



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Mariusz Deląg

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Technika świetlna

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1.	Promieniowanie elektromagnetyczne, widmo optyczne	3
1.1.	Promieniowanie elektromagnetyczne	3
1.2.	Widmo elektromagnetyczne i zakres optyczny	3
1.3.	Dziedziny pomiarowe promieniowania optycznego	5
1.4.	Podstawowe wielkości radiometryczne.....	5
1.4.1.	Strumień promieniowania.....	6
1.4.2.	Natężenie promieniowania	6
1.4.3.	Radiancja	6
1.4.4.	Natężenie napromieniowania.....	6
1.5.	Podstawowe wielkości fotometryczne.....	7
1.5.1.	Strumień świetlny	7
1.5.2.	Natężenie światła	7
1.5.3.	Luminancja.....	7
1.5.4.	Natężenie oświetlenia	8
1.6.	Podstawowe wielkości kolorymetryczne	8
1.6.1.	Temperatura barwowa skorelowana	8
1.6.1.	Wskaźnik oddawania barw.....	9
2.	Zdolność widzenia, prawo Plancka i Webera	9
2.1.	Fizjologia narządu wzroku	9
2.2.	Fotoreceptory i mechanizm widzenia.....	11
2.3.	Widzenie fotonowe, skotopowe i mezopowe	13
2.4.	Akomodacja i adaptacja wzroku	13
2.5.	Prawo Plancka.....	14
2.6.	Prawo Webera	15
3.	Źródła światła	15
3.1.	Żarówka	16
3.2.	Niskoprężna lampa sodowa	18
3.3.	Wysokoprężna lampa sodowa	19
3.4.	Niskoprężna lampa rtęciowa.....	20
3.5.	Wysokoprężna lampa rtęciowa	22



3.6.	Lampa metalohalogenkowa	23
3.7.	Źródła LED.....	24
3.7.1.	Metody uzyskiwania światła i barw w diodach LED.....	25
4.	Literatura	28



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Promieniowanie elektromagnetyczne, widmo optyczne

1.1. Promieniowanie elektromagnetyczne

Promieniowanie elektromagnetyczne to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego, składające się z wzajemnie powiązanych pól elektrycznego i magnetycznego. Fale elektromagnetyczne nie wymagają ośrodka materialnego do propagacji i mogą rozchodzić się w próżni.

Podstawowe właściwości fal elektromagnetycznych

Wzajemna prostopadłość pól: Wektor natężenia pola elektrycznego (E) i wektor natężenia pola magnetycznego (H) są prostopadłe do siebie oraz do kierunku rozchodzenia się fali.

Prędkość rozchodzenia: W próżni wszystkie fale elektromagnetyczne rozchodzą się z prędkością światła $c = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$. W ośrodkach materialnych prędkość jest mniejsza.

Parametry falowe:

- Długość fali (λ) – odległość między dwoma punktami o tej samej fazie drgań.
- Częstotliwość (f) – liczba pełnych cykli fali w jednostce czasu.
- Okres (T) – czas jednego pełnego cyklu.

Związki matematyczne:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \text{ [m]} \quad (1)$$

Energia fotonu według prawa Plancka:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ [J]} \quad (2)$$

gdzie:

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$. Stała Plancka.

1.2. Widmo elektromagnetyczne i zakres optyczny

Widmo elektromagnetyczne obejmuje wszystkie możliwe długości fal promieniowania elektromagnetycznego. Podział na zakresy widma elektromagnetycznego przedstawiono w tabeli 1.



Tabela 1. Zakresy widma elektromagnetycznego

Zakres	Długość fali (λ)
Fale radiowe	$>1\text{mm}$
Mikrofale	$1\text{mm}-1\mu\text{m}$
Podczerwień	$1\mu\text{m}-780\text{nm}$
Światło widzialne	$780\text{nm}-380\text{nm}$
Ultrafiolet	$380\text{nm}-100\text{nm}$
Promieniowanie rentgenowskie	$100\text{nm}-0.01\text{nm}$
Gamma	$<0,01\text{nm}$

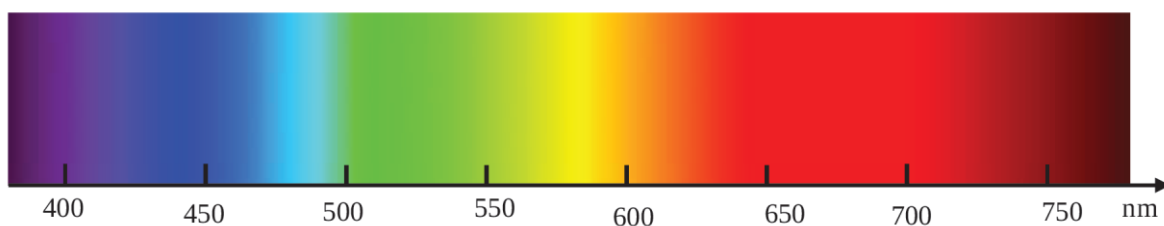
Promieniowanie optyczne stanowi część widma elektromagnetycznego w zakresie od 100nm do 1mm . Zakresy widma optycznego przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zakresy widma optycznego

Zakres	Długość fali (λ)
Ultrafiolet (UV)	$100\text{nm} - 380\text{nm}$
- UV-C (daleki)	$100\text{nm}-280\text{nm}$
- UV-B (średni)	$280\text{nm}-315\text{nm}$
- UV-A (bliski)	$315\text{nm}-380\text{nm}$
Światło widzialne (VIS)	$380\text{nm}-780\text{nm}$
- Fiolet	$380\text{nm}-450\text{nm}$
- Niebieski	$450\text{nm}-495\text{nm}$
- Zielony	$495\text{nm}-570\text{nm}$
- Żółty	$570\text{nm}-590\text{nm}$
- Pomarańczowy	$590\text{nm}-620\text{nm}$
- Czerwony	$620\text{nm}-780\text{nm}$
Podczerwień (IR)	$780\text{nm}-1\text{mm}$
- IR-A (bliska)	$780\text{nm}-1.4\mu\text{m}$
- IR-B (średnia)	$1,4\mu\text{m}-3\mu\text{m}$
- IR-C (daleka)	$3\mu\text{m}-1\text{mm}$

Zakres widzialny widma elektromagnetycznego (Rys. 1) to bardzo niewielki wycinek widma - od czerwieni (ok. 780nm) do fioletu (ok. 380nm).

