

Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani
Laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo
2. letnik – Aplikativna elektrotehnika - 64627
Električne inštalacije in razsvetljava

Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

predavatelj
prof. dr. Grega Bizjak, u.d.i.e.

Kako deluje vid?



Svetloba in vid

Dva pojma, ki
sta danes
neločljivo
povezana.
Vendar ni bilo
vedno tako.

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

2

Vid je povezan s svetlobo



od približno AD 1000 dalje -
Alhazen (Abu-'Ali Al-Hasan
ibn Al-Hasan ibn Al-
Haytham) arabsko:

أبو علي الحسن بن الهيثم
v knjigi o optiki (Kitab al-
Manazir,

De Aspectibus, 1021) poveže
svetlobo in vid
zaradi dejstva, da nas, če
pogledamo v sonce, v
očeh zaboli.

Vid je od takrat
neločljivo povezan s
svetlobo. 3

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

Zahodni svet 17. stoletja



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

V 17. stoletju se
ne sprašujejo
več
"Kako vidimo?"
temveč že
"Kaj je svetloba?"

4

Teorija delcev



Sir Isaac Newton na podlagi
Gassendijevega dela 1637
postavi teorijo delcev,
po kateri je svetloba
sestavljena iz toka delcev.



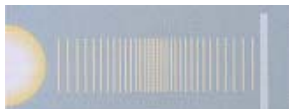
ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

5

Valovna teorija



Christiaan Huygens oporeka Newtonu in 1690
objavi valovno teorijo, po kateri
je svetloba valovanje. Pred njim
je svetlobo kot valovanje opisal
že Hooke 1660.

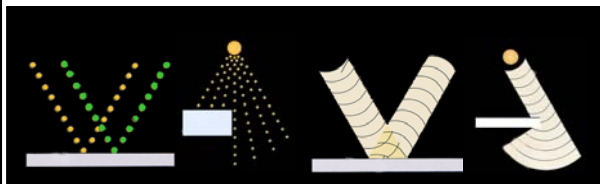


ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

6

Valovanje ali tok delcev

Obe "stranki v postopku" najdeta obilo dokazov v prid svoje teorije in v škodo nasprotnikove teorije.



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

7

Kdo ima prav?

Kdo je imel prav, še danes ne vemo čisto natančno. Je pa res, da je imela teorija delcev predvsem zaradi slavnjšega "očeta" v 17. stoletju precej več privržencev kot teorija valovanja, ki je do leta 1800 skoraj niso omenjali.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

8

Elektromagnetno valovanje

Škotski matematik **James Maxwell** leta 1862 združi elektriko, magnetizem in svetlobo v eno:



Elektromagnetno valovanje

in s tem zabije žebelj v krsto teorije o delcih.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

9

Svetloba kot del EM valovanja

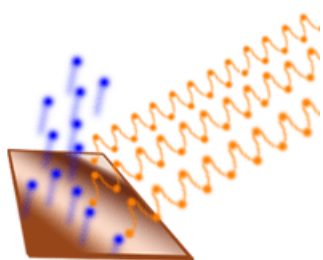


Teorija
elektromagnetnega valovanja
pojasni skoraj vse lastnosti svetlobe.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

10

Svetloba kot del EM valovanja



Nekaj poskusov
pa vseeno kaže,
da ni vse v redu.
Eden od teh je
fotoelektrični
učinek. Težave pa
so tudi s hitrostjo
svetlobe.

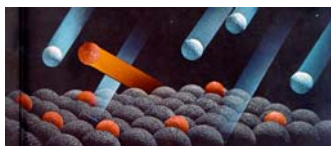
EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

11

Kvantna teorija svetlobe

Po odkritju Heinricha Hertza, da svetloba
lahko izbija elektrone, **Max Planck**
postavi novo teorijo svetlobe:

Kvantno teorijo.

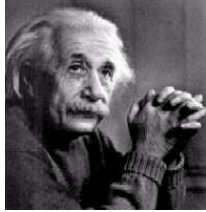


EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

12

Končno!

S pomočjo Planckove kvantne teorije
Albert Einstein razloži še
fotoelektrični efekt
in tako konča zadevo.

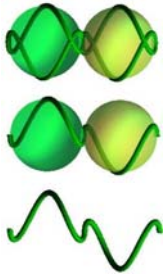


Einstein
delec
svetlobe
poimenuje
foton.

ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

13

Kvantna elektrodinamika



Od Einsteina naprej
govorimo o dualnosti
delcev, kjer ima vsak
delec tudi določene
valovne lastnosti. V
nadaljnjem razvoju je to
razmišljanje privedlo do
kvantne
elektrodinamike.

ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

14

Svetloba kot del EM spektra

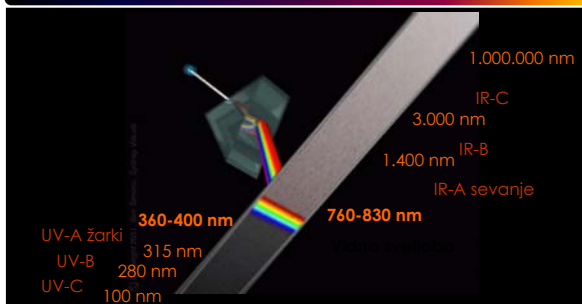
Če svetlobo obravnavamo kot del elektromagnetnega
spektra, se nahaja med mikrovalovi in rentgenskimi žarki.



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

15

Svetloba kot del EM spektra



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

16

Pojavi ob širjenju svetlobe

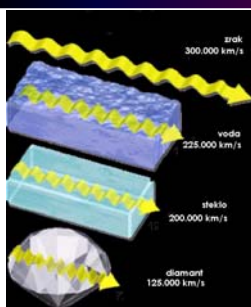
Karkoli svetloba že je, dejstvo je, da lahko ob njenem širjenju po prostoru opazujemo zanimive pojave kot so:

lom, zrcalni in totalni odboj, razklon, vpijanje, razprševanje, odsevanje, presevanje, interferenca, uklon in polarizacija.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

17

Hitrost svetlobe



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

18

Hitrost svetlobe v vakuumu je 299.792.458 m/s.

V različnih medijih se svetloba širi različno hitro.

Razmerje med hitrostjo svetlobe v vakuumu in mediju podaja lomni količnik.

Lomni količnik

$$n = \frac{c}{v}$$

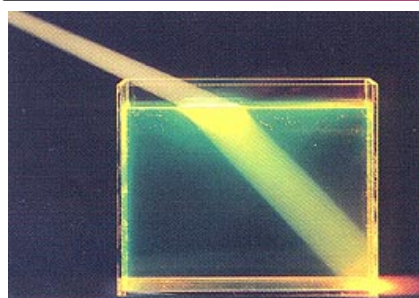
c ... hitrost svetlobe v vakuumu
 v ... hitrost svetlobe v mediju

Zrak	1,0003
Voda	1,33
Glicerin	1,47
Olje	1,515
Steklo	1,52
Kremen	1,66
Cirkonijev silikat	1,92
Diamant	2,42
Svinčev sulfid	3,91

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

19

Lom svetlobe

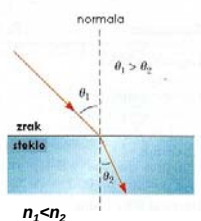


Pri prehodu svetlobe med dvema optično različno gostima snovema se svetloba lomi.

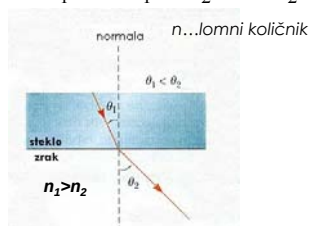
BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

20

Lom svetlobe



$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$



$n \dots$ lomni količnik

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

21

Zrcalni odboj svetlobe

Svetloba se odbija od zglajenih površin z večjo optično gostoto.

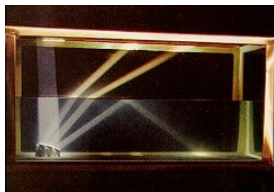


BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

22

Totalni odboj svetlobe

Pri prehodu svetlobe iz optično gostejše v optično redkejšo snov se svetloba lomi, vendar le do določenega kota. Nato pa pride do **totalnega odboja**.

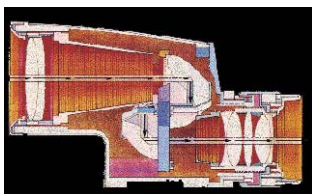


BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

23

Totalni odboj

Totalni odboj s pridom uporabljamo na več področjih.



BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

24

Razklon svetlobe

Ker ima svetloba različnih valovnih dolžin različne lomne količnike, pride do razklona svetlobe.



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

25

Vpijanje svetlobe

Med prehajanjem svetlobe skozi snov, se del energije svetlobe "izgubi".

Snov svetlobo vpije.

Ta energija se se lahko pretvori v:

- toploto
- sevanje z drugo valovno dolžino
- električno energijo
- kemično energijo



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

26

Vpijanje svetlobe

Pri prehodu skozi homogeno snov jakost svetlobe eksponencialno pada.

$$i = i_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$

i_0 ... začetna jakost
 α ... vpojni faktor ($f(\lambda)$)

d ... dolžina poti

Možno je, da ima α negativno vrednost. V tem primeru se svetloba ojači (laser), vendar je potrebno dovesti energijo.

ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

27

Razprševanje svetlobe



Pri prehodu skozi snov se svetloba lahko razprši. Pri tem lahko dodatno pride še do razklona.

Do razprševanja pride v nehomogenih snoveh zaradi številnih odbojev in lomov svetlobe.

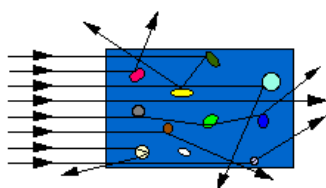
Primer: vodne kaplice v megli.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

28

Razpršeno presevanje svetlobe

Do razprševanja svetlobe pride pri prehodu svetlobe skozi nehomogeno snov.



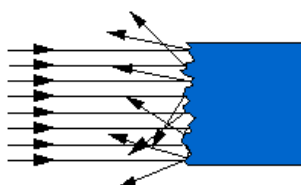
Skozi tako snov ne moremo videti slike predmeta.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

29

Razpršeno odsevanje svetlobe

Če je površina predmeta, od katerega svetloba odseva, nehomogena, pride do razpršenega odsevanja.

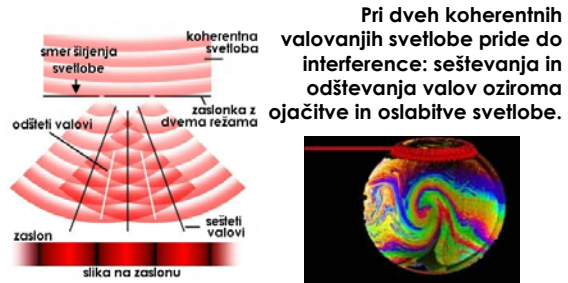


Na taki površini ne dobimo zrcalne slike predmeta.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

30

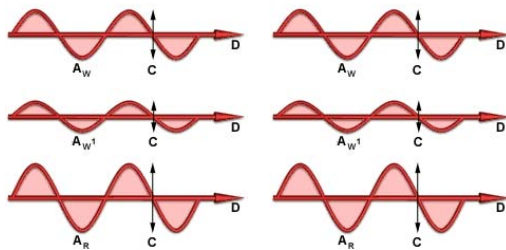
Interferenca svetlobe



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

31

Interferenca svetlobe



Konstruktivna interferenca - seštevanje Destruktivna interferenca - odštevanje

ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

32

Uklon svetlobe

Svetloba se, podobno kot valovanje, uklanja ob robu ovire.



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

33

Polarizacija svetlobe

Svetloba se lahko ob prehodu skozi snov ali

pri odboju

od snovi

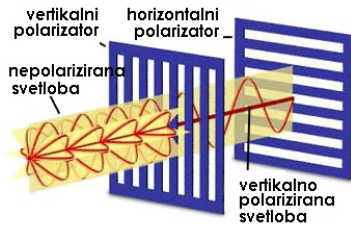
polarizira.

Polarizirana

svetloba

niha samo v

eni smeri.



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

34

Merjenje svetlobe



Fiziki, ki ponavadi
želijo vse izmeriti,
so za merjenje
svetlobe (in drugih
elektromagnetnih
valovanj) postavili
RADIOMETRIJO.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

35

Energija in moč, ki jo oddaja vir



Vir s sevanjem oddaja
energijo in moč.

Govorimo o **sevalnem
toku ali fluksu (radiant
flux)**, ki predstavlja
energijo, ki jo vir izseva
v enoti časa.

Φ_e sevalni tok (W)

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

36

Jakost sevanja



Če vir ne seva energije v vse smeri enakomerno, lahko govorimo o **jakosti sevanja** (radiant intensity). Jakost sevanja je definirana s pomočjo sevalnega toka v enoti prostorskega kota.

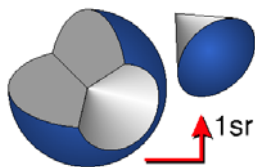
$$I_e \text{ jakost sevanja (W/sr)} \quad I_e = \frac{\phi_e}{\omega}$$

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

37

Prostorski kot

$$\omega = \frac{A}{r^2}$$



Prostorski kot je definiran kot razmerje med površino krogelnega izseka in polmerom krogle.

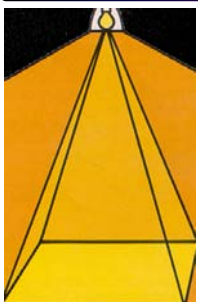
Enota je steradian (sr).

Podobno je definiran tudi ravninski kot: kot razmerje med krožnim lokom in polmerom kroga. Enota je radian (rd).

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

38

Obsevanost



Obsevanost (irradiance) je merilo za količino sevalnega toka, ki pada na neko ploskev oziroma ploskovno gostoto sevalnega toka.

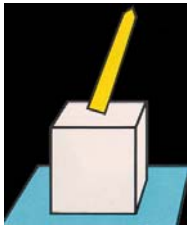
$$E_e = \frac{\phi_e}{A}$$

E_e obsevanost (W/m²)

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

39

Sevalnost



S sevalnostjo (radiance) označimo jakost sevanja določene ploskve pod določenim kotom.

$$L_e = \frac{I_e}{A \cdot \cos \theta}$$

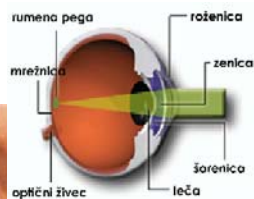
L_e sevalnost (W/rd m²)

EUR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

40

Človeško oko - organ vida

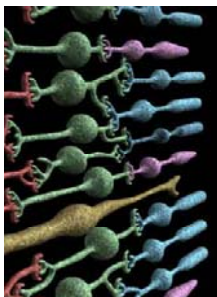
Človeško oko je organ s katerim zaznavamo svetlobo.



EUR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

41

Kako ločimo barve?

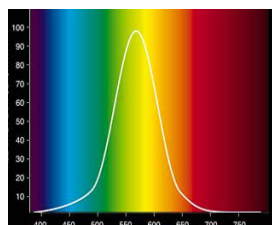


- Paličnice so bolj občutljive na svetlobo, vendar ne ločijo barv.
- Čepnice potrebujejo za delovanje več svetlobe, zato pa ločijo tudi barve.
- Vendar pa čepnice niso enako občutljive na vse barve.

EUR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

42

Za oči niso vsi "Watti" enaki



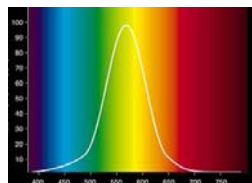
EUR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

"Watti" z 555 nm valovne dolžine imajo večji učinek kot ostali "Watti". Zato je potrebno pri vrednotenju svetlobe upoštevati tudi valovno dolžino.

43

Za oči niso vsi "Watti" enaki

"Wattom" v svetlobni tehniki pravimo "Lumni", povezava pa je določena s spektralno občutljivostjo očesa:



EUR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

1W pri 400 nm je 0,000 lm
1W pri 500 nm je 220,609 lm
1W pri 600 nm je 430,973 lm
1W pri 700 nm je 2,732 lm
1W pri 800 nm je 0,000 lm

1W pri 555 nm je 683,000 lm

44

Fotometrične enote

Na podlagi fizikalnih enot so bile določene fotometrične enote:

- Sevalni tok $\Rightarrow$ Svetlobni tok
- Jakost sevanja $\Rightarrow$ Svetilnost
- Obsevanost $\Rightarrow$ Osvetljenost
 - Sevalnost $\Rightarrow$ Svetlost

EUR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

45

Svetlobni tok



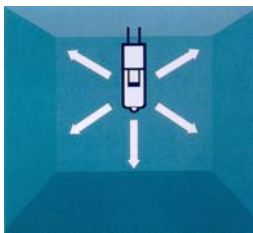
Svetlobni tok (**Luminous flux**) je merilo za količino energije, ki jo vir seva v prostor. Je ekvivalent moči v "Wattih" vendar z upoštevanjem občutljivosti oči na svetlobo posameznih valovnih dolžin.

Φ lumen (lm)

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

46

Svetlobni tok



Svetlobni tok dobimo iz izsevane moči preko formule:

$$\Phi = K_m \cdot \int_0^\infty \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Kjer je K_m enak 683 lm/W in predstavlja svetlobni tok (v lm) pri 1W izsevane moči z valovno dolžino 555 nm.

Φ lumen (lm)

1 W svetlobe z 555 nm podnevi pomeni 683 lm
1W svetlobe z 507 nm ponoči pomeni 1700 lm

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

47

Svetlobni tok



Nekaj karakterističnih vrednosti:

- Navadna žarnica 100W
1300 lm
- Fluorescenčna svetilka 58 W
5200 lm
- Visokotlačna natrijeva sijalka 100W
10.000 lm
- Nizkotlačna natrijeva sijalka 90W
13.500 lm

Φ lumen (lm)

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

48

Svetilnost



Svetilnost (**Luminous intensity**) je merilo za svetlobni tok v določeni smeri. Vsota svetilnosti v vseh smereh je enaka svetlobnemu toku.

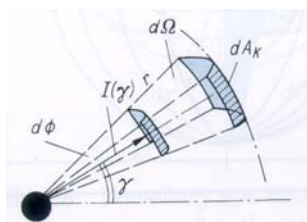
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

1 candela (cd)

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

49

Svetilnost



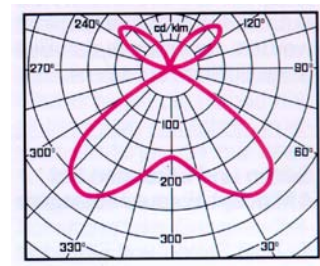
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Candela (cd) je osnovna enota SI in je enaka svetilnosti, ki jo v izbrani smeri seva vir z močjo 1/683 W in valovno dolžino 555 nm (poenostavljena definicija).

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

50

Svetilnost



Svetilnost je odvisna od izbrane smeri, zato jo podajamo v polarnih diagramih.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

51

Svetilnost



Nekaj karakterističnih vrednosti:

- Sveča
0,6 do 1,0 cd
- Navadna žarnica 100W
110 cd
- Natrijeva visokotlačna sijalka 70W
500 cd
- Sonce (zunaj atmosfere)
 $3 \cdot 10^{27}$ cd

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

52

Osvetljenost



Osvetljenost
(Illuminance) je merilo
za količino svetlobnega
toka, ki pada na neko
ploskev.

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

E lux (lx)

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

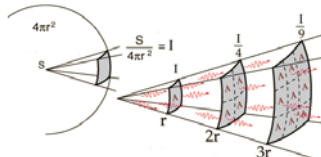
53

1. osnovni zakon "svetlobe"

Zakon " $1/r^2$ " ali fotometrični zakon oddaljenosti

Energija, ki jo seva vir, je konstantna, ker pa površina z razdaljo od vira
narašča z kvadratom razdalje, gostota energije na površino

pada z kvadratom
razdalje od vira.
Gostota energije
je torej obratno
sorazmerna kvadratu
razdalje od vira.

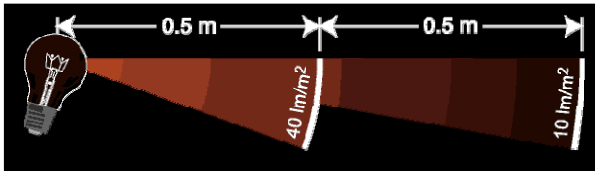


BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

54

1. osnovni zakon "svetlobe"

Zakon " $1/r^2$ " ali fotometrični zakon oddaljenosti



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

55

Osvetljenost

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \gamma$$

Oziroma pri ploskvi, ki je pravokotna na smer svetlobe:

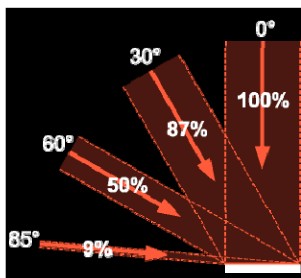
$$E = \frac{I}{r^2}$$

Osvetljenost lahko izračunamo tudi iz svetilnosti s pomočjo " $1/r^2$ " zakona oziroma fotometričnega zakona oddaljenosti.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

56

2. osnovni zakon "svetlobe"



"Kosinusni" zakon

Energija, ki pade na ploskev, ki ni pravokotna na smer sevanja je enaka energiji, ki bi končala na pravokotni ploskvi pomnoženi z kosinusom kota nagnjenosti:

$$E = E_0 \cdot \cos \theta$$

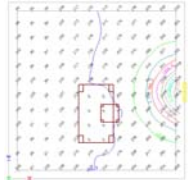
EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

57

Osvetljenost



Osvetljenost je veličina, ki jo največkrat računamo ali merimo.



Tudi predpisi, ki obravnavajo razsvetljavo, podajajo potrebne osvetljenosti v prostorih.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

58

Osvetljenost

Nekaj karakterističnih vrednosti:



• Travniki ob jasnem poletnem dnevu ob 12:00
100.000 lx

• Travniki v senci drevesa
10.000 lx

• Namizna površina v pisarni
500 lx

Žarnica moči 100W na razdalji 1m
110 lx

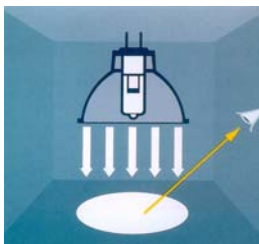
• Cesta razsvetljena s cestno razsvetljavo
3 lx

• Travniki v mesečini
0,05 lx

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

59

Svetlost



Svetlost (**luminance**) je merilo za občutek, ki ga neka površina povzroča v naših očeh (temno - svetlo). Je edina svetlobno tehnična veličina, ki jo lahko ocenimo z očmi.

L (cd/m²)

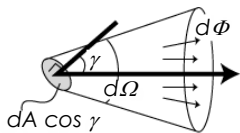
EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

60

Svetlost

Svetlost je definirana s sledečo enačbo:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega}$$



Pri tem je $d\Phi$ del svetlobnega toka v prostorskem kotu $d\Omega$. dA je del površine tega snopa, ki vsebuje izbrano točko in γ kot med normalo te ploskve in smerjo snopa.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

61

Svetlost

Enačba se da preoblikovati v:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\gamma}$$

kadar je opazovana točka del ploskve, ki sveti s podano svetilnostjo;

$$L = \frac{dE}{\cos\gamma \cdot d\Omega}$$

kadar je opazovana točka del ploskve, ki je osvetljena.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

62

Svetlost

Nekaj karakterističnih vrednosti:

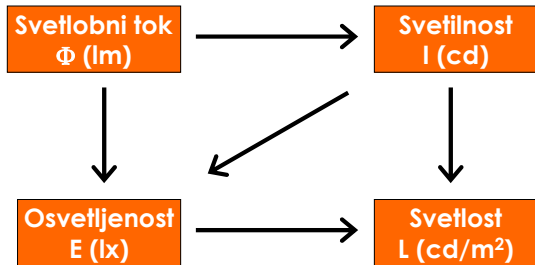


- Sonce
1.600.000 kcd/m²
- Navadna žarnica (prozoren balon)
15.000 kcd/m²
- Fluorescenčna sijalka
10 kcd/m²
- Sveča
8 kcd/m²
- Luna
2,5 kcd/m²
- Stena sobe osvetljena z električno razsvetljavo
0,04 kcd/m²

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

63

Medsebojna povezanost fotometričnih veličin



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

64

Kaj, kako in s čim merimo

- SI sistem enot definira enoto za svetilnost I (cd)
- Veličino predstavimo z normalo.
- Merilnike se umerja tako, da jih primerjamo z normalo enote.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

65

Candela

Definicija candele

1 candela (cd) je svetilnost v določeni smeri vira z monokromatsko svetlobo frekvence 540×10^{12} Hz, ki ima jakost sevanja v tej smeri $1/683$ W.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

66

Fotometrične normale - candela



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

Candelo ni mogoče realizirati na podlagi definicije, zato se danes uporablja **kriogenški radiometer** s katerim umerimo **merilnik osvetljenosti (lux-meter)**.

67

Fotometrične normale - candela



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

S pomočjo merilnika osvetljenosti se normala prenese na **posebne žarnice**, ki so na eni strani prebarvane s črno barvo, da se zmanjšajo odsevi. **Candela se tako hrani kot set posebnih žarnic.**

68

Fotometrične normale - Lumen



ElR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

Večina normal za svetlobni tok je danes izvedenih kot posebne žarnice ali fluorescentne cevi. Pri slednjih je potrebno uporabljati ustrezno umerjeno predstikalno napravo

69

Fotometrične normale - lux

Posebne normale za osvetljenost ni.
Uporabljajo se ustrezno umerjeni
precizijski merilniki osvetljenosti
(lux-metri)



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

70

Fotometrične normale - cd/m^2

Normala za svetlost je
narejena iz krogle v kateri
je posebna žarnica. En del
plašča krogle je
nadomeščen s posebno,
za svetlobo ustrezno
prepustno snovjo.
Definirana svetlost se
nanaša na sredinski del
tega "okenca"

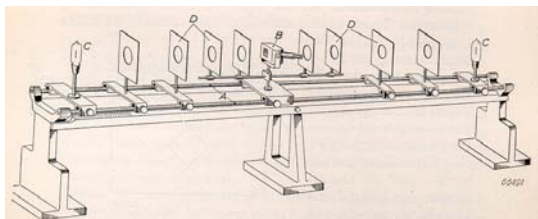


EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

71

S čim merimo (smo merili) svetlobo

Včasih so se fotometrične meritve izvajale na
fotometrični klopi s pomočjo merilčevih oči.

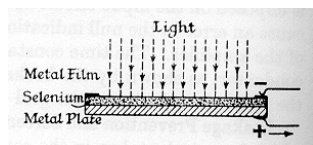


EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

72

Fotoelement

Danes uporabljamo fotoelement ali foto-voltaično celico (fotogeneratorsko celico), ki je polprevodniška struktura, na kateri se ob osvetljenosti pojavi električna napetost.



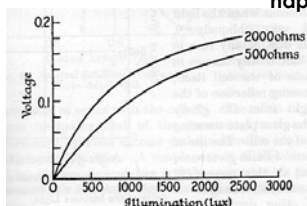
Svetloba izbije iz polprevodnika elektrone, ki jih zaporni pas polprevodniškega spoja loči, zaradi česar dobimo na kontaktih celice električno napetost.

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

73

Fotoelement

Napetost na fotoelementu je odvisna od osvetljenosti, vendar žal ne linearno. Poleg tega je napetost razmeroma majhna.

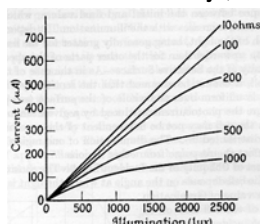


BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

74

Fotoelement

Če pa fotoelement kratko sklenemo oziroma vstavimo v vezje, bo skozi njega tekel tok,

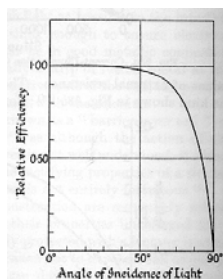


ki je pri majhni upornosti vezave linearno odvisen od osvetljenosti.

BR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

75

Fotoelement



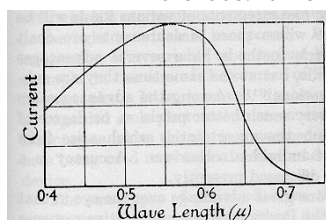
Izkoristek fotoelementa in s tem tudi tok skozenj je odvisen od kota, pod katerim svetloba vpada na fotoelement. Do kota 50° je skoraj izkoristek praktično linearen, potem pa začne padati.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

76

Fotoelement

Tok skozi fotoelement je odvisen tudi od barve svetlobe. Žal ne enako kot človeške oči.



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

77

Fotoelement - luxmeter

- Fotoelement meri količino svetlobnega toka (energije), ki pade na njegovo površino, torej **osvetljenost**.
- Velika prednost fotoelementa je to, da ne potrebuje dodatnega vira napajanja.
- Najbolj preprost merilnik osvetljenosti je tako zaporedna vezava fotoelementa in galvanometra oziroma občutljivega merilnika toka.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

78

Fotoelement - luxmeter

Zahteve za merilnik osvetljenosti:

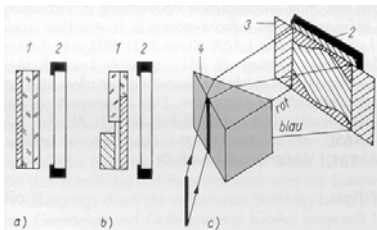
preprosta uporaba;

- linearna odvisnost toka od osvetljenosti;
- prilagojenost spektralni občutljivosti človeškega očesa;
- upoštevanje "kosinusnega zakona";
- temperaturno neodvisnost.

Fotoelement - spektralna občutljivost

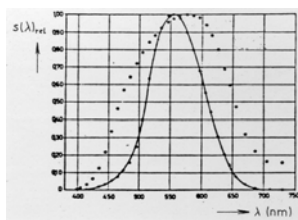
Za prilagoditev spektralni občutljivosti očesa lahko uporabimo:

- a) polni filter
- b) pasovni filter
- c) spektralno šablono

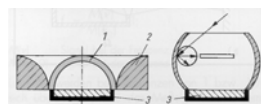


Fotoelement - spektralna občutljivost

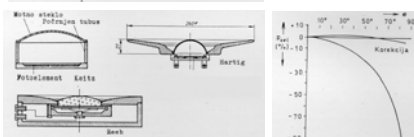
Največji pogrešek se pri merilnikih osvetljenosti pojavi ravno zaradi neprilagojenosti na $V(\lambda)$



Fotoelement - kotna občutljivost



Z omenjenimi nastavki lahko bistveno zmanjšamo pogrešek, ki nastane zaradi vpada svetlobe pod določenim kotom.



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

82

Fotoelement - temperaturna odvisnost

Fotoelementi so temperaturno odvisni:

$$f_6 = \frac{M(\vartheta)}{M(\vartheta_0)} - 1$$

$$\alpha = \frac{\Delta Y}{Y(\vartheta_0)} \cdot \frac{1}{\Delta \vartheta} \cdot 100$$

- kadmijev-sulfid: 5%/K,
- selen: 0,5%/K,
- silicij: 0,1%/K.

Referenčna temperatura pri umerjanju fotoelementov je 25°C. Da se izognemo pogreškom so fotoelementi lahko termostatzirani - zaprti v ohišje s konstantno temperaturo (običajno 30 °C).

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

83

Pogrešek lux-metra

Pogrešek lux-metra se izraža kot celotni pogrešek, ki pa je sestavljen iz večih pogreškov.

Največje vrednosti celotnega pogreška so:

- razred C: $f_{\text{cel}} = 20\%$
- razred B: $f_{\text{cel}} = 10\%$
- razred A: $f_{\text{cel}} = 5\%$
- razred L: $f_{\text{cel}} = 3\%$

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

84

Merilnik osvetljenosti



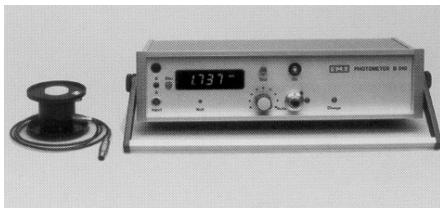
EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

Za merjenje osvetljenosti uporabljamo **lux-meter**. Sestavljen je iz merilne glave (fotocelice) in dela za prikaz izmerjene vrednosti.

85

Merilnik osvetljenosti

Laboratorijski lux-meter omogoča uporabo različnim merilnih glav .



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

86

Meritev ostalih fotometričnih veličin

Za meritev ostalih fotometričnih veličin:

- svetilnost,
- svetlobni tok in
- svetlost

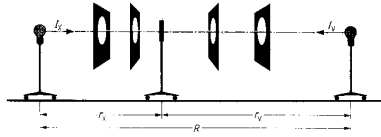
Uporabljamo merilne naprave, ki prav tako temeljijo na fotoelementu (torej meritvi osvetljenosti) ter na fizikalnih povezavah med veličinami.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

87

Meritev svetilnosti

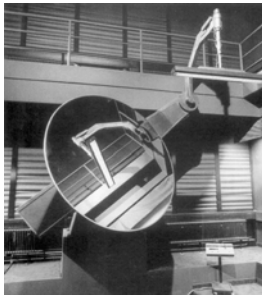
Svetilnost neznanega vira merimo na fotometrični klopi, le da je namesto optičnega fotometra uporabljen fotoelement.



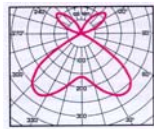
EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

88

Meritev kotne porazdelitve svetilnosti



Kotna porazdelitev svetilnosti se meri s posebnimi merilnimi napravami - goniofotometri.



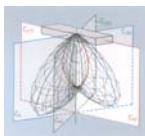
EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

89

Merilnik svetilnosti



Možni sta dve osnovni izvedbi: merilnik se premika po obli okoli vira ali merilnik je pri miru, vir pa se premika okoli osi.



EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

90

Merilnik svetlosti

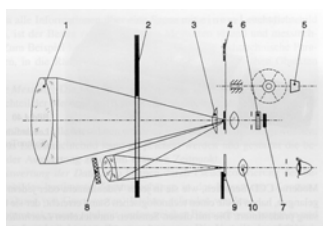


Tudi svetlost se danes meri preko meritve osvetljenosti. Uporablja se posebne, kamere podobne, merilnike ki z optičnim sistemom leč omejijo svetlobni snop, ki pade na merilno fotocelico.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

91

Merilnik svetlosti



- 1..objektiv
- 2..zaslonka
- 3..leča merilnega polja
- 4..zaslonka merilnega polja
- 5..nastavitev zaslonke
- 6.. $V(\lambda)$ filter
- 7..fotoelement
- 8..zrcalni sistem
- 9..notranji prikazovalnik
- 10..okular

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

92

Merilnik svetlosti

Z merilnikom merimo povprečno svetlost predmetov, ki se nahajajo znotraj določenega prostorskega kota.



Merilni koti se podajajo v stopinjah projekcije prostorskega kota na vertikalno ali horizontalno ravnino.

Običajno se uporabljajo merilni koti: 3° , 1° , $20'$ in $6'$

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

93

Merilnik svetlobnega toka

Svetlobni tok je možno izračunati iz izmerjene kotne porazdelitve svetilnosti okoli vira oziroma iz izmerjene osvetljenosti na površini (namišljene) krogle okoli svetlobnega vira.

$$\Phi = 2\pi r^2 \int E(\gamma) \sin \gamma \, d\gamma \, \Omega_0$$

Merilnik svetlobnega toka



Za izračun svetlobnega toka je potrebno izmeriti osvetljenosti na (namišljeni) sferi okoli vira. Razdalja med merilnikom in virom pri tem ni pomembna.

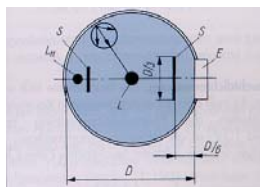
Merilnik svetlobnega toka



Za merjenje svetlobnega toka lahko uporabljamo tudi fotometrične ali integracijske krogle. Merjeni vir zapremo v kroglo, katere notranje stene imajo znano odbojnost.

Merilnik svetlobnega toka

Zaradi difuzijske odbojnosti notranjih sten je po celotni steni osvetljenost enaka.



Na delu stene namestimo merilnik osvetljenosti in iz izmerjene vrednosti lahko sklepamo na celoten svetlobni tok. Merimo pa lahko tudi primerjalno.

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

97

Kaj danes merimo?

Meritve osvetljenosti:

- meritve osvetljenosti notranjih prostorov
- meritve osvetljenosti delovnega mesta
- meritve osvetljenosti zunanjih površin
 - meritve osvetljenosti z varnostno razsvetljavo

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

98

Kaj danes merimo?

Meritve svetlobnega toka:

- meritve svetlobnega toka svetlobnih virov (proizvajalci virov)
- meritve svetlobnega toka svetilk (proizvajalci svetilk)

EIR: Fizikalne osnove svetlobe in fotometrija

99

Kaj danes merimo?

Meritve svetilnosti:

- meritve svetilnosti virov (proizvajalci virov)
 - meritve kotne porazdelitve svetilnosti virov (proizvajalci virov)
 - meritve kotne porazdelitve svetilnosti svetilk (proizvajalci svetilk)

Kaj danes merimo?

Meritve svetlosti:

- meritve svetlosti prometnih površin
- meritve svetlosti površin v notranjih prostorih (bleščanje)
- meritve svetlosti osvetljenih zunanjih površin (uredba o svetlobnem onesnaženju nočnega neba)

... in še:

Vprašanja?
