

PREDAVANJE 1 – FIZIKALNE OSNOVE SVJETLOSTI

Oko je najvažnije osjetilo i dobiva 80% svih informacija koje čovjek prima. Brzina prijenosa informacija vidom je gotovo 10x veća nego sluhom.

Svjetlost je elektromagnetsko zračenje valnih duljina od 10^{-7} m do 10^{-3} m koje nadražuje mrežnicu u čovječjem oku i time u organizmu izaziva osjet vida. Taj dio zračenja nazivamo optičko zračenje.

Svjetlost se može protumačiti na 2 načina:

- Fizikalnom smislu (prijenos energije u obliku elektromagnetskih valova ili čestica)
- Osjetilnom smislu (modeliranje djelovanja ljudskog oka)

Za tumačenje fizikalnih svojstava svjetlosti koristimo se dualnom teorijom zračenja:

- Valnom teorijom
 - Svjetlost se širi prostorom kao elektromagnetski val
 - $C = f \cdot \lambda$ gdje je x brzina širenja (m/s), f frekvencija zračenja (Hz) i λ valna duljina (m)
 - Brzina širenja vala ovisi o osobinama (elastičnosti i gustoći) sredstva kroz koje val prolazi, a u vakuumu iznosi $3 \cdot 10^8$ m/s. Kada val prelazi iz jednog sredstva u drugo ili se prostire kroz nehomogeno sredstvo, brzina i valna duljina se mijenjaju, a frekvencija ostaje ista
- Kvantnom teorijom
 - Svako je zračenje sastavljeno od elementarnih energetske čestice
 - Fotoni se u vakuumu šire brzinom svjetlosti i njihova je energija to veća što je frekvencija zračenja veća, odnosno što je valna duljina manja.
 - Količina energije definira se kao: $W = h \cdot f$, gdje je h Planckova konstanta, a f frekvencija zračenja (Planckova konstanta $6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js)

Od ukupnog toka energije što je zrači neki izvor svjetlosti, samo elektromagnetsko zračenje valnih duljina od 380 do 780 nm može izazvati vizualni osjet svjetline, i naziva se vidljivi dio spektra. Iznad i ispod tog dijela spektra nalazi se infracrveno (IR) i ultraljubičasto (UV) područje.

- IR područje obuhvaća valne duljine od 780 nm do 1 mm. Ovo termičko zračenje sunca omogućuje život na zemlji.
- UV zračenje (100 do 380 nm) je zbog svog biološkog učinka nužno, ali i štetno u UV-C području (ozonska rupa!).

Zračenje	Valna duljina
UV – C	100 – 280 nm
UV – B	315 – 380 nm
UV – A	315 – 380 nm
Vidljivo zračenje	380 – 780 nm
IR - A	780 nm – 1,4 μ m
IR – B	1,4 – 3 μ m
IR – C	3 μ m – 1 mm

Ovisno o nivou sjajnosti (luminancije), 2 tipa očnih receptora su uključeni u proces viđenja:

- Štapići
 - Jako osjetljivi na svjetlost, a manje na boju
 - Aktivniji pri manjoj sjajnosti (noćno ili fotopsko viđenje)
 - Maksimalna osjetljivost se nalazi u plavo-zelenom području na 507 nm
- Čunjići
 - Osjetljiviji na boju, dijele svjetlo na 3 različita područja - crveni, zeleni i plavi (RGB) te pobuđuju mozak na aditivno mješanja boja
 - Preuzimaju ulogu u dnevnom (skotopskom) viđenju pri jačoj sjajnosti
 - Maksimalna osjetljivost se nalazi u žuto-zelenom području na 555 nm

Relativna svjetlosna osjetljivost - Odnos između snage zračenja pri 555 nm i snage zračenja za druge valne duljine

Naša percepcija svjetla zasniva se na njegovoj raspodjeli na spektralne komponente (frekventni sustav). Razlikujemo:

- Monokromatsko zračenje
 - Sastoji se od samo jedne valne duljine, vrlo uskog spektra koji se može tako prikazati
- Složeno zračenje, podjela na:
 - Kontinuirano zračenje – bez skokovitih promjena valnih duljina
 - Diskretno zračenje – sa skokovitim promjenama valnih duljina

Vid i percepcija

Mogućnost oka da se prilagođuje na više ili manje razine sjajnosti naziva se adaptacija. Mogućnost adaptacije ljudskog oka kreće se unutar omjera sjajnosti od 1: 10 milijardi. Trajanje procesa adaptacije ovisi o sjajnosti na početku i kraju procesa. Adaptacija na manju sjajnost traje dulje od adaptacije na veću sjajnost.

Trodimenzionalno ili stereoskopsko viđenje moguće je zahvaljujući činjenici da su naše oči međusobno razmaknute. Kada se fokusira objekt, uzorci koji se stvaraju na mrežnici oka se neznatno razlikuju za svako oko zbog drukčije perspektive, a mozak koristi ove informacije da bi "izračunao" utiska prostora, što omogućuje stvaranje utiska udaljenosti.

Oštrina vida je sposobnost razlikovanja finih detalja na nekom predmetu ili prizoru. Na nju utječe razina rasvjetljenosti, ali isto tako i starost promatrača.

Akomodacija je sposobnost oka da se prilagodi predmetu koji se nalazi na određenoj udaljenosti i da ga oštro vidi, što se postiže promjenom oblika očne leće.

Da bi se objekt prepoznao, potrebna je razlika sjajnosti ili boje između objekta i neposredne okoline, što se naziva minimalni kontrast.

Postoje 2 načina generiranja umjetnog svjetla:

- Termičko zračenje
- Luminiscentno zračenje

Termičko zračenje

Sve žarulje sa žarnom niti koriste princip termičkog zračenja. Žarna nit se grije prolaskom struje, i pri tome emitira spektar zračenja koje je slično zračenju crnog tijela.

Sva tijela na temperaturi iznad 0 K emitiraju elektromagnetsko zračenje zbog termičkog gibanja atoma. Termičko zračenje ima kontinuirani spektar zračenja koji je definiran kao funkcija temperature i faktora emisije materijala. Količina infracrvenog zračenja smanjuje se s povećanjem temperature, i ako je temperatura dovoljno visoka generira se i vidljivo zračenje. Naime, maksimumi zračenja pomiču se prema kraćim valnim duljinama kada temperatura raste (Wienov zakon pomicanja).

Takvo zračenje (zračenje crnog tijela) opisuje se Stefan-Boltzmanovim zakonom koji za cijelo područje valnih duljina glasi:

$$M_e = \sigma \cdot T^4$$

gdje je: M_e – specifično isijavanje crnog tijela (W/m^2), σ - konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), T – termodinamička temperatura (K)

Faktor emisije materijala je funkcija valne duljine i temperature, i određuje odnos između pojedinog materijala i idealnog crnog tijela.

Svjetlost sunca spada u grupu termičkih isijavanja. Tijekom evolucije ljudsko oko se posebno prilagodilo spektru zračenja sunca, koje prolazi kroz atmosferu u dovoljnoj količini i jednoličnosti. Sunčevo zračenje odgovara temperaturi crnog tijela od 5.800 K. Specifična energija zračenja iznosi izvan atmosfere 1.374 W/m^2 . Na morskoj površini energija je 60-70% ove vrijednosti. Atmosfera propušta samo zračenje između 350 i 2.500 nm. Stoga u sunčevu zračenju nema UV-C i IR-C zračenja. Dnevno svjetlo mješavina je izravnog i neizravnog zračenja, te ovisi o vremenskim uvjetima.

Luminiscentno zračenje

Svjetlosno zračenje koje se ne zasniva na termičkom zračenju naziva se luminiscentno zračenje. Luminiscentno zračenje nastaje kada elektroni prelaze iz jedne energetske razine u drugu.

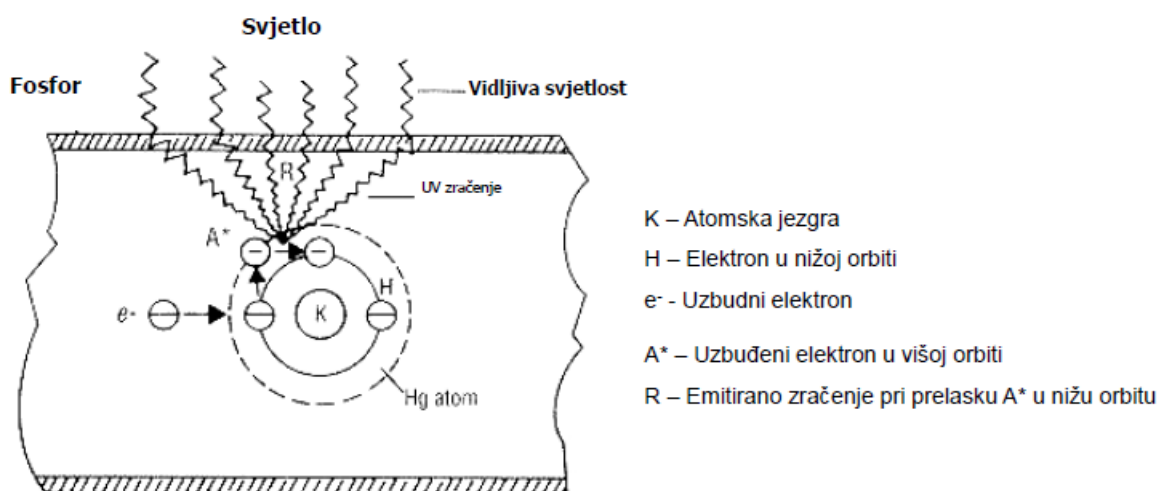
Potrebnu energiju za luminiscenciju moguće je dovesti iz različitih izvora:

Oznaka	Energija	Primjer
Elektro luminiscencija	Električna energija	Izboj u plinu, pn - prijelaz
Foto luminiscencija	Elektromagnetsko zračenje	UV konverzija s luminiscentnim materijalima
Kemo i bio luminiscencija	Energija kemijske reakcije	Gorenje, oksidacija, enzimske reakcije
Tribo luminiscencija	Mehanička energija	Svjetlosni efekti u kristalima
Termo luminiscencija	Toplinska energija	Svjetlosni efekti u kristalima
Radio luminiscencija	Radioaktivnost	Aurora Borealis

Visokotlačne žarulje na izboj su prema tome izvori luminiscentnog zračenja gdje se potrebna izlazna energija dobiva tokom električne struje. Za razliku od njih, luminiscencija fluorescentnih žarulja dolazi od energije zračenja (UV zračenja).

Generiranje svjetlosti

Atom plina ili metalne pare sastoji se od jezgre i nekoliko elektrona koji putuju po točno utvrđenim stazama (energetske razine). Kada je atom plina pogođen sa slobodnim elektronom ili ionom tada dolazi do skakanja elektrona u atomu na višu energetska razinu, na kojoj se kratko zadržava. Pri povratku na nižu energetska razinu emitira se elektromagnetska energija u obliku svjetlosnog kvanta – fotona. Energija fotona jednaka je razlici energetska razina. U luminiscentnom zračenju postoji samo zračenje određene energije i određene valne duljine, koje ovisi o kemijskom sastavu tvari. Luminiscentno zračenje ima diskretni spektar.



Uzvrat boje

Ovisno o primjeni, umjetno svjetlo treba omogućiti da se boje vide kao da su obasjane prirodnim svjetlom. Ova kvaliteta izvora svjetla naziva se uzvrat boje, i izražava se faktorom uzvrata boje (Ra faktorom). Uzvrat boje nije povezan s temperaturom boje, te se ne može na osnovu temperature boje izvoditi zaključak o kvaliteti svjetla.

Faktor uzvrata boje je mjera podudaranja boje objekta osvijetljenog izvorom koji se mjeri i boje tog objekta pod referentnim izvorom svjetla (s $R_a=100$). Što je R_a faktor izvora niži, to je uzvrat boje tog izvora lošiji.

Uzvrat boje	Kategorija uzvrata boje	Faktor uzvrata boje	Primjer izvora svjetla
Vrlo dobar	1 A	≥ 90	Halogene žarulje, LUMILUX® DE LUXE fluocijevi, ...
	1 B	80 - 89	LUMILUX® fluocijevi, metalhalogene žarulje boje /NDL i /WDL
Dobar	2 A	70 - 79	Standardne fluocijevi boje /10 (6.000 K)
	2 B	60 - 69	Standardne fluocijevi boje /20 (4.500 K)
Dovoljan	3	40 - 59	Živine žarulje HQL
Loš	4	≤ 39	Visokotlačne i niskotlačne natrijeve žarulje

Temperatura boje

Temperatura boje označuje boju izvora svjetlosti usporedbom s bojom svjetlosti koju zrači idealno crno tijelo. Temperatura idealnog crnog tijela u Kelvinima, pri kojoj ono emitira svjetlost kao mjereni izvor, naziva se temperatura boje tog izvora svjetlosti. Kada se trikromatske komponente crnog tijela za različite temperature unesu u dijagram boja, dobiva se linija koja se naziva Planckova krivulja.

Budući da izvori sa žarnom niti pripadaju grupi izvora s termičkim zračenjem, kao i idealno crno tijelo, njihove temperature boja leže na Planckovoj krivulji. Međutim, žarulje na izboj, kod kojih se svjetlo generira principom luminiscencije, imaju bitno drukčije spektralne karakteristike, te točke ne leže na Planckovoj krivulji nego u njoj blizini, te se za takve izvore koristi pojam "slične temperature boje". To je ona temperatura crnog tijela pri kojoj je njegova boja najbližija boji izvora svjetlosti, što je određeno Judd linijama na Planckovoj krivulji.

Zbog standardizacije, temperature boje izvora svjetlosti podijeljene su u tri grupe:

- dnevno svjetlo (>5.000 K)
- neutralno bijelo (3.500 - 5.000 K)
- toplo bijelo (<3.500 K)

PREDAVANJE 2 – SVJETLOTEHNIČKE VELIČINE I JEDINICE

Svjetlost se vrednuje na 2 načina:

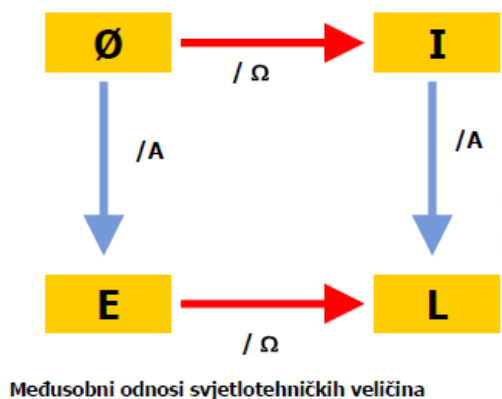
- Fizikalnim veličinama
- Svjetlotehničkim veličinama

Fizikalnim veličinama se svjetlost opisuje u onom dijelu gdje svjetlost promatramo energetski, kao elektromagnestki val ili energetska česticu.

Svjetlotehničke (fotometrijske) veličine vrednuju svjetlost na temelju osjetilnog efekta i ograničene su samo na vidljivo zračenje spektra 380 do 780 nm.

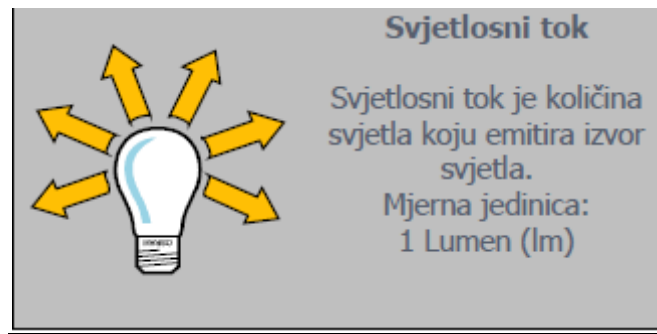
Fotometrijske formule

Jakost svjetlosti I	Svjetlosni tok u određenom smjeru Prostorni kut	$I[\text{cd}] = \Phi[\text{lm}] / \Omega[\text{sr}]$
Svjetlosni tok Φ	Jakost svjetlosti \times Prostorni kut	$\Phi[\text{lm}] = I[\text{cd}] \times \Omega[\text{sr}]$
Rasvjetljenost E	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>Svjetlosni tok Rasvijetljena površina</div> <div>= Jakost svjetlosti Kvadrat udaljenosti</div> </div>	$E[\text{lx}] = \Phi[\text{lm}] / A[\text{m}^2] = I[\text{cd}] / d^2[\text{m}^2]$
Luminancija L	Jakost svjetlosti Svjetleća površina	$L[\text{cd}/\text{m}^2] = I[\text{cd}] / A[\text{m}^2]$
Svjetlosna iskoristivost η	Svjetlosni tok Električna snaga	$\eta[\text{lm}/\text{W}] = \Phi[\text{lm}] / P[\text{W}]$



Prostorni kut predstavlja omjer površine kugle (A) i kvadrata njenog polumjera (r). SI jedinica mjere je steradian (sr). Puni prostorni kut iznosi $4\pi \text{ sr}$.

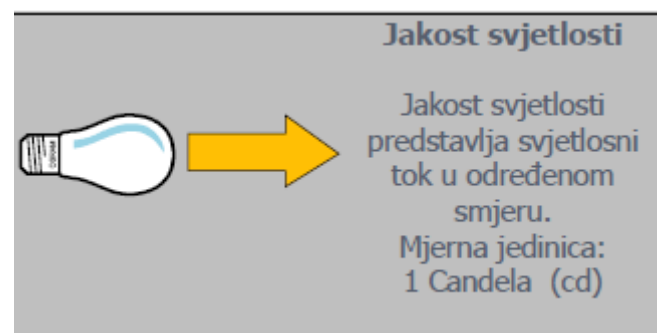
Svjetlosni tok



Snaga zračenja koju emitira izvor svjetla u svim smjerovima.

Jedinica za svjetlosni tok je lumen (lm). Točkasti izvor svjetla ima svjetlosni tok od 1 lm kada u prostorni kut od 1 sr zrači jakošću svjetlosti od 1 cd.

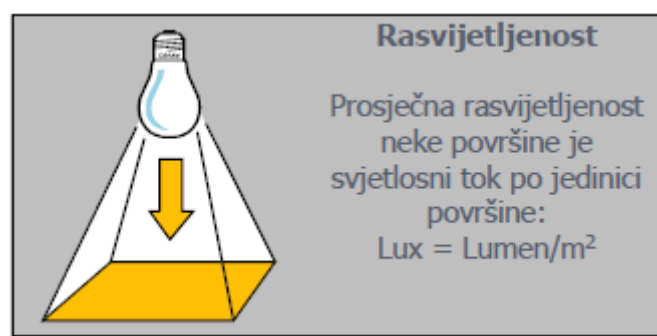
Jakost svjetlosti



Snaga zračenja koju emitira izvor svjetla u određenom smjeru.

Jedinica za jakost svjetlosti je candela (cd). Definirana kao jakost svjetlosti koju u određenom smjeru zrači monokromatski izvor svjetla frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ Hz i snage zračenja u tom smjeru od $1/683$ W/sr.

Rasvjetljenost

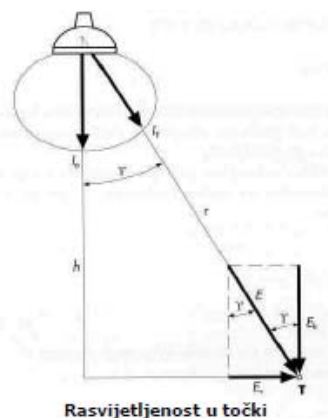
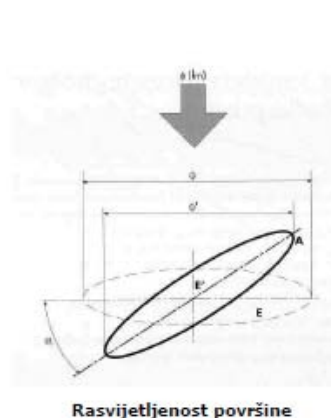


Mjerilo za količinu svjetlosnog toka koja pada na određenu površinu. Radi se isključivo o računskoj veličini, koju naše oko ne primjećuje.

Jedinca za rasvjetljenost je lux (lx). Definiran kao rasvjetljenost 1 m² na koju pada ravnomjerno raspodijeljen svjetlosni tok od 1 lm.

Razlikujemo 2 vrste rasvjetljenosti:

- Rasvjetljenost površine
 - Omjer svjetlosnog toka izvora svjetlosti koji pada okomito na zadanu površinu i zadane površine. U slučaju da svjetlosni tok pada na zadanu površinu po kutom α , rasvjetljenost je manja i iznosi $E' = \phi' / A = \phi \cdot \cos \alpha / A = E \cdot \cos \alpha$
- Rasvjetljenost točke
 - Omjer jakosti izvora svjetlosti koja pada okomito na tu točku i kvadrata udaljenosti i iznosi $E = I / r^2$. U slučaju da svjetlosni tok pada na točku pod kutom γ , rasvjetljenost u toj točku dobivamo kao rezultantu horizontalne i vertikalne rasvjetljenosti: E_h i E_v . $E_h = E \cdot \cos \gamma$, $E_v = E \cdot \sin \gamma$



- Vrijede sljedeće formule za izračunavanje rasvjetljenosti u točki:

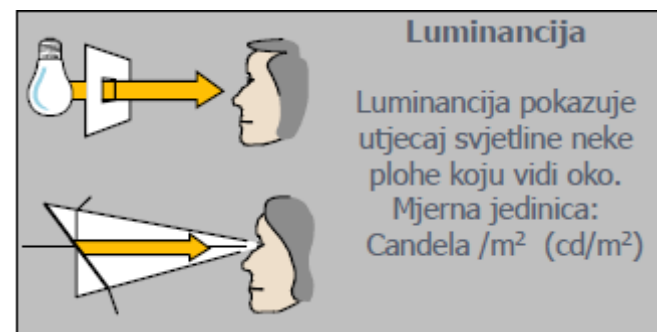
Rasvjetljenost	Pomoću r	Pomoću h
E	$E = \frac{I_\gamma}{r^2}$	$E = \frac{I_\gamma}{h^2} \times \cos^2 \gamma$
E_h	$E_h = \frac{I_\gamma}{r^2} \times \cos \gamma$	$E_h = \frac{I_\gamma}{h^2} \times \cos^3 \gamma$
E_v	$E_v = \frac{I_\gamma}{r^2} \times \sin \gamma = E_h \times \operatorname{tg} \gamma$	$E_v = \frac{I_\gamma}{h^2} \times \cos^2 \gamma \times \sin \gamma = E_h \times \operatorname{tg} \gamma$

- Srednja vrijednost rasvjetljenosti neke površine izračunava se kao srednja vrijednost rasvjetljenosti određenog broja točaka te površine, tako da vrijedi:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N}$$



Luminancija



Sjajnost rasvijetljene ili svjetleće površine kako je vidi ljudsko oko. Osjećaj svjetline koji svjetleća ili rasvijetljena ploha emitira u ljudsko oko. Luminancija je jedina svjetlosna veličina koju ljudsko oko može direktno vidjeti.

Mjeri se u candelama po površini (cd/m²), a za izvore svjetlosti često se koristi i prikladniji oblik (cd/cm²).

Veza luminancije i rasvjetljenosti kod difuznih reflektivnih površina: $L = \rho \cdot E / \pi$

Svjetlosna iskoristivost

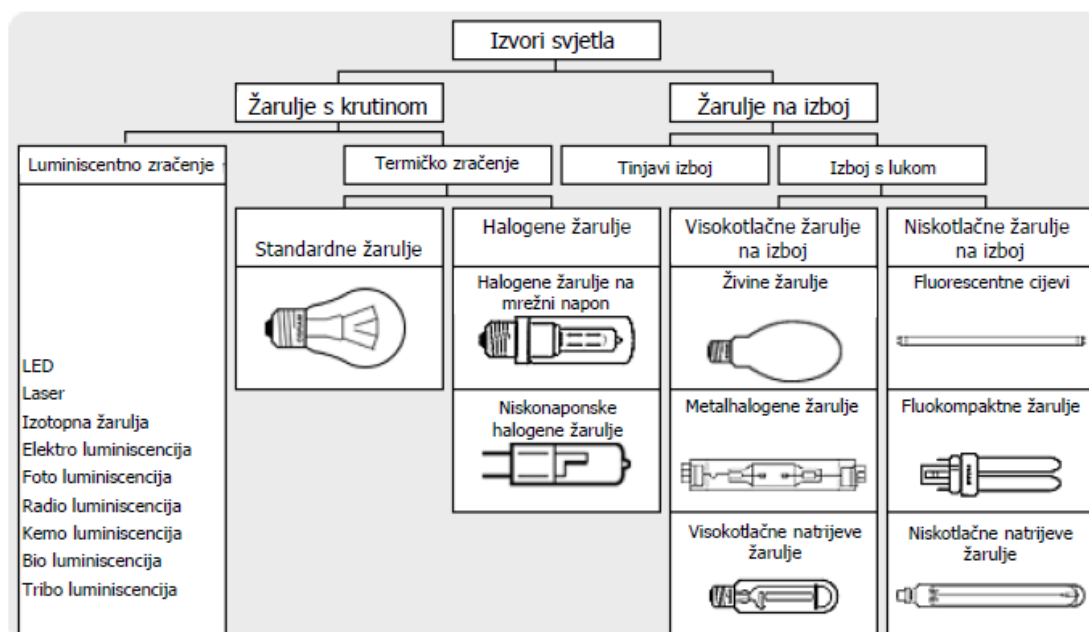
Omjer dobivenog svjetlosnog toka izvora svjetlosti i uložene snage $\eta = \Phi / P$ [lm/W]

Pokazuje iskoristivost kojom se uložena električna energija pretvara u svjetlost. Teoretski maksimum iskoristivosti, pri kojem se sva energija pretvara u vidljivo svjetlo iznosi 683 lm/W. U stvarnosti vrijednosti iznose između 10 i 150 lm/W.

PREDAVANJE 3 – IZVORI SVJETLOSTI

Izvore svjetlosti dijelimo prema načinu generiranja svjetlosti:

- Principom termičkog zračenja
- Principom luminiscencije



Prosječan vijek trajanja izvora svjetla je period nakon kojeg 50% izvora svjetlosti radi.

Koristan vijek trajanja izvora svjetla je period nakon kojeg rasvjetni sustav daje 80% početnog (nazivnog) svjetlosnog toka.

Žarulja sa žarnom niti

Generiraju svjetlo principom termičkog zračenja. Svjetlost nastaje tako što struja teče kroz žarnu nit od Wolframa i ugrijava je na temperaturu od 2600 – 3000 K i usijava. Većina zračenja emitira se u IR dijelu spektra.

Karakteristike:

- Svjetlosna iskoristivost – žarulja sa žarnom niti snage 25 – 500 W iznosi 9 – 17 lm/W. U svjetlost se pretvara 5-10% uložene energije, ostatak se pretvara u toplinu.
- Vijek trajanja: 1000 h
- Uzvrat boje: 1A
- Temperatura boje: 2600 – 3000 K

Brojne pogonske karakteristike ovise o naponu. Svjetlosni tok je ovisan o naponu, što se koristi kod regulacije. Zbog izražene temperaturne ovisnosti otpora wolframove niti, struja uključivanja je bitno veća od nazivne struje (za 100W žarulju 14x, prijelazna pojava traje 56 ms).

Temperatura žarne niti najviše utječe na svjetlosnu iskoristivost i vijek trajanja. Što je temperatura veća, to je svjetlosna iskoristivost veća, ali i vijek trajanja kraći. Zbog trošenja žarne niti svjetlosni tok se smanjuje u pogonu, i obično na kraju iznosi 15% manje od nazivnog.

Vijek trajanja se smanjuje zbog naglog porasta broja atoma wolframa koji se odvajaju sa žarne niti pri porastu temperature. Ovaj proces ne samo da proizvodi tamni sloj na unutrašnjoj strani staklenog balona (što dovodi do smanjenja svjetlosnog toka), već i dovodi do pucanja žarne niti – pregaranja žarulje. Ovaj proces može se bitno umanjiti dodavanjem inertnog plina (Argon, Krypton ili Xenon) u punjenje balona, čime se podiže temperatura žarne niti (time i iskoristivost) i smanjuje isparavanje wolframa. Danas standardno punjenje čine plinovi Argon i Dušik, a Krypton ili Xenon dodaju se zbog poboljšanja iskoristivosti.

Posebnu grupu u standardnih žarulja čine reflektorske žarulje. Reflektorom se postiže usmjeravanje svjetlosnog toka u željenom smjeru, što podiže iskoristivost rasvjetnog sustava. Širinu snopa svjetla određuje reflektor.

Halogene žarulje

Također žarulje sa žarnom niti, te koriste princip termičkog zračenja pri generiranju svjetla.

Dodatak halogenida (brom, klor, flor i jod) plinskom punjenju gotovo potpuno sprečava crnjenje balona žarulje, čime se održava gotovo konstantan svjetlosni tok kroz cijeli vijek trajanja. Zbog toga je moguće napraviti balon puno manjih dimenzija, s višim pritiskom plinskog punjenja, čime se dodatno povećava iskoristivost inertnih plinova u punjenju – Kryptona i Xenona. Također, moguće je žarnu nit zagrijati na puno višu temperaturu, čime se podiže svjetlosna iskoristivost (ovo nije bilo moguće kod standardne žarulje zbog pojačanog isparavanja Wolframa pri višim temperaturama).

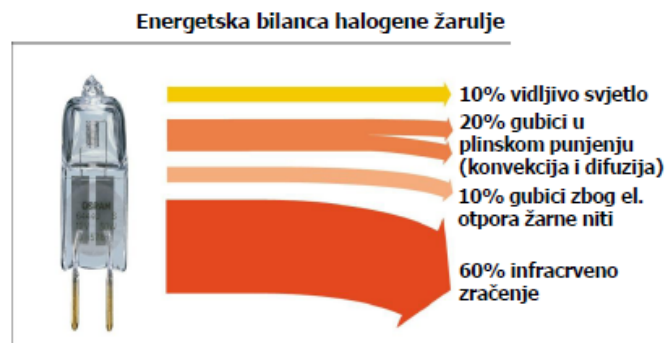
Glavna karakteristika halogenih žarulja je **halogeni kružni proces**.

Wolfram koji isparava sa žarne niti odlazi prema stjenci balona, gdje se pri temperaturi $< 1400\text{ K}$ spaja s halogenidima. Termičko strujanje odvodi ovaj spoj bliže prema žarnoj niti, gdje se pri temperaturi $> 1400\text{ K}$ razgrađuje, a atom Wolframa se ponovno vraća na žarnu nit. Pri tome on ne dolazi na staro mjesto, tako da ipak dolazi do pucanja žarne niti na kraju vijeka trajanja. Pri ovom procesu temperatura žarne niti doseže 3.000 K , a stakla i do 250°C . Zbog toga se mora koristiti balon od kvarcnog stakla, koje je specijalno dotirano tako da ujedno i zadržava štetno **UV** zračenje.

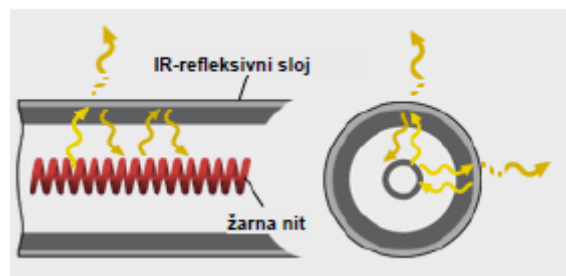
Halogena žarulja jako je osjetljiva na promjene pogonskog napona. Pogotovo kod niskonaponskih žarulja (12 V AC), do izražaja dolazi osjetljivost vijeka trajanja o naponu. Zbog toga povećanje pogonskog napona od samo **5%** ($12,6\text{ V}$) donosi smanjenje vijeka trajanja za **40%!!!** Do ovakve drastične promjene dolazi zbog toga što se halogeni kružni proces odvija samo u strogim temperaturnim (naponskim) granicama, te prestaje pri većim odstupanjima, čime se automatski znatno smanjuje vijek trajanja. Do povećanja napona dolazi uglavnom zbog neodgovarajućih transformatora (magnetski transformatori imaju nelinearnu karakteristiku, pa pri rasterećenju dolazi do rasta napona). Zbog toga suvremeni rasvjetni sustavi koriste elektroničke transformatore. Pri smanjenju napona dolazi do blagog povećanja vijeka trajanja, ali ne takvog kao kod standardnih žarulja.

Osnovne prednosti halogene žarulje u odnosu na standardnu žarulju:

- Viša svjetlosna iskoristivost (do 25 lm/W)
- Dulji vijek trajanja (do 4000 h)
- Optimalna kontrola svjetla
- Male dimenzije
- Konstantan svjetlosni tok kroz vijek trajanja
- Viša temperatura boje – sjajno, bijelo svjetlo



Nove tehnologije omogućuju dodatno poboljšanje iskoristivosti halogene žarulje. Uporabom specijalnog IR-refleksivnog sloja (**IRC** – Infra Red Coating), moguće je dio generiranog IR zračenja vratiti natrag na žarnu nit, te ga upotrijebiti za zagrijavanje žarne niti, zbog čega je potrebno dovesti manje el. energije. Na ovaj način postiže se iskoristivost halogenih žarulja povećava do **30%**



Žarulje na izboj u plinu

Svjetlost se generira principom luminiscentnog zračenja.

Električni izboj dešava se u cijevi napunjenoj plinom ili parama zbog djelovanja električnog polja između dvije elektrode. Pri tome u plinu, koji prije dovođenja napona na elektrode nije vodljiv, nastaju slobodni nositelji u obliku iona i elektrona.

Slobodni elektroni, pod djelovanjem električnog polja, mogu s atomima plina izazvati sljedeće vrste sudara:

- mala brzina elektrona (**elastični sudar**) – elektron se u sudaru s atomom plina samo reflektira uz neznatni gubitak energije (koja se pretvara u toplinu)
- srednja i visoka brzina (**uzbudni sudar**) – elektron podiže energiju atoma plina na višu razinu, pri čemu atom nakon kraćeg vremena zrači jedan foton.
- vrlo visoka brzina (**ionizirajući sudar**) – elektron izbacuje iz atoma plina elektron, čime atom prelazi u pozitivni ion. Tako nastaju pozitivni i negativni nosioci, te raste struja.

Bez ograničenja struje razvio bi se lavinski efekt, pa se koriste ograničivači struje (prigušnice). Prigušnice su induktiviteti koji se spajaju u seriju s izvorom svjetlosti.

Flourescentna cijev

Kod niskotlačnih živinih žarulja (kao što su fluorescentne i fluokompaktne žarulje), atomi žive ne emitiraju vidljivu svjetlost kao rezultat sudara, već emitiraju UV zračenje. Ovo UV zračenje pretvara se u vidljivu svjetlost zahvaljujući fluorescentnom materijalu (fosforu) koji se nalazi na unutarnjoj stani cijevi. Ovaj proces naziva se foto luminiscencija, i kao energiju pobude koristi elektromagnetsko zračenje (UV zračenje).

Flourescentne žarulje pripadaju grupi niskotlačnih izvora na izboj. Svjetlost se generira izbojem u živinim parama visoke luminoznosti, pri čemu se stvara uglavnom nevidljivo UV zračenje, koje se fosfornim slojem na unutrašnjoj stjenki cijevi pretvara u vidljivo svjetlo. Ovaj princip generiranja svjetla naziva se foto-luminiscencija.

Kao i sve žarulje na izboj, fluorescentne cijevi ne mogu se priključiti direktno na mrežni napon, već trebaju prigušnicu, te starter (pri paljenju trebaju viši napon nego u pogonu).

Svjetlosni tok s vremenom opada (zbog pada iskoristivosti fluorescentnog sloja i trošenja elektrode), što se može poboljšati uporabom elektroničkih predspojnih naprava.

Svjetlosni tok fluorescentne cijevi ovisan je o temperaturi okoline. Postoje specijalne izvedbe za uporabu na niskim temperaturama.

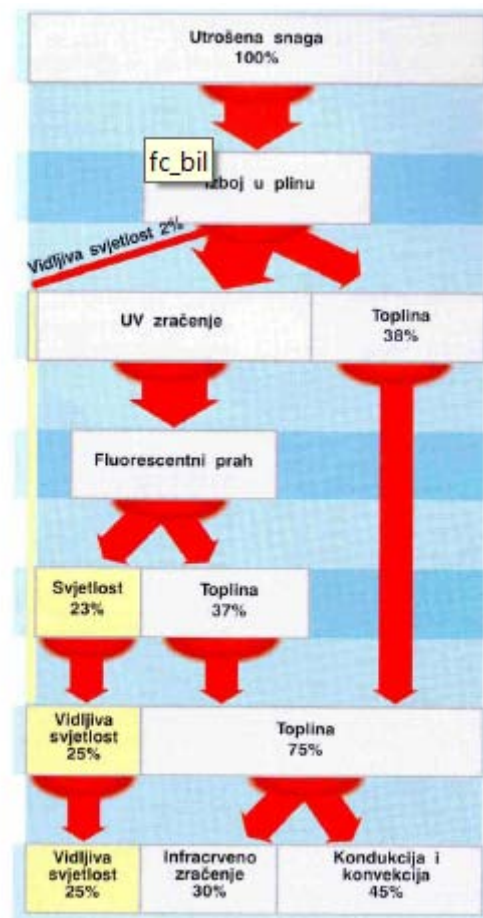
Vijek trajanja flourescentnih cijevi ovisi o:

- Periodu paljenja/gašenja
- Prespojnim napravama
- Korištenom flourescentnom materijalu

Svjetlo flourescentnih cijevi je:

- Jednoliko
- Ekonomično

- Dugotrajno
- Nije točkasto



Energetska bilanca fluorescentne cijevi

PREDAVANJE 4 – IZVORI SVJETLOSTI

Fotoluminiscencija:

- **Izboj u plinu** - pri izboju u plinu, koje nastaje zbog djelovanja električnog polja, moguće je dobiti i zračenje u vidljivom dijelu spektra (npr. živine žarulje, natrijeve žarulje, metalhalogene žarulje)
- **Fluorescencija** - kod fluorescentnih cijevi i fluokompaktnih žarulja, pri izboju u živinom plinu generira se gotovo isključivo UV zračenje, koje se pretvara u vidljivo zračenje fosfornim omotačem koji je nanešen na unutrašnjost staklene cijevi. Budući da ovo zračenje traje samo dok traje pobuda, govorimo o fluorescenciji. Danas se najviše koriste kalcij halofosfatni fosfori u kombinaciji s fosforima koji se aktiviraju elementima rijetkih zemalja.
- **Fosforescencija** - kod nekih fluorescentnih materijala elektroni mogu ostati u metastabilnom uzbuđenom stanju kroz neki period koji traje od milisekunda do dana. Nakon prelaska iz tog stanja oni emitiraju svjetlost. Ova pojava naziva se fosforescencija. Za prelazak iz metastabilnog stanja u stanje u kojem se emitira svjetlost potrebna je dodatna energija, koja se obično dobiva IR zračenjem (toplinom). Kratkotrajna fosforescencija se koristi kod fluorescentnih cijevi, kako bi se smanjio utjecaj treptanja zbog pogona na izmjenični napon.

Fluokompaktne žarulje

Savinute fluorescentne cijevi, čime se postižu manje ukupne dimenzije izvora svjetlosti, dok se zadržavaju sve karakteristike rada fluorescentnih cijevi (zbog toga i naziv - "Compact Fluorescent Lamps - CFL").

Fluokompaktne žarulje pripadaju grupi niskotlačnih žarulja na izboj, pri čemu se svjetlost generira principom fotoluminiscencije. Izboj se dešava između elektroda u živinim parama, pri tlaku od cca 1,07 Pa (tlak para tekuće žive pri temperaturi od 40°C. Tlak bitno ovisi o najnižoj temperaturi u cijevi (cold spot) , gdje se kondenzira tekuća živa koja nije u plinovitom stanju. Osim žive u punjenju se obično nalazi i neki inertni plin, kao pomoć pri startanju (argon, kripton, neon, ksenon, ...). Količina žive se bitno smanjuje, i iznosi 5-10 mg u kvalitetnijim cijevima.

Kao i većina žarulja na izboj, fluokompaktne žarulje moraju u pogonu imati, u seriju spojenu, napravu za ograničavanje struje. Ova predspojna naprava, koja se naziva prigušnica, ograničava pogonsku struju na vrijednost za koju je žarulja napravljena, te osigurava potreban startni i pogonski napon. Temperaturu boje svjetla koju daju fluokompaktne žarulje moguće je kontrolirati fosfornim omotačem, kao i kod fluorescentnih cijevi. Standardno se koriste trokomponentni fosfori.

Fluokompaktne žarulje proizvode se u snagama od 3 -57W. Postoje izvedbe s integriranom elektroničkom prigušnicom i standardnim grlom E27 i E14, koje mogu zamijeniti gotovo svaku standardnu žarulju, ostvarujući pri tome uštedu energije od gotovo 80%. Za ovakvu izvedbu fluokompaktnih žarulja koristi se naziv - štedne žarulje.

Vijek trajanja fluorescentnih i fluokompaktnih žarulja određen je gubitkom emisijskog sloja na elektrodama (zbog toga dolazi do zatamnjenja rubova fluocijevi pri kraju životnog vijeka) do kojeg dolazi pri svakom paljenju, ali i normalnim pogonom. Elektroničke predspojne naprave s

predgrijavanjem elektroda znatno produljuju njihov vijek trajanja, budući da zagrijavaju elektrode, čime povišuju njihov otpor (otpor wolframove niti ima pozitivan temp. koeficijent) i time smanjuju startnu struju, odnosno gubitak emisijskog sloja pri startanju. Vijek trajanja standardnih fluorescentnih cijevi s magnetskom predspojnom napravom iznosi 8.000 sati, a s elektroničkom predspojnom napravom i trokomponentnim fosforom produžuje se i do 20.000 sati.

Svjetlosni tok fluorescentnih i fluokompaktnih žarulja se smanjuje tijekom korištenja zbog fotokemijske degradacije fosfornog omotača i sklupljanja naslaga unutar cijevi koje apsorbiraju svjetlo. Korištenjem kvalitetnih fosfora i elektroničkih predspojnih naprava moguće je postići održavanje svjetlosnog toka i do 92% nakon 20.000 sati uporabe.

Fluokompaktne žarulje su još osjetljivije na radnu temperaturu od fluorescentnih cijevi, te postoje i specijalne izvedbe koje koriste amalgam umjesto žive, kako bi postigli manju ovisnost svjetlosnog toka o temperaturi, što je pogotovo primjetno kod svjetiljaka manjih dimenzija.

Iskoristivost fluorescentnih/fluokompaktnih žarulja bitno se poboljšava uporabom elektroničkih predspojnih naprava koje rade na višoj frekvenciji (obično 20-30 kHz), zbog smanjenih gubitaka anode. Zbog toga žarulje s elektroničkim prigušnicama obično rade s manjom snagom, uz isti svjetlosni tok.

Predspojne naprave

Predspojne naprave prvenstveno služe za ograničavanje struje, zbog negativne U-I karakteristike žarulja na izboj. Uz to predspojna naprava osigurava i dovoljan napon za početak izboja u plinu. Budući da predspojna naprava osigurava pogonske uvjete žarulje na izboj, potrebno je da njene karakteristika odgovaraju izvoru svjetlosti, inače može doći do velikih odstupanja svjetlosnih karakteristika i vijeka trajanja izvora svjetlosti. Predspojne naprave uvijek troše električnu energiju, te smanjuju iskoristivost kompletnog sustava.

Dijele se na:

- Starter
 - Start fluorescentnih cijevi dešava se u dvije faze: elektrode trebaju biti dovoljno ugrijane da počnu emitirati elektrone i mora postojati dovoljno veliko električno polje između elektroda da se ionizira plinsko punjenje i da dođe do izboja.
 - Za startanje fluorescentnih cijevi i fluokompaktnih žarulja koje koriste vanjski startni element koristi se starter, koji se spaja između elektroda. Zahvaljujući bimetalnom kontaktu, on osigurava predgrijavanje elektroda i postiže dovoljno veliki naponski impuls (300 - 800 V) za početni izboj.
- Prigušnica
 - Služi za ograničavanje struje, te može biti magnetska ili elektronička (objedinjuje i funkciju startera). Sustav s magnetskom prigušnicom predstavlja induktivni teret, te se uvijek koristi kompenzacijski kondenzator.
 - Zbog relativno visokih gubitaka u magnetskim prigušnicama (i do 25%), te niz drugih prednosti, sve više se koriste elektroničke predspojne naprave. Elektroničke

predspojne naprave omogućuju i regulaciju (nije moguće samo smanjiti napon kao kod žarulja sa žarnom niti, budući bi to prekinulo izboj).

Neonske cijevi

Neonske cijevi koriste tinjajuće elektrode ("hladne elektrode") koje koriste jako male struje (rade na povišenom naponu, a za start trebaju do 15 kV). Neonske cijevi ne koriste fosforni omotač na staklu, već se dodatkom žive ili argona (plava boja) ili obojenim staklom mijenja boja neona (koji je u osnovi crven). Koriste se prvenstveno za različite efekte (reklame, ...), ali zbog dodatnog transformatora predstavljaju relativno skupi sustav, koji se sve više mijenja fluorescentnim cijevima, svjetlovodima ili LED sustavima.

Visokotlačne žarulje na izboj

Dijele se na:

- Živine žarulje
- Metalhlogene žarulje
- Visokotlačne natrijeve žarulje

Visokotlačne žarulje na izboj su prema tome izvori luminiscentnog zračenja gdje se potrebna izlazna energija dobiva tokom električne struje.

Izboj u plinu dešava se u žišku, između elektroda. Žižak uvijek sadrži neki startni plin, koji se lagano ionizira i neki element koji isprava pri izboju, i pri tome stvara karakteristično svjetlo. Tako živine žarulje koriste živu, natrijeve natrij, a metalhalogene žarulje mješavinu natrija, skandija, tulija, holmija i disprozija. Žižak se radi od kvarcnog stakla ili specijalne keramike.

Žižak se obično nalazi unutar zaštitnog balona, koji štiti žižak i električne kontakte od vanjskih utjecaja. Osim toga, vanjski balon služi i kao zaštita od UV zračenja, često ima i sloj difuznog materijala, koji smanjuje blještanje samog izvora. Kod živinih žarulja, vanjski balon sadrži i sloj fosfora, koji služi za pretvaranje dijela UV zračenja u vidljivu svjetlost.

Također, vanjski balon može sadržavati i uređaj za pročišćavanje atmosfere unutar balona (obično vakum) koji se naziva geter.

Živina žarulja (HQL)

Svjetlost generiraju izbojem u živinim parama, koji počinje isparavati nakon što se pojavi početni izboj u argonu. Pogonski tlak iznosi od 200 - 400 kPa, i bitno utječe na karakteristike spektra zračenja, koji je uglavnom u hladnijem području (4000 K), te ostvaruje iskoristivost do 60 lm/W.

Faktor uzvrata boje je kategorije 3.

Start se postiže pomoću startne elektrode (SE), a za pogon je potreban prigušnica. Postupak paljenja traje od 3-6 min, a ponovnog paljenja na toplo 5-10 min.

Prosječan vijek trajanja je 16.000 sati.

Ne preporuča se za nove instalacije, zbog velike količine žive bit će zabranjena u EU, već je zabranjena u SAD. Primjene: javna rasvjeta i ind. rasvjeta

Snaga: 50-1000W, 230V

Žarulja s mješanim svjetlom

Žarulja sa mješanim svjetlom je u principu živina žarulja, u kojoj žarna nit koja je dodana u seriju "glumi" ulogu prigušnice.

Postiže se nešto toplija temperatura boje (3.800 K) i poboljšani faktor uzvrata boje (kategorija 2B), kao rezultat djelovanja žarne niti, ali se iskoristivost smanjuje na 20-30 lm/W.

Proizvodi se u snagama 160W - 500W, i prvenstveno se koristi kao zamjena za velike žarulje sa žarnom niti, gdje donose uštede energije do 30%.

Postupak paljenja traje do 2 min, a ponovnog paljenja na toplo 3-5 min.

Metalhalogena žarulja (HQI/HCI)

Metalhalogene žarulje spadaju u grupu visokotlačnih žarulja na izboj. Pri visokom tlaku (~10 bar) plinsko punjenje emitira izravno vidljivo svjetlo pobuđeno elektronima. Dodavanjem elemenata rijetkih zemalja moguće je kontrolirati spektar zračenja.

Koriste sličan princip kao i živine žarulje, s tim da kao dodatak živinom punjenju koriste različite metal halogenide kao dodatak. Metalhalogenidi se raspadaju pri višim temperaturama, nakon čega metali generiraju vidljivo zračenje kompletnog spektra. Približavanjem hladnijoj stijenci balona, oni ponovno rekombiniraju i ciklus se ponavlja. Tlak plina je 400 kPa - 2 hPa.

Dodatkom metalhalogenida postiže se puno kvalitetnije svjetlo (uzvrat boje 1A) i viša iskoristivost (do 120 lm/W). Kombiniranjem različitih metala moguće je dobiti i različite temperature boja - od 3.000 K do 6.500 K.

Proizvode se u snagama od 35W - 3500 W, sa izuzetno širokim područjem primjene (od unutarnje do javne rasvjete, foto rasvjete, efekt rasvjete do auto rasvjete).

Za pogon trebaju poseban visokonaponski startni element (propaljivač) koji daje potreban naponski impuls od 3-6 kV. Postupak paljenja traje do 3 min, a ponovnog paljenja na toplo 5-20 min. Kod specijalnih izvedbi moguće je postići trenutni start na toplo uz odgovarajući propaljivač (naponi i do 40 kV)

Natrijeve žarulje (NAV)

Kod natrijevih žarulja izboj se događa u natrijevim parama uz dodatak ksenona za lakši start i povećanu iskoristivost i male količine žive. Pogonski tlak je 20-40 kPa.

Natrijeve žarulje postižu najveću iskoristivost do 150 lm/W, ali uz slabiji uzvrat boje (kategorija 4, 20-30) i toplu (žutu) temperaturu boje (2000 K).

Ove karakteristike nas zadovoljavaju, i natrijeve žarulje predstavljaju najbolje rješenje za cestovnu rasvjetu.

Postižu prosječan vijek trajanja od 32.000 sati, uz veliku sigurnost (preživljavanje do 95% nakon 16.000 sati pogona - 4 godine u javnoj rasvjeti).

Postupak paljenja traje do 5 min, a ponovnog paljenja na toplo 1-2 min. Ponovno paljenje je brže nego kod metalhalogenih žarulja, zbog manjeg pogonskog tlaka. Naime, kod višeg pogonskog tlaka

ionizacija nije moguća s dostupnim naponom, već je potrebno čekati da se žarulja ohladi, čime joj i pada tlak.

Niskotlačne natrijeve žarulje

Svjetlost se generira izbojem u natrijevim parama pri niskom tlaku (0,7 Pa), čime se postiže gotovo monokromatsko žuto svjetlo (589,0 i 589,6 nm) i izuteno visoka iskoristivost do 200 lm/W. Kao startni plin koristi se neon.

Pri ovako niskom tlaku, natrijeve pare imaju temperaturu od 260°C, koja se održava vanjskim balonom u kojem je vakuum. Svako odstupanje od ove temperature dovodi do bitnih odstupanja od nazivnih pogonskih parametara.

Period startanja traje do 20 minuta, a u početku u izboju dominira neon (crvena boja), kojeg poslije zamjenjuje izrazito žuta boja natrija. Ponovno plajenje je gotovo trenutno.

Kao predspojna naprava najviše se koristi autotransformator, koji daje potreban startni napon od 400 - 550V.

LED

Svjetleća dioda (light-emitting diode - LED) je poluvodički uređaj koji emitira svjetlo u uskom spektru kada je potican tijekom električne struje u pravom smjeru.

Bijelo svjetlo se proizvodi principom fosforescencije.

LED prednosti:

- Male dimenzije
- Visoka otpornost na udarce
- Dugi vijek trajanja bez održavanja
- Visoka iskoristivost u boji
- Usmjereno svjetlo
- Prihvatljiv za okoliš
- Bez IR/UV zračenja
- Puno svjetlo pri niskim temperaturama

LED-tehnologija - pakiranje

Radijalni LED



Radial LED
(3mm/5mm) : 0.1W

Karakteristike:

- integrirane epoksi leće
- Max. struja 20-30 mA

LED u SMT paketu



Power TOPLED
< 0.3 W

Karakteristike:

- Max. struja ~70 mA
- Svj. tok: 4lm



High Flux LED
1.53 W

Karakteristike:

- Max. struja >700 mA
- Svj. tok: >40 lm

Chip-on-board



Compact light
source
~ 10 W....30 W

Karakteristike:

- Max. struja >>1A
- Svj. tok: >100lm

PREDAVANJE 5 – SVJETILJKE

Svjetiljka je naprava koja služi za kontrolu, distribuciju, filtriranje i transformiranje svjetla koje proizvode izvori svjetla.

Svjetiljka se sastoji od:

- jednog ili više izvora svjetlosti
- optičkih uređaja za distribuciju svjetla
- grla za pozicioniranje i priključak izvora svjetlosti na napajanje
- predspojnih naprava za pogon izvora svjetlosti (ako su potrebne)
- mehaničkih elemenata za montažu i zaštitu.

Svjetiljke se moguće podijeliti prema:

- **vrsti izvora svjetlosti koji se koristi**
- **prema raspodjeli svjetlosnog toka** (uglavnom za unutarnju rasvjetu)
 - direktne (90-100% svj. toka usmjereno je prema dole)
 - poludirektne (60-90% svj. toka usmjereno je prema dole)
 - difuzne (kada su komponente svj. toka prema dole i gore podjednake - svaka iznosi 40-60%)
 - poluindirektne (60-90% svj. toka usmjereno je prema gore)
 - indirektne (90-100% svj. toka usmjereno je prema gore)
- **prema raspodjeli jakosti svjetlosti** (uglavnom za vanjsku rasvjetu)
 - s izuzetno uskom, simetričnom distribucijom
 - s uskom distribucijom
 - sa širokom distribucijom
 - sa izuzetno širokom distribucijom
 - sa simetričnim kružnim uzorkom rasvijetljenosti
 - sa simetričnim kvadratastim uzorkom rasvijetljenosti
- **prema simetriji rasposjedjele jakosti svjetlosti**
 - rotaciono simetrične
 - osno simetrične
 - asimetrične
- **prema stupnju zaštite (mehaničke ili električne)**
- **prema načinu montaže**
- **prema načinu primjene**
 - ugradne "downlight" svjetiljke
 - nadgradne svjetiljke
 - "wall washer" svjetiljke
 - akcentne "spotlight" svjetiljke
 - linearne indirektne svjetiljke

- tračne svjetiljke
- industrijske svjetiljke
- reflektori
- cestovne svjetiljke

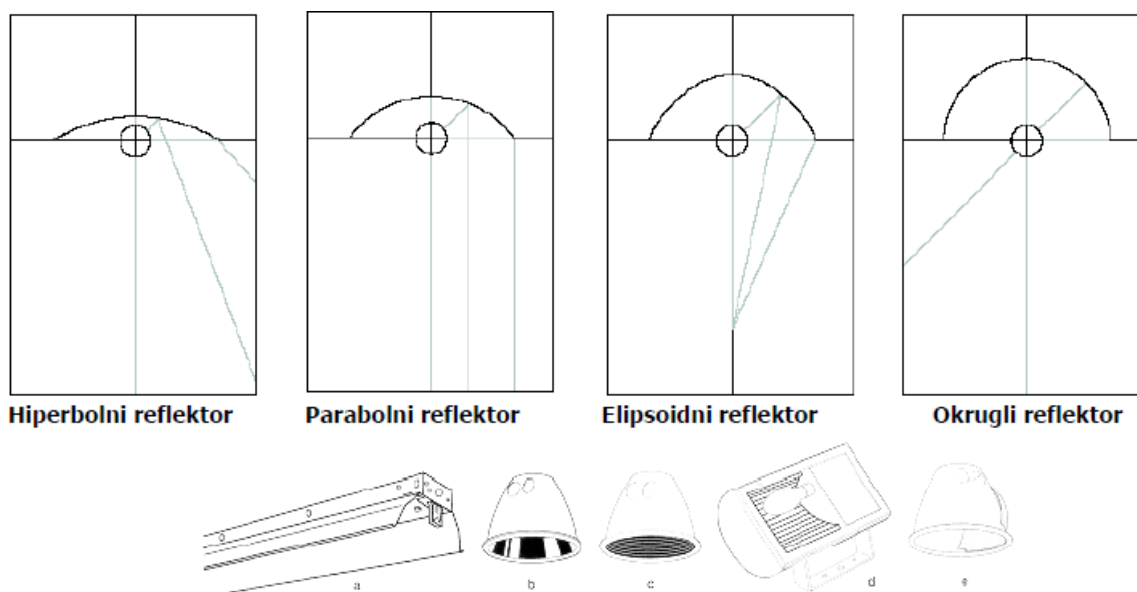
Kontrola rasvjete u svjetiljci

Sustavi za kontrolu svjetla bitno utječu na svjetlosnu iskoristivost svjetiljke, koja se definira kao omjer između ukupnog svjetlosnog toka ugrađenih izvora svjetlosti i svjetlosnog toka koji izlazi iz svjetiljke. Za standardnu svjetiljku iskoristivost je 0,6, dok kod visokokvalitetnih svjetiljaka iznosi i do 0,95. Proizvođači uglavnom daju podatke za pogonsku svjetlosnu iskoristivost svjetiljke, koja uzima u obzir specifičan položaj gorenja, ili utjecaj temperature okoline.

Najvažniji elementi svjetiljke su elementi za optičku kontrolu svjetla - reflektori, refraktori, difuzori i rasteri.

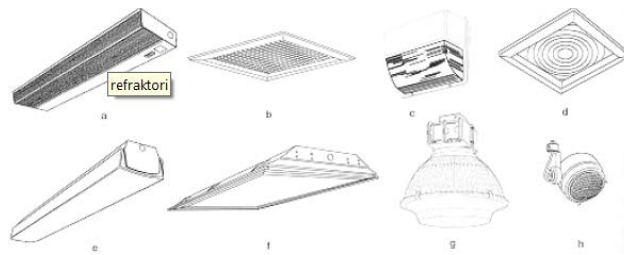
Reflektor

Element (obično od metala ili plastike) s visokim koeficijentom refleksije koji je oblikovan tako da na željeni način usmjerava svjetlo izvora svjetlosti. Dijelimo ih na divergentne i konvergentne. Kod konvergentnih reflektora postoje: sferični - svjetlost se usmjerava u fokus; eliptični - usmjeravaju svjetlost u drugi fokus; parabolični - usmjeravaju svjetlost paralelno.



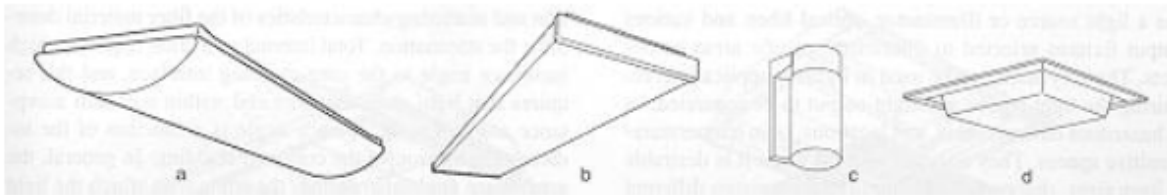
Refraktor

Element za kontrolu koji koristi svojstvo da svjetlo mjenja smjer pri prelasku između dva materijala (npr. zrak-staklo ili zrak-plastika). Uglavnom se koriste plastični materijali u nekoj strukturi (prizme ili piramide), koji dodatno usmjeravaju svjetlo, ili stvaraju dojam da svjetli veća površina svjetiljke.



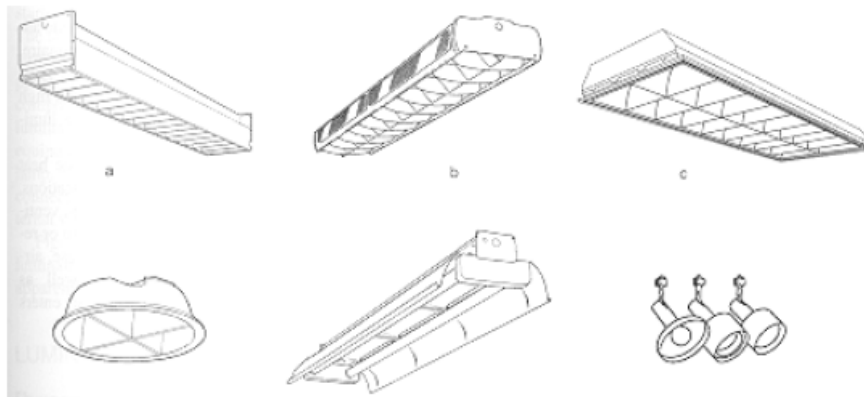
Difuzori

Raspršuju svjetlo u više smjerova, i smanjuju luminanciju povećanjem površine iz koje svjetlo izlazi iz svjetiljke.



Rasteri

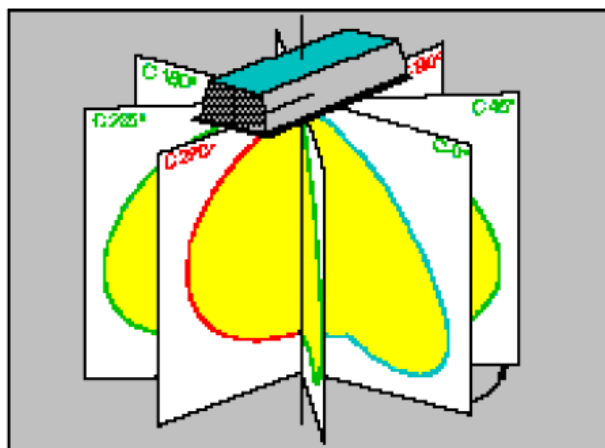
Elementi koji smanjuju ili otklanjaju direktan pogled na izvore svjetlosti u svjetiljci. Osim toga, oni dodatno usmjeravaju svjetlo.



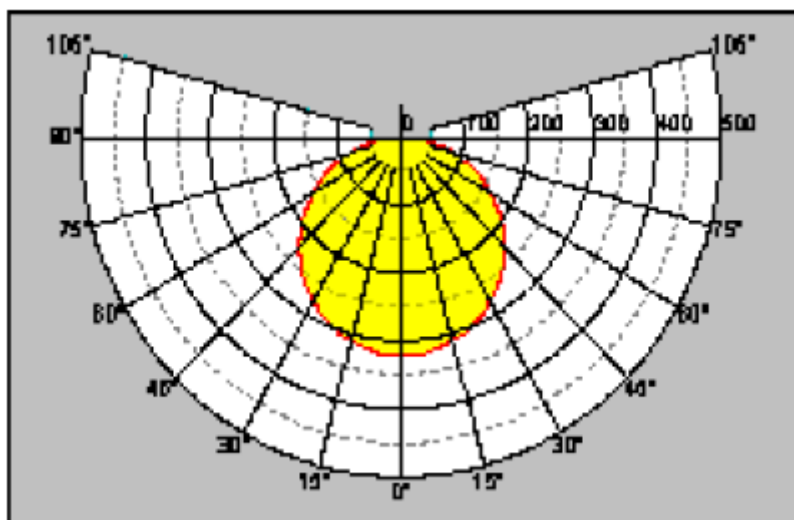
Fotometrijske karakteristike svjetiljke

Kod proračuna rasvjete najvažniju informaciju predstavlja fotometrijska karakteristika svjetiljke - opis raspodjele jakosti svjetlosti u cijeli prostor (**izokandelni dijagram**). Da bi se fotometrijska karakteristika neke svjetiljke mogla koristiti za različite izvore svjetlosti, fotometrijska karakteristika se obično normira za 1.000 lm, odnosno izražava u cd/klm.

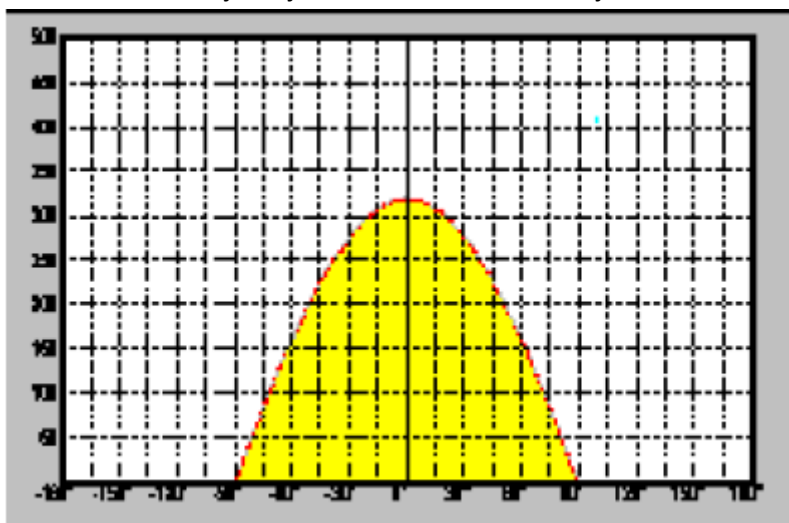
Prostor oko svjetiljke tretira se kao više ravnina. Najčešće se za izražavanje fotometrijskih karakteristika koristi C sustav ravnina. Ravnina 0-180 postavljena je okomito na uzdužnu os svjetiljke. Za rotaciono simetrične svjetiljke, fotometrijska karakteristika definirana je samo jednom krivuljom, dok je kod osno simetričnih svjetiljaka (npr. fluorescentne svjetiljke) potrebno definirati dvije krivulje.



Polarna karakteristika obično pokazuje C0-180 i C90-270 ravninu. Ukoliko svjetiljka ima rotaciono simetričnu karakteristiku, prikazuje se samo jedna ravnina. Centar dijagrama je sredina svjetiljke.



Kod linearne karakteristike kutevi isijavanja nanesseni su na x-os. Vrijednosti su obično cd/klm.



Svjetlosno onečišćenje

Uznemiravanje ljudi, životinja, odnosno prekrivanje zvijezdanog neba zbog neučinkovito koncipiranih svjetiljaka. Ometajući utjecaj svjetlosti, koju isijavaju umjetni izvori svjetla, karakteriziramo štetnim utjecajem na okoliš, kada uzrokuje opasnost, štetu ili uznemiravanje. Svjetlosno onečišćenje može za ugrožene značiti iritirajuće osvjjetljenje ili potpuno zasljepljivanje unutar njihovog životnog prostora. Uvjet smanjenja svjetlosnog onečišćenja je povećanje svjetlosne iskoristivosti na precizno određenoj površini uz nepromijenjeni utrošak energije. To možemo postići jedino upotrebom vrhunske optike i optimiziranim oblicima odsijača.

Gdje nastaje svjetlosno onečišćenje ?

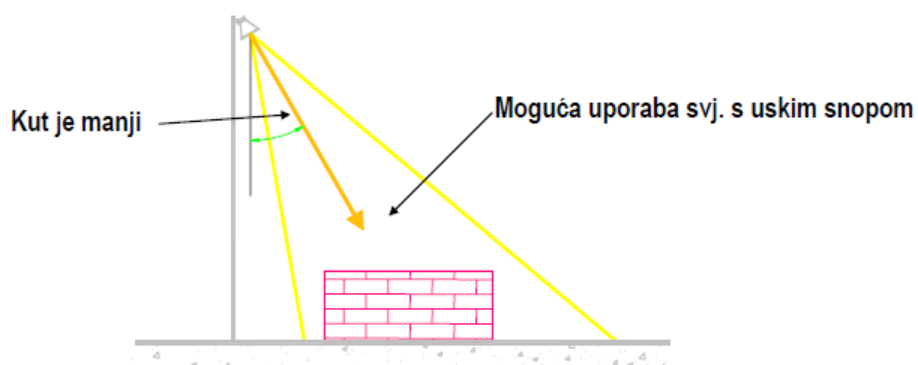
Javno/komercijalno područje	Privatno područje
<ul style="list-style-type: none">▪ rasvjeta<ul style="list-style-type: none">- cesta- igrališta/stadiona- industrijskih zgrada▪ osvjjetljenja zgrada, mostova, spomenika▪ svjetlosne reklame▪ efektna rasvjeta	<ul style="list-style-type: none">▪ rasvjeta ulaza▪ vrtna rasvjeta▪ rasvjetljeni prostori▪ nezatamnjena nadsvjetla u stambenim kućama▪ automobilska rasvjeta

ULOR (Upward Light Output Ratio) - Dio svjetlosnog toka, koji svjetiljka emitira nad horizontalom.

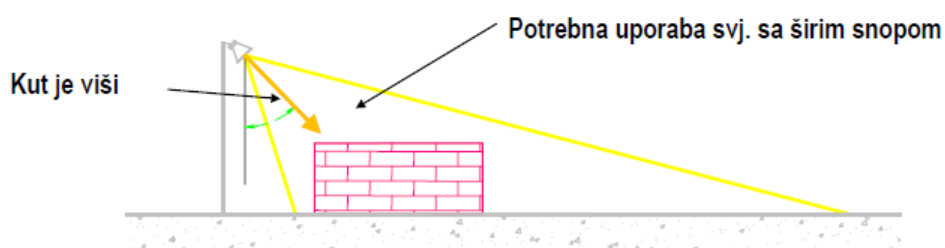
Vrste svjetiljka prema onečišćenju:

- slobodno svjetleće (visoko svjetlosno onečišćenje)
- djelomično onečišćenje (smanjeno svjetlosno onečišćenje)
- zasjenjene (minimalno svjetlosno onečišćenje)

Asimetrična distribucija



(a) Viši stupovi – manje rasipa i blještanja



(b) Niži stupovi – više rasipa i blještanja

Svjetiljka s cut-off distribucijom

Svjetiljka s cestovnom optikom i ravnim staklom (cut off tehnologija) - omogućava kvalitetnu rasvjetu prometnice (svjetlost samo ondje gdje je potrebna) i minimalno bočno isijavanje.