[Tekst alternatywny. Spektrum światła widzialnego w nanometrach [nm], przedstawiające przejście kolorów od fioletowego przy około 380nm , przez niebieski, zielony, żółty, pomarańczowy, czerwony do ciemnoczerwonego przy około 780nm .]



Rys. 1. Zakres widzialny widma elektromagnetycznego.

1.3. Dziedziny pomiarowe promieniowania optycznego

W technice świetlnej wyróżnia się trzy podstawowe dziedziny pomiarowe promieniowania optycznego:

- **Radiometria**

Mierzy całkowitą energię promieniowania (niezależnie od wrażenia wzrokowego).

Jednostki: wat [W].

Przykłady pomiarów: moc optyczna źródła, gęstość mocy promieniowania.

- **Fotometria**

Dotyczy światła widzialnego (wrażenie wzrokowe człowieka).

Jednostki: kandela [cd], lumen [lm], luks [lx].

Przykłady pomiarów: natężenie oświetlenia, strumień świetlny.

- **Kolorymetria**

Opisuje cechy barwne światła i obiektów.

Jednostki: współrzędne barwne (np. w przestrzeni barw XYZ, $L^*a^*b^*$, $L^*u^*v^*$).

Przykłady pomiarów: temperatura barwowa, współrzędne barw chromatycznych.

1.4. Podstawowe wielkości radiometryczne

Do podstawowych wielkości radiometrycznych należą:

- Strumień promieniowania (Φ_e) - [wat, W].
- Natężenie promieniowania (I_e) - [W/sr].
- Radiancja (L_e) - [W/(sr·m²)].
- Natężenie napromieniowania (E_e) - [W/m²].



1.4.1. Strumień promieniowania

Strumień promieniowania (3) to całkowita moc promieniowania elektromagnetycznego emitowanego lub przenikającego przez daną powierzchnię, zsumowana po wszystkich kierunkach. Jednostką jest wat [W].

$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e(\Omega) d\Omega \text{ [W]} \quad (3)$$

gdzie:

$I_e(\Omega)$ – natężenie promieniowania w kierunku $d\Omega$ [W/sr],

$d\Omega$ – kąt bryłowy [sr].

1.4.2. Natężenie promieniowania

Natężenie promieniowania (4) opisuje moc promieniowania przypadającą na jednostkę kąta bryłowego w danym kierunku. Jednostką jest wat na steradian [W/sr].

$$I_e(\Omega) = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \left[\frac{\text{W}}{\text{sr}} \right] \quad (4)$$

gdzie:

$d\Phi_e$ – strumień promieniowania przez kąt bryłowy $d\Omega$ [W].

1.4.3. Radiancja

Radiancja (5) to moc promieniowania przypadająca na jednostkę powierzchni źródła oraz jednostkę kąta bryłowego, mierzona w danym kierunku. Jednostką jest wat na steradian na metr kwadratowy [W/(sr·m²)].

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA \cos \theta d\Omega} \left[\frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (5)$$

gdzie:

dA –powierzchnia źródła [m²],

θ – kąt między normalną do tej powierzchni, a kierunkiem pomiaru [rad].

1.4.4. Natężenie napromieniowania

Natężenie napromieniowania (6) określa moc promieniowania padającą na jednostkę powierzchni z dowolnych kierunków. Jednostką jest wat na metr kwadratowy [W/m²].

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \int_{\Omega} L_e(\Omega) \cos \theta d\Omega \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$d\Phi_e$ – strumień promieniowania padający na element powierzchni dA [W].



1.5. Podstawowe wielkości fotometryczne

Do podstawowych wielkości fotometrycznych należą:

- Strumień świetlny (Φ) - [lumen, lm].
- Natężenie światła (I) - [kandela, cd].
- Luminancja (L) - [cd/m²].
- Natężenie oświetlenia (E) - [luks, lx].

1.5.1. Strumień świetlny

Strumień świetlny (7) to całkowita moc promieniowania widzialnego emitowanego przez źródło, ważona funkcją czułości fotopowej oka $V(\lambda)$. Jednostką jest lumen [lm].

$$\Phi = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad [\text{lm}] \quad (7)$$

gdzie:

$\Phi_e(\lambda)$ – moc promieniowania w [W/nm],

683 lm/W – maksymalny fotometryczny równoważnik promieniowania przy $\lambda=555 \text{ nm}$.

1.5.2. Natężenie światła

Natężenie światła (8) opisuje strumień świetlny przypadający na jednostkę kąta bryłowego w danym kierunku. Jednostką jest kandela [cd]. Jedną kandelę to natężenie światła emitowane przez ciało doskonale czarne o temperaturze topnienia platyny, w kierunku prostopadłym do powierzchni.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [\text{cd}] \quad (8)$$

Gdzie:

$d\Phi$ – strumień świetlny w kącie bryłowym $d\Omega$ [lm],

$d\Omega$ – kąt bryłowy [sr].

1.5.3. Luminancja

Luminancja (9) określa ilość światła emitowanego lub odbitego przez powierzchnię w określonym kierunku w przeliczeniu na jednostkę powierzchni i kąt bryłowy. Jednostką jest [cd/m²].

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos \theta d\Omega} \quad \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (9)$$

gdzie:



A – pole powierzchni [m^2],

θ – kierunek światła [rad].

Luminancja odzwierciedla subiektywne odczucie jasności i jest istotna przy ocenie znaków, ekranów, powierzchni o różnej strukturze oraz przy kontroli olśnienia.

1.5.4. Natężenie oświetlenia

Natężenie oświetlenia (10) opisuje strumień świetlny padający na jednostkę powierzchni. Jednostką jest luks [lx].

$$E = \frac{d\Phi}{dA} [lx] \quad (10)$$

Dla powierzchni nachylonej pod kątem θ względem kierunku padającego światła natężenie oświetlenia opisuje się równaniem (11).

$$E = \frac{\Phi}{A} \cos \theta [lx] \quad (11)$$

1.6. Podstawowe wielkości kolorymetryczne

Do podstawowych wielkości kolorymetrycznych należą:

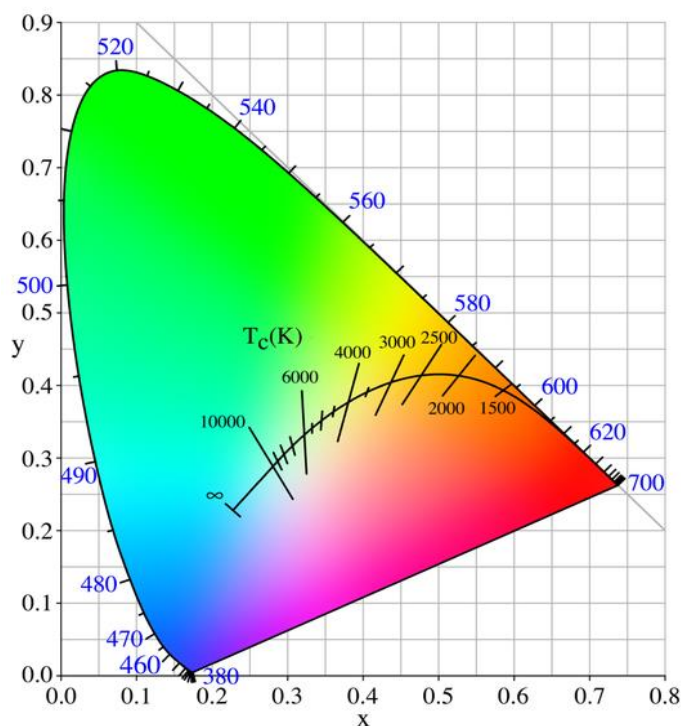
- Temperatura barwowa skorelowana (T_c) – [K].
- Wskaźnik oddawania barw (CRI, Ra).

1.6.1. Temperatura barwowa skorelowana

Temperatura barwowa skorelowana to temperatura ciała doskonale czarnego, którego widmo najlepiej odpowiada widmu badanego źródła światła. Jednostką jest kelwin [K].

Przybliżoną wartość T_c oblicza się z przyrostu położenia chromatyczności na wykresie CIE xy względem krzywej ciał doskonale czarnych (Rys. 2).

[Tekst alternatywny. Diagram chromatyczności CIE xy przedstawiający zakres barw widzialnych w postaci zewnętrznego konturu wypełnionego gradientem kolorów, z osiami x i y oznaczonymi wartościami od 0,0 do 0,8. Na wykresie zaznaczono znaczniki długości fal (380–700 nm) wzdłuż konturu. Pośrodku znajduje się krzywa neutralna z oznaczeniami temperatur barwowych w kelwinach (1000 K, 1500 K, 2000 K, 2500 K, 3000 K, 4000 K, 6000 K, 10000 K, ∞) w kierunku od czerwono-pomarańczowego do niebieskiego. Diagram ilustruje metodę wyznaczania temperatury barwowej światła na podstawie jego punktu chromatycznego.]



Rys. 2. Diagram chromaticzności CIE.

1.6.1. Wskaźnik oddawania barw

Wskaźnik oddawania barw (*CRI*, *Ra*) to parametr określający, jak naturalne i wierne są kolory obiektów oświetlonych danym źródłem światła w porównaniu do oświetlenia referencyjnego o tej samej temperaturze barwowej. Metodyka pomiaru *CRI* opiera się na porównaniu wyglądu ośmiu standardowych próbek barwnych pod światłem badanym oraz pod światłem odniesienia – światłem dziennym lub ciałem doskonale czarnym o odpowiedniej temperaturze. Różnice w percepcji barw każdej próbki oceniane są w przestrzeni kolorów CIE, a następnie uśredniane i przekształcane na skalę od 0 do 100, gdzie 100 oznacza idealne oddawanie barw.

2. Zdolność widzenia, prawo Plancka i Webera

2.1. Fizjologia narządu wzroku

Ludzkie oko to złożony system optyczny o średnicy około 25 mm, składający się z trzech głównych warstw:

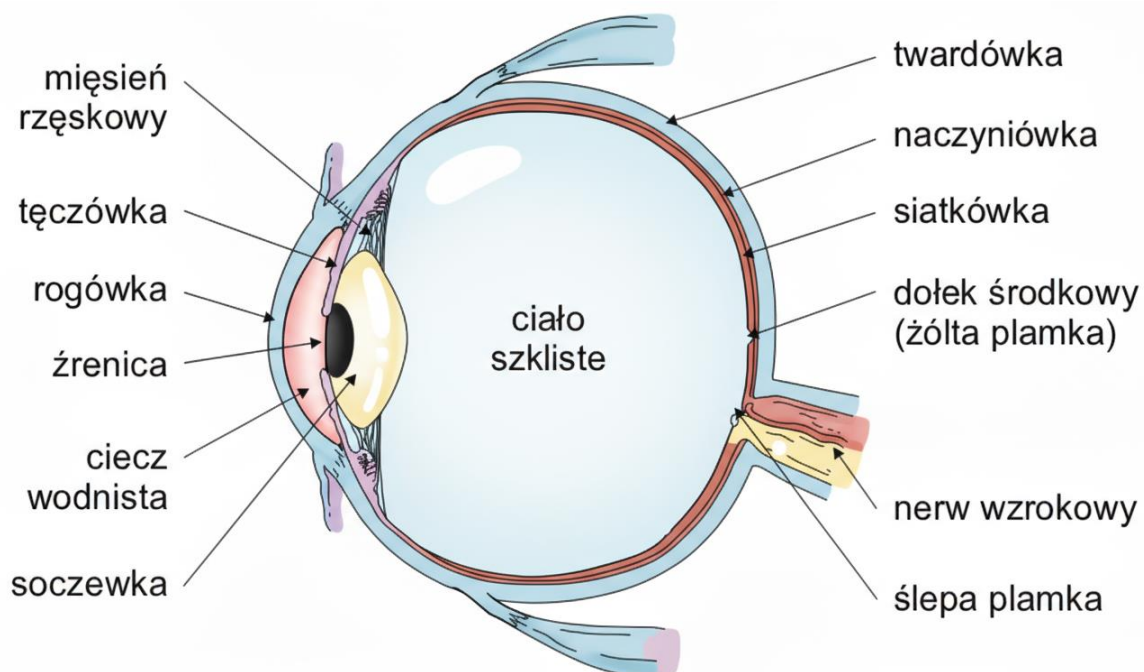
Warstwa zewnętrzna (twardówka i rogówka):

- Twardówka – mocna osłona chroniąca wnętrze oka.

- Rogówka – przezroczysta, wypukła część odpowiedzialna za główną moc optyczną oka.
- Warstwa środkowa (naczyniówka, tęczówka, żrenica):
- Tęczówka – zabarwiona przesłona kontrolująca wielkość żrenicy.
- Żrenica – reguluje ilość światła docierającego do siatkówki (2-8 mm średnicy).
- Warstwa wewnętrzna (siatkówka):
- Plamka żółta – miejsce najwyraźniejszego widzenia.
- Plamka ślepa – punkt wejścia nerwu wzrokowego, niewrażliwy na światło.

Budowę oka przedstawiono na Rys. 3.

[Tekst alternatywny. Przekrój ludzkiego oka z oznaczeniem wszystkich głównych części: mięsień rzęskowy, tęczówka, rogówka, żrenica, soczewka, ciecz wodnista, ciało szkliste, twardówka, naczyniówka, siatkówka, dołek środkowy (żółta plamka), nerw wzrokowy, ślepa plamka. Wszystkie elementy podpisane strzałkami wskazującymi konkretne struktury anatomiczne oka.]



Rys. 3. Budowa ludzkiego oka.

Nastawianie ostrości do widzenia na bliższą odległość osiągnięte jest przez zmianę zdolności skupiającej soczewki. Możliwe jest to dzięki soczewce w oku, składającej się z elastycznych warstw i mięśni rzęskowych, które umożliwiają zmianę skupienia soczewki przez uczynienie jej bardziej okrągłą. Oko chronione jest zewnętrzną powłoką zwaną twardówką. Zbudowana jest ona z gęstych włókien łącznotkankowych. Pomiędzy twardówką i siatkówką jest jeszcze inna powłoka,



zwana naczyniówką, która zawiera liczne naczynia krwionośne zaopatrujące oko w tlen i składniki odżywcze. Z przodu twardówka jest przeźroczysta i nazywa się rogówką. Za rogówką i zaraz bezpośrednio przed soczewką znajduje się okrągła zasłona zwana tęczęwką. Tęczęwka może przybierać bardzo różne kolory – to od ich barwy wzięły się kolory oczu. W centrum oka znajduje się otwór nazwana źrenicą. Otwór działa jak przysłona. Poprzez zróżnicowanie swojej średnicy, źrenica może w pewnym stopniu kontrolować ilość światła, które wpada do oka. Część oka między rogówką i soczewką jest wypełniona słonym płynem zwanym cieczą wodnistą. Pomiędzy soczewką i siatkówką oko wypełnione jest galaretowatą substancją zwaną ciałem szklanym. Utrzymuje ona kształt oka.

2.2. Fotoreceptory i mechanizm widzenia

Proces widzenia człowieka rozpoczyna się w oku, gdzie siatkówka nie tylko rejestruje obraz, lecz także dokonuje jego wstępnej obróbki. Powstały sygnał trafia następnie nerwem wzrokowym do mózgu, gdzie odpowiednie ośrodki dokonują jego rejestracji, dalszego przetworzenia i interpretacji.

Oko charakteryzuje się wyjątkowo szerokim zakresem czułości i dużą rozdzielczością, co pozwala na rozróżnienie nawet stu tysięcy odcieni barw przy dobrym oświetleniu. Dzięki mechanizmom adaptacyjnym może odbierać natężenie światła w przedziale od $0,000001 \text{ cd/m}^2$ do $100\,000 \text{ cd/m}^2$.

Ta wszechstronność wynika z obecności w siatkówce oka dwóch typów fotoreceptorów – pręcików i czopków (Rys. 4).

Pręciki (ok. 120 milionów):

Cechują się wysoką wrażliwością na światło (mogą wykryć pojedynczy foton). Odpowiadają za **widzenie nocne** (skotopowe). Nie rozróżniają kolorów. Maksimum czułości przy 507 nm (światło zielone).

Czopki (ok. 6 milionów):

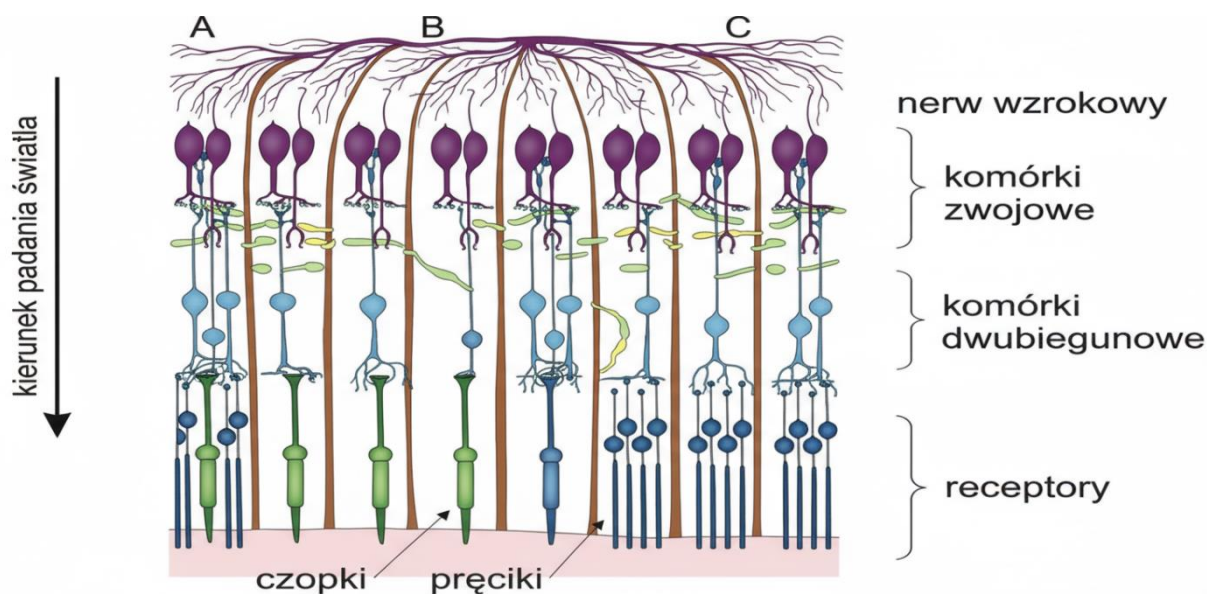
Cechują się mniejszą wrażliwością na światło od pręcików. Są odpowiedzialne za **widzenie dzienne** (fotopowe) i percepcję kolorów. Maksimum czułości przy 555 nm (światło zielone).

Według Younga-Helmholtza istnieją trzy typy czopków:

- Typ S - wrażliwy na krótkie fale (kolor niebieski, ~420 nm).
- Typ M - wrażliwy na średnie fale (kolor zielony, ~530 nm).
- Typ L - wrażliwy na długie fale (kolor czerwony, ~560 nm).

[Tekst alternatywny. Schemat budowy siatkówki oka. Od góry w kierunku padającego światła znajdują się: komórki zwojowe, komórki dwubiegunowe oraz fotoreceptory]

(czopki i pręciki). Lewa strona rysunku przedstawia czopki, środek pręciki, a prawa strona powtarza układ komórek i receptorów. Po prawej stronie zaznaczone są wszystkie główne warstwy: nerw wzrokowy, komórki zwojowe, komórki dwubiegunowe, receptory. Kierunek padającego światła oznaczony strzałką.]



Rys. 4. Budowa siatkówki oka.

Pręciki, ze względu na wysoką światłoczułość, odpowiadają za wykrywanie kształtów i ruchu, lecz nie rejestrują barw. Czopki natomiast, choć mniej wrażliwe na światło, umożliwiają widzenie kolorów i dostrzeganie drobnych detali.

Mechanizm przetwarzania obrazu ma charakter elektrochemiczny: światło pobudza pigment fotoreceptorów, czego efektem jest zmiana jego składu chemicznego i wygenerowanie niewielkiego prądu elektrycznego. Sygnał ten przekazywany jest włóknami nerwowymi do mózgu. W przypadku pręcików często spotyka się konfigurację jednej wiązki około 100 pręcików łączących się z pojedynczym włóknem nerwowym. To zjawisko sumowania stymulacji zwiększa wrażliwość na słabe światło, ale obniża rozdzielczość – otrzymywany obraz jest wtedy mniej ostry i pozbawiony kolorów.

Po opuszczeniu oka włókna nerwowe obu oczu łączą się w tzw. skrzyżowaniu wzrokowym, tuż przed wejściem do czaszki. Następnie każdy nerw rozdziela się na dwa dalsze odgałęzienia, które prowadzą do ciała kolankowatego bocznego i dalej do obu półkul kory wzrokowej. Dzięki temu lewa półkula przetwarza informacje z



lewej połowy siatkówki obu oczu (czyli prawej połowy pola widzenia), a prawa półkula – informacje z prawej części siatkówki (lewej połowy pola widzenia).

2.3. Widzenie fotopowe, skotopowe i mezopowe

W warunkach oświetlenia dziennego, gdy luminancja przekracza około 3 cd/m^2 , dominuje **widzenie fotopowe** (widzenie dzienne), oparte na aktywności czopków zlokalizowanych przede wszystkim w plamce żółtej siatkówki. Trzy rodzaje czopków – wrażliwe na krótkie, średnie i długie fale świetlne – umożliwiają pełne rozróżnianie barw oraz osiągają maksymalne zróżnicowanie sygnału przy długości fali około 555 nm . Dzięki zwężeniu źrenicy oraz szybkiej resyntezie barwnika czopków w ciągu kilku minut oko dostosowuje się do wysokiego natężenia światła, zachowując przy tym najwyższą rozdzielczość kątową rzędu $1'$ łuku.

Spadek luminancji poniżej około $0,001 \text{ cd/m}^2$ powoduje przejście w tryb **widzenia skotopowego** (widzenie nocne), które sprowadza się do działania pręcików, o wrażliwości osiągającej maksimum przy 507 nm . Jednorazowa detekcja pojedynczego fotonu staje się możliwa dzięki sumowaniu sygnałów z ilości pręcików przypadających na jedno włókno nerwowe. Choć taka konfiguracja zwiększa czułość oka w ciemności, obraz traci ostrość i jest pozbawiony kolorów, gdyż pręciki nie rozróżniają barw.

Między tymi dwoma skrajnościami występuje **widzenie mezopowe**, obejmujące luminancje od $0,001$ do 3 cd/m^2 . W tym zakresie zarówno pręciki, jak i czopki są częściowo aktywne, co pozwala na ograniczone postrzeganie barw oraz umiarkowaną ostrość obrazu. Adaptacja wzrokowa w mezopowym trybie łączy mechanizmy źrenicowe, fotochemiczne i neuronowe, umożliwiając stopniowe przełączanie się między widzeniem nocnym a dziennym.

Różnice między widzeniem fotopowym a skotopowym wynikają bezpośrednio z unikalnej budowy siatkówki i właściwości chemicznych pigmentów fotoreceptorów.

2.4. Akomodacja i adaptacja wzroku

Istnieją mechanizmy, dzięki którym oko ludzkie potrafi dostosować się do zmieniających się warunków optycznych i oświetleniowych. Są to: akomodacja i adaptacja.

Akomodacja wzroku

Akomodacja wzroku polega na zmianie kształtu soczewki, co pozwala na ogniskowanie promieni świetlnych pochodzących z różnych odległości. W trakcie patrzenia na bliski obiekt, mięsień rzęskowy kurczy się umożliwiając soczewce zwiększenie krzywizny. Soczewka staje się bardziej wypukła, a jej moc optyczna wzrasta, dzięki czemu obraz ostro formuje się na siatkówce. W sytuacji patrzenia w



dal mięsień rzęskowy się rozluźnia spłaszczając soczewkę i zmniejszając jej moc. Zakres akomodacji zmniejsza się z wiekiem, prowadząc do utraty zdolności do wyraźnego widzenia z bliska.

Adaptacja wzroku

Adaptacja wzroku odnosi się do zdolności oka do pracy w szerokim zakresie natężeń światła – od bardzo słabego po bardzo intensywne. Obejmuje ona główne etapy: adaptację źrenicową (etap szybki) oraz fotochemiczną i neuronową (etap powolny).

Etap szybki to zmiana wielkości źrenicy — źrenica szybko się zwęża przy jasnym świetle, ograniczając dopływ światła, lub rozszerza przy słabym oświetleniu, zwiększając jego ilość docierającą do siatkówki. Ten proces trwa zaledwie ułamek sekundy i umożliwia natychmiastowe dostosowanie do warunków oświetleniowych.

Etap powolny bazuje na zmianach fotochemicznych w fotoreceptorach: pręcikach i czopkach, które zawierają światłoczułe pigmenty. Gdy oko znajduje się w ciemności, pigmenty regenerują się, zwiększając wrażliwość na światło, co może trwać od kilku minut do nawet około 30 minut. Odwrotnie, gdy następuje gwałtowne oświetlenie po pobycie w ciemności, pigmenty ulegają rozpadowi, co chwilowo zmniejsza wrażliwość. Powolna adaptacja umożliwia więc optymalne widzenie przy znacząco różnym natężeniu światła, ale wymaga czasu.

Adaptacja neuronowa w ośrodkach mózgowych i w siatkówce optymalizuje przetwarzanie sygnałów, poprawiając zdolność detekcji kontrastów i szczegółów w nowych warunkach oświetleniowych.

Oba procesy (akomodacja i adaptacja) są niezależne, jednak współdziałają w widzeniu. Akomodacja dba o ostrość obrazu w zależności od odległości obserwowanego obiektu, podczas gdy adaptacja daje możliwość percepcji w różnych scenariuszach oświetleniowych – od półmroku po jasne światło dzienne.

2.5. Prawo Plancka

Właściwości promieniowania elektromagnetycznego wpływają na procesy percepcji tego promieniowania przez człowieka. Do opisu spektralnego rozkładu promieniowania źródeł światła, które trafia do oka stosuje się prawo Plancka. Wyjaśnia ono, jak zmienia się intensywność emisji (radiancja spektralna) (12) ciała doskonale czarnego w funkcji długości fali λ i temperatury T , co ma bezpośrednie przełożenie na temperaturę barwową i widmowy skład światła docierającego do fotoreceptorów.

$$B(\lambda, T) = \frac{2 h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{\frac{h c}{\lambda k T}} - 1} \left[\frac{W}{m^2 \cdot nm} \right] \quad (12)$$

gdzie:



h - stała Plancka,

c - prędkość światła,

$k = 1,38649 \cdot 10^{-23} [\text{J/K}]$. Stała Boltzmanna.

Prawo Plancka pozwala określić, na które długości fal oko będzie najbardziej czułe w danych warunkach oświetleniowych i jak zmienia się widoczność barw przy źródłach o różnych temperaturach barwowych.

2.6. Prawo Webera

Gdy sygnały świetlne po obróbce w siatkówce trafiają do ośrodków mózgowych, subiektywna percepcja zmian jasności rządzi się prawem Webera. Mówi ono, że minimalna dostrzegalna różnica luminancji ΔI jest proporcjonalna do poziomu luminancji I (13):

$$\frac{\Delta I}{I} = k \quad (13)$$

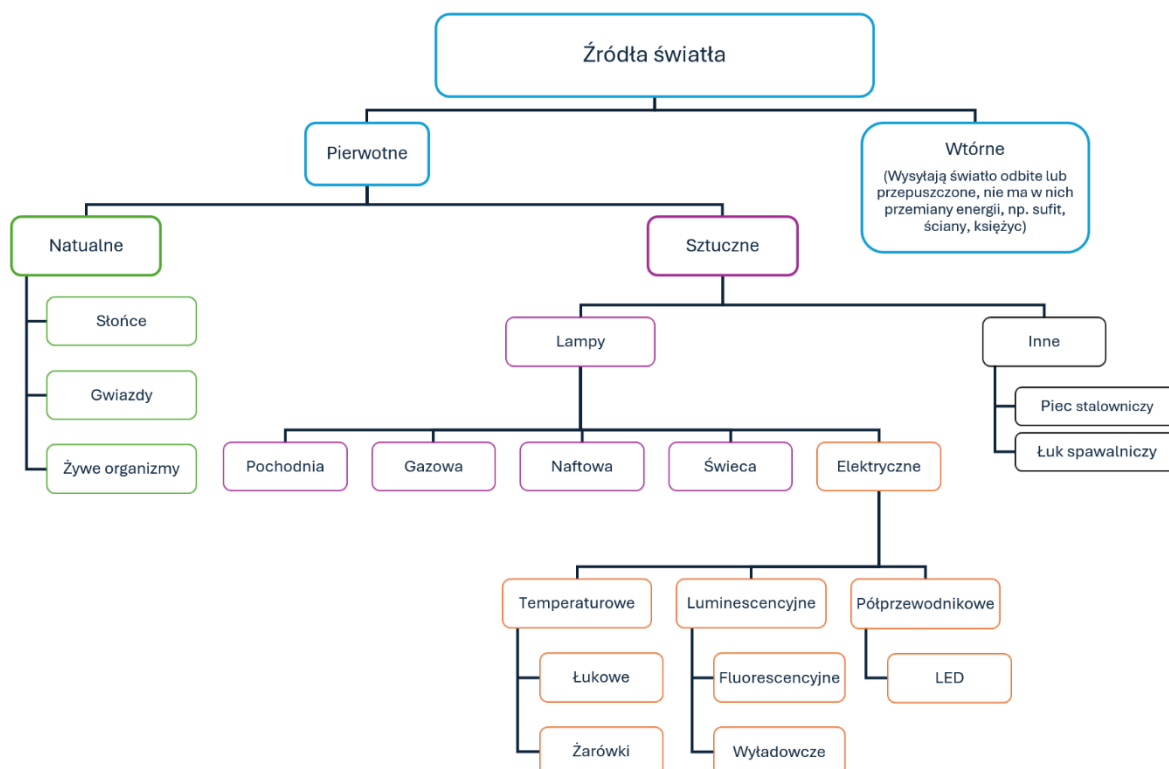
gdzie:

$k \approx 0,079$ dla ludzkiego oka. Oznacza to, że zmiany oświetlenia poniżej 7,9% nie będą zauważalne.

3. Źródła światła

Źródła światła to urządzenia lub zjawiska generujące promieniowanie optyczne w zakresie widzialnym. W technice świetlnej ich dobór i charakterystyka decydują o efektywności energetycznej, jakości oddawania barw, trwałości oraz komforcie wizualnym. Podział źródeł światła przedstawiony został na Rys. 5

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia podział źródeł światła na dwie główne grupy: pierwotne i wtórne. Źródła pierwotne dzielą się na naturalne (słońce, gwiazdy, żywe organizmy) oraz sztuczne, które obejmują lampy (pochodnia, gazowa, naftowa, świeca, elektryczna) oraz inne sztuczne źródła (piec stalowniczy, łuk spawalniczy). Lampy elektryczne podzielone są na: temperaturowe (łukowe, żarówki), luminescencyjne (fluorescencyjne, wyładowcze) oraz półprzewodnikowe (LED). Źródła wtórne to obiekty wysyłające światło odbite lub przepuszczone bez przemiany energii, takie jak sufit, ściany czy księżyc.]



Rys. 5. Podział źródeł światła.

Podział źródeł światła stanowi jeden z podstawowych tematów techniki świetlnej, pozwalając na sklasyfikowanie rozmaitych sposobów generowania promieniowania widzialnego wykorzystywanego w oświetleniu. Wyróżnia się źródła pierwotne, które samodzielnie emitują światło – należą do nich naturalne, jak słońce, gwiazdy oraz niektóre organizmy żywe, oraz różne typy źródeł sztucznych. W grupie sztucznych znajdują się lampy: pochodnie, lampy gazowe, naftowe, świece, jak również coraz bardziej zróżnicowane źródła elektryczne. Te ostatnie można podzielić według zasady działania na temperaturowe (łukowe, żarówki), luminescencyjne (fluorescencyjne, wyładowcze), a także półprzewodnikowe – czyli diody LED oraz lasery. Uzupełniające znaczenie mają źródła wtórne, które emisję światła zawdzięczają jedynie odbiciu lub przepuszczeniu promieniowania bez przemiany energii, jak ściany, sufity lub księżyc. W obszarze zainteresowania techniki świetlnej znajdują się głównie źródła elektryczne. W dalszej części opisano wybrane typy źródeł światła.

3.1. Żarówka

Żarówki (Rys. 6) to elektryczne źródła światła, w których elementem świecącym jest włókno wykonane z trudno topliwego materiału (pierwotnie grafit, obecnie wolfram). Drut wolframowy jest umieszczony w szklanej bańce wypełnionej mieszaniną gazów

szlachetnych (np. argon z 10-procentową domieszką azotu). Na skutek przepływu prądu elektrycznego włókno żarówki osiąga temperaturę ok. 2500–3000 K.

[Tekst alternatywny. Zdjęcie klasycznej żarówki elektrycznej z przezroczystą szklaną bańką, metalowym trzonkiem gwintowanym oraz widocznym w środku cienkim drucikiem żarowym (zwykle wolframowym), służącej do wytwarzania światła.]



Rys. 6. Lampa żarowa - żarówka.

Główne cechy żarówki:

- Światło zbliżone do słonecznego.
- Dobry wskaźnik oddawania barw.
- Nie wywołuje efektu stroboskopowego.
- Ciągłe widmo promieniowania.
- Temperatura barwowa ok. 2700 K.
- Wada: niska skuteczność świetlna (od 8 do 16 lumenów/wat).
- Żarówka wykorzystuje ok. 5% energii na światło widzialne.
- Strumień żarówki z czasem maleje – lampa się starzeje: po 500 godz. świecenia strumień jej spada średnio do 90%, po 1000 godz. – średnio do 85% strumienia początkowego (100%).

Podział tradycyjnych żarówek opiera się na rodzaju gazu lub mieszaniny gazów we wnętrzu bańki oraz temperaturze pracy żarnika, co przekłada się na ich charakterystyczne cechy użytkowe. Najprostszy typ stanowi żarówka próżniowa, w której brak gazu powoduje niekorzystne zjawisko parowania wolframu i osadzania się



ciemnego nalotu na bańce, a temperatura żarnika nie przekracza 2600 K. Zdecydowanie wyższą skutecznością świetlną charakteryzują się żarówki gazowane, w których przestrzeń wypełnia gaz obojętny, najczęściej argon z domieszką azotu, krypton lub ksenon, co ogranicza parowanie żarnika. Najnowocześniejszą odmianą są żarówki halogenowe, zawierające halogen (najczęściej jod) i wykorzystujące halogenowy cykl regeneracyjny, dzięki czemu możliwa jest praca żarnika w temperaturze około 3200 K oraz uzyskanie najwyższej skuteczności świetlnej. Warto jednak zaznaczyć, że wraz ze wzrostem temperatury żarnika maleje trwałość lamp, co stanowi ważne ograniczenie eksploatacyjne.

3.2. Niskoprężna lampa sodowa

Niskoprężna lampa sodowa (7) to wyładowcze źródło światła cechujące się niezwykle wysoką skutecznością świetlną i charakterystycznym, monochromatycznym żółto-pomarańczowym światłem. Jej jarznik wykonany jest z długiej szklanej rurki wygiętej w literę U, w której znajduje się metaliczny sól oraz mieszanina gazów pomocniczych – najczęściej neonu i argonu. Optymalne warunki pracy uzyskuje się przy temperaturze około 260°C oraz niskim ciśnieniu pary sodu na poziomie 0,7 Pa. Po przyłożeniu napięcia wyładowanie rozpoczyna się w gazie pomocniczym, a po odparowaniu sodu główną rolę przejmują dwa bliskie sobie pasma widmowe o długościach 589 i 589,6 nm, odpowiadające emitowanemu światłu.

Niskoprężne lampy sodowe do rozpoczęcia pracy wymagają znacznie wyższego napięcia niż typowe napięcie sieciowe, czyli impulsu rzędu 400–600 V. Jest to związane ze specyfiką wyładowania w gazach szlachetnych i metalicznym sodzie, gdzie początkowa jonizacja – inicjująca proces świecenia – wymaga dostarczenia energii zdolnej do przebicia jarznika. W praktyce stosowane są specjalne układy zapłonowe oraz transformatory pozwalające wygenerować krótki, wysokonapięciowy impuls, który powoduje przeskok elektryczny i aktywuje wyładowanie w gazie pomocniczym (neon, argon), a następnie w parze sodowej. Po zapłonie napięcie pracy stabilizuje się na znacznie niższym poziomie, zapewniając długotrwałą i efektywną pracę lampy.

[Tekst alternatywny. Zdjęcie niskoprężnej lampy sodowej o podłużnej, cylindrycznej przezroczystej bańce. Po lewej stronie znajduje się czerwony ceramiczny trzonek. Wewnątrz lampy widoczna jest rurka szklana (jarznik) wygięta w kształcie litery U, w której umieszczony jest metaliczny sól oraz gaz pomocniczy. Tego typu lampa emituje charakterystyczne żółte światło i stosowana jest w oświetleniu ulicznym oraz przemysłowym.]



Rys. 7. Niskoprężna lampa sodowa.

Główne cechy niskoprężnej lampy sodowej:

- Moc: od 18 – 180 W.
- Skuteczność świetlna: 150 – 205 lm/W.
- Trwałość: do 16 000 h.
- Bardzo niski współczynnik oddawania barw R_a : 20 – 39.
- Temperatura barwowa 1800K cechująca emitowane żółto-pomarańczowe światło

Niska temperatura barwowa odpowiada za typowo żółte światło o doskonałej penetracji przez mgłę. Dzięki temu niskoprężne lampy sodowe stosowane są głównie w oświetleniu dróg, autostrad i obszarów wymagających dobrej widoczności przy minimalnym zużyciu energii,

3.3. Wysokoprężna lampa sodowa

Wysokoprężne lampy sodowe (Rys. 8) należą do grupy wyładowczych źródeł światła i cechują się charakterystycznym żółto-pomarańczowym światłem oraz wysoką skutecznością świetlną. Ich zasada działania opiera się na jarzniku wypełnionym sodem, niewielką ilością rtęci i gazem pomocniczym – najczęściej ksenonem, przy ciśnieniu około 2 kPa. Proces świecenia inicjuje wyładowanie elektryczne w ksenonie.

Wysokoprężne lampy sodowe wymagają do zapłonu znacznie wyższego napięcia niż standardowe napięcie sieciowe – typowa wartość napięcia impulsu zapłonowego sięga około 3000 V. Aby wyładowanie mogło zostać zainicjowane w jarzniku wypełnionym mieszaniną par sodu, rtęci i gazu szlachetnego, konieczne jest zastosowanie elektronicznego zapłonika, który generuje krótkotrwały impuls wysokiego napięcia. Po udanym zapłonie lampa przechodzi do fazy pracy normalnej, a napięcie na elektrody spada do wartości rzędu kilkuset woltów, zależnie od typu i mocy lampy. Ze względu na opadającą charakterystykę napięciowo-prądową wyładowania konieczne jest również stosowanie układu stabilizującego, zwykle w postaci dławika indukcyjnego, który ogranicza wartość prądu roboczego oraz zapewnia stabilność pracy lampy. Tak zbudowany układ pozwala na bezpieczną eksploatację i szybkie ponowne uruchamianie lampy, co jest szczególnie istotne w oświetleniu zewnętrznym, ulicznym i przemysłowym.

[Tekst alternatywny. Zdjęcie wysokoprężnej lampy sodowej o podłużnej, cylindrycznej, przezroczystej bańce z dużym gwintowanym trzonkiem metalowym po lewej stronie. Wewnątrz bańki widoczny jest ceramiczny jarznik oraz elektrody. Lampa tego typu wykorzystywana jest głównie w oświetleniu ulicznym i przemysłowym, emituje żółto-pomarańczowe światło.]



Rys. 8. Wysokoprężna lampa sodowa.

Główne cechy wysokoprężnej lampy sodowej:

- Moc: od 50 - 1000 W.
- Skuteczność świetlna: 68 – 150 lm/W.
- Trwałość: do 10 000 – 24 000 h.
- Temperatura barwowa: 2000 K – żółto-pomarańczowe światło.
- Wskaźnik oddawania barw R_a : 22 – 65.

3.4. Niskoprężna lampa rtęciowa

Niskoprężna lampa rtęciowa (Rys. 9) jest jednym z najpowszechniejszych źródeł światła wyładowczego – jej najbardziej znaną odmianą jest świetlówka. Konstrukcja tej lampy opiera się na szklanej rurze (bańce), która od wewnątrz pokryta jest warstwą luminoforu. W rurze tej znajdują się dwie elektrody oraz niewielka ilość rtęci i gazu szlachetnego (najczęściej argonu lub mieszanki argonu z innym gazem), utrzymywana pod niskim ciśnieniem. W lampie kompaktowej (np. świetlówce kompaktowej) układ może być bardziej zwarty i uformowany w różne kształty.

[Tekst alternatywny. Zdjęcie liniowej świetlówki (niskoprężnej lampy rtęciowej) o cylindrycznym, białym, matowym korpusie i metalowej oprawce z dwoma połączanymi pinami na jednym końcu.]



Rys. 9. Niskoprężna lampa rtęciowa – świetlówka.

Zasada działania opiera się na wyładowaniu elektrycznym, które zachodzi w parach rtęci przy niskim ciśnieniu (ok. 0,8 Pa). Po przyłożeniu napięcia między elektrodami, wyładowanie rozpoczyna się w gazie pomocniczym. Następnie, gdy tylko rtęć odparuje (w wyniku ogrzewania przez prąd płynący w lampie), głównym nośnikiem świecenia stają się wyładowania w parze rtęci. Emitują one głównie promieniowanie nadfioletowe (UV), które jest pochłaniane przez luminofor na ściankach lampy i zamieniane na światło widzialne. Ta technologia pozwala uzyskać światło o szerokim spektrum barw, zależnie od składu i rodzaju luminoforu, choć światło wyładowania w samej parze rtęci ma dominujące linie widmowe w części niebieskiej i zielonej.

Do prawidłowej pracy niskoprężnej lampy rtęciowej konieczne jest zastosowanie statecznika, czyli specjalnego urządzenia ograniczającego prąd, ponieważ lampa ta posiada ujemną charakterