*)

- AlGaAs – crvena i infracrvena
- AlGaP – zelena
- AlGaInP – jaka svjetlost, narandžasto-crvena, narandžasta, žuta i zelena
- GaAsP – crvena, narandžasto-crvena, narandžasta i žuta
- GaP – crvena, žuta, zelena
- GaN – zelena i plava
- InGaN – blizu-ultravioletno, plavo-zelena i plava
- ZnSe – plava
- C – ultravioletno
- AlN, AlGaIn - ultravioletno

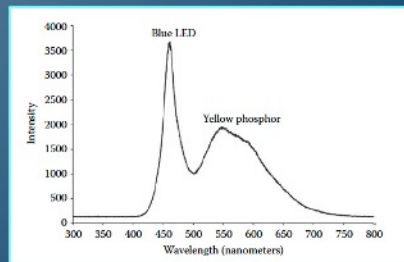
Data je lista jedinjenja koja se koriste pri izradi LED-a.

LED (LIGHT EMITTING DIODE)

Efikasnost LED-a se definiše uz pomoć nekoliko faktora kao što su:

- **Eksterna efikasnost** koja predstavlja odnos broja emitovanih fotona po sekundi i ukupnog broja rekombinacija (elektrona) po sekundi.
- **Interna kvantna efikasnost** koja predstavlja odnos broja generisanih fotona u samom poluprovodniku po sekundi i ukupnog broja rekombinacija (broja elektrona) po sekundi. Samo dio fotona će napustiti poluprovodnik u obliku svjetlosti.
- **Efikasnost ekstrakcije fotona** koja predstavlja odnos broja emitovanih fotona po sekundi i ukupnog broja generisanih fotona po sekundi.

LED KOJE EMITUJU BIJELU SVJETLOST



Bijela svjetlost se može dobiti kombinovanjem LED različitih boja (crvena, zelena i plava ili žuta i plava ili četiri različite boje) ili upotrebom fosfornih premaza na UV ili plavoj LED.

Sa tri ili više primarnih LED, slike, mogu se dobiti sve boje. Treba uzeti u obzir da je crvena LED najosjetljivija na promjene temperature. Potrebno je podesiti intenzitet svjetlosti kao i ugao svake LED kako bi se dobila bijela svjetlost.

Drugi način dobijanja bijele svjetlosti upotrebom samo jedne LED je konverzija UV ili plave svjetlosti u različite boje koristeći fosforni premaz. Upotreba fosfornih premaza smanjuje efikasnost, ali to je i dalje najjednostavniji i najjeftiniji način dobijanja bijele svjetlosti.

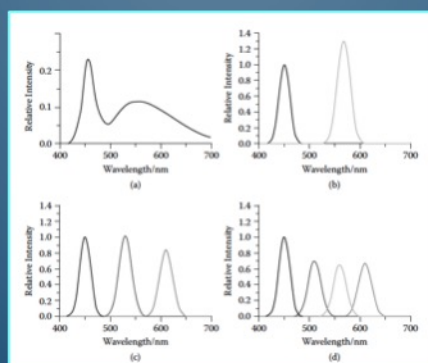
Osim što se UV LED mogu koristiti sa fosfornim premazom, plave LED se takođe mogu presvući slojem koji konvertuje plavu u žutu svjetlost, slika. Odnos plave u i žute svjetlosti može se kontrolisati količinom fosfornog praha. Kod ovog pristupa postoji problem niskog CRI-a jer postoji nedostatak emisije crvene boje. Temperatura boje postignuta ovom metodom kreće se do 5500 K. Dodavanjem praha koji emituje i crvenu boju može se postići topla bijela svjetlost temperature 3200 K, sa većim CRI, ali uz lošiju efikasnost izvora.

Upotrebom tri LED, može se ostvariti bolja kontrola boje, dok se upotrebom fosfornog praha dobija veća stabilnost boje. Naravno, postoje i skuplji uređaji koji koriste dva ili

tri kristala u sklopu jedne LED kako bi se ostvarila željena boja.

Ukoliko se koriste tri LED osnovnih boja u cilju dobijanja bijele svjetlosti, neophodno je kontrolisati svaku od njih u toku rada jer se neravnomjerno „troše“ i nisu jednako osjetljive na promjene temperature. Kontrolu obavlja kontrolna elektronika. U slučaju korišćenja fosfornog praha, nije moguće ostvariti ovu vrstu kontrole ili bilo kakvu korekciju, pa sa porastom temperature dolazi do promjene talasne dužine emitovane svjetlosti plave LED.

LED KOJE EMITUJU BIJELU SVJETLOST



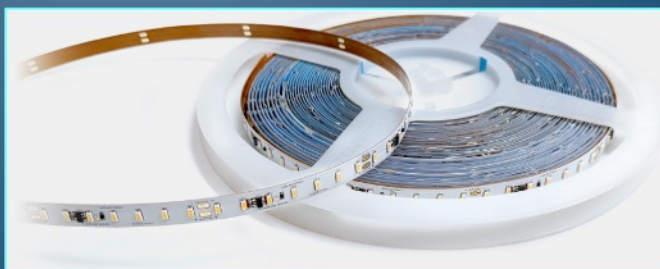
Emisioni spektri bijelih LED (a) plava LED sa fosfornim prahom; (b) dihromatska kvantna *dot* LED, (c) trihromatska kvantna *dot* LED i (d) tetrahromatska kvantna *dot* LED

Među novijim metodama je upotreba nanokristalnih poluprovodničkih materijala (*quantum dots*) čiji atomi emituju svjetlost sa visokom efikasnošću pri električnoj ili optičkoj stimulaciji. Talasna dužina emitovane svjetlosti se može kontrolisati dimenzijama nanokristala, slika.

LED LAMPE



<https://www.any-lamp.com/blog/led-vs-incandescent>



<https://www.holelectron.com/products/flexible-led-strips/nichia-led-strips/fl-140-o2/#FL-140-9/O2-822>

LED lampe su veoma popularne jer su trajne, troše reda 20 % energije klasične sijalice i visoko su efikasne prilikom konverzije električne energije u optičku, umjesto u toplotu. Zbog niskog nivoa emitovane svjetlosti, LED lampe se sastoje od velikog broja dioda koje emituju svjetlost kako bi se mogle koristiti za osvjetljenje, slike.

Efikasnost LED lampi je reda 80 lm /W - 100 lm/W. U najvećem broju slučajeva LED lampe rade sa manje od 100 mA. Ukoliko se koristi veća struja, riječ je o *power* LED. *High-power* LED imaju i hladnjak.

LED ne emituju IR ili neželjeno UV zračenje, osim vidljive svjetlosti, oslobađa se toplota, koju je potrebno odvesti od kristala. Toplota se odvodi posredno, što znači da postoji mnogo faktora koji utiču na brzinu odvođenja toplote:

- Vrsta materijala od kojih su napravljeni pojedini dijelovi LED-a
- Kontakti između pojedinih dijelova
- Ukupna površina sa koje se odvodi toplota

Generisana toplota i povećanje temperature *pn* spoja je osnovni ograničavajući faktor i najveća prepreka za razvoj LED-a veće snage i osvjetljenja. Potrebno je koristiti

materijale koji veoma brzo i efikasno odводе toplotu.

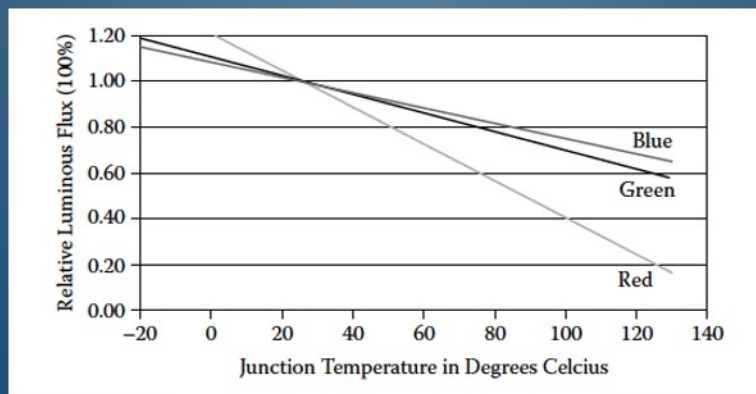
Svjetlost i toplota se generišu na *pn* spoju koji ima male dimenzije pa je količina toplote po jedinici površine veoma velika. Temperaturu spoja nije moguće direktno mjeriti, već se izračunava na osnovu temperature ostalih djelova sistema uzimajući u obzir termalnu otpornost materijala.

Tri osnovna faktora koji određuju temperaturu spoja su: intenzitet struje, termalna otpornost sistema, i ambijentalna temperatura.

Dostupni proizvodi na tržištu imaju radnu temperaturu do 120 °C. Efikasnost i vijek trajanja značajno opadaju na temperaturama koje su bliske graničnim. Realni temperaturni maksimum je oko 80 °C, jer treba uzeti u obzir varijacije ambijentalne temperature.

Proizvođači vrše klasifikaciju LED pri temperaturi spoja od 25 °C. Međutim, temperatura spoja pri radu je obično reda 60 °C, pa svjetlosni fluks i boja često odstupaju u odnosu na priloženu specifikaciju.

TERMALNI EFEKTI KOD LED



Promjene svjetlosnog fluksa sa temperaturom za LED koje emituju crvenu, zelenu i plavu svjetlost

Na slici je prikazan uticaj temperature na svjetlosni fluks za LED koje emituju različite boje. Najosjetljivija na promjene temperature je LED koja emituje crvenu svjetlost. Različiti odzivi na promjenu temperature tri osnovne boje koje emituju LED dovode do nestabilnosti bijele boje u RGB sistemima.

U principu, postoje dva načina da se kontroliše temperatura spoja diode: kontrola struje, kontrola termalne otpornosti. Drugi metod, iako poželjniji, nije tako jednostavan. Uglavnom se koristi kombinacija ova dva pristupa.

LED LAMPE SA HLADNJACIMA



High-power komercijalne LED koriste dodatne glomazne hladnjake, slika. Kontrolna elektronika nekih LED je udaljena tako da toplota koja se generiše u kolu ne dovodi do dodatnog zagrijavanja *pn* spoja.

KONTROLA INTENZITETA OSVJETLJENJA

Kontrola intenziteta svjetlosti se može obaviti na dva načina:

- povećanjem/smanjenjem intenziteta struje (DC *dimming*)
- *Pulse* kontrolom

Kontrola intenziteta svjetlosti se može obaviti na dva načina:

- Povećanjem/smanjenjem intenziteta struje (DC *dimming*)
- *Pulse* kontrolom

Kontrola intenziteta osvjetljenja promjenom DC struje ima nekoliko nedostataka. Postoji specificirana vrijednost do koje se struja može smanjivati za pouzdan rad. Osim toga, pri smanjenju struje kroz LED, boja koju ona emituje se mijenja. Sa druge strane, kod *pulse* kontrole, amplituda impulsa je određena i konstantna, dok se srednja vrijednost mijenja u skladu sa frekvencijom impulsa. Na ovaj način, osigurana je približno linearna zavisnost između srednje vrijednosti struje i intenziteta emitovane svjetlosti.

Opseg zatamnjenja se definiše kao odnos maksimalne srednje vrijednosti struje i minimalne srednje vrijednosti struje LED-a.

Ovaj metod omogućava dinamičko osvjetljenje, pri čemu treba voditi računa da minimalna frekvencija mora biti odabrana tako da je prijatno za ljudsko oko.

OPŠTE KARAKTERISTIKE LED-A

- Emisioni spektar je uzak (nekoliko desetina nanometara).
- Karakteriše ih svjetlosni flux od 1 lm za konvencionalne LED pa do preko 120 lm za *high-power* LED.
- Za ostvarivanje veće vrijednosti svjetlosnog fluksa potreban je veliki broj LED-a.
- Širok opseg boja, uz RGB *mixing*.
- Odziv im je gotovo trenutno. LED sa fosforom imaju nešto sporiji odziv.
- Dobro osvijetljenje i kontrola osvijetljenja.

OPŠTE KARAKTERISTIKE LED-A

- Kraj životnog vijeka karakteriše postepeno opadanje intenziteta svjetlosti, nije iznenadan.
- Osjetljive su na toplotu i statički elektricitet.
- Karakterišu ih male dimenzije, što znači slobodu dizajniranja sijalice. Ipak, za veću vrijednost svjetlosnog fluksa, i sijalica je većih dimenzija.
- Prosječan vijek trajanja je oko 50 000 h. Na vijek trajanja utiču defekti kristalne strukture poluprovodničkog materijala ili fluorescentnog praha.
- Ne emituju štetno zračenje.
- Opseg radnih temperatura im je ograničen na 125 °C.
- Niska potrošnja.

PRIMJENA LED-A

- Primjene koje zahtijevaju svjetlost određene boje. Kontrola boje emitovane svjetlosti kod LED je značajno efikasnija nego primjenom filtara kod inkadescentnih lampi.
- Primjene kod kojih je poželjan veoma dug vijek trajanja iz razloga nepristupačne lokacije ili visoke cijene zamjene lampe.
- Ukoliko je poželjna manja dimenzija izvora svetlosti.
- Ukoliko je neophodan trenutani odziv i dobra kontrola nivoa osvjetljenja.

PRIMJENA LED-A

Proizvođači LED-a su posljednjem periodu uglavnom usmjereni na:

- TV ekrane i ekrane za računare,
- projektore,
- svjetla automobila,
- unutrašnjost automobila,
- dekorativnu rasvjetu,
- saobraćajni znakovi,
- mobilni telefoni,
- stomatološki tretmani,
- telekomunikacije, ...

LED su veoma popularne. Koriste se za proizvodnju različitih vrsta displeja, uključujući i displeje laboratorijskih instrumenata. Mogu emitovati svjetlost različitih boja.

Štaviše, mogu se dizajnirati tako da emituju koherentnu svjetlost veoma uskog opsega – laserske diode. Laserske diode se koriste u sistemima optičkih komunikacija kao i u sistemima za optičko skladištenje podataka (CD, DVD).

Kombinovanjem diode koja emituje svjetlost i fotodetektora u istom kućištu dobija se optoizolator. LED konvertuje električni signal u svjetlost, dok fotodetektor konvertuje svjetlost u električni signal na izlazu optoizolatora. Upotrebom optoizolatora ostvaruje se potpuna električna izolacija između električnog kola na ulazu optoizolatora i električnog kola na njegovom izlazu. Ovaj efekat je koristan kod redukovanja električne interferencije prilikom prenosa signala u digitalnim sistemima. Takođe je upotreba optoizolatora značajna kod medicinskih instrumenata jer se redukuje rizik od električnog šoka kod pacijenata. Spoj diode koja emituje svjetlost i fotodetektora ne mora biti ostvaren na malom međusobnom rastojanju. Upravo u optičkim komunikacionim sistemima ova dva elementa su na velikom međusobnom rastojanju.



LITERATURA

- S. Kitsinelis, *Light Sources Technologies and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011
- E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2006
- M. Csele, *Fundamentals of Light Sources and Lasers*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 2004
- S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics*, Pearson Education Limited, 2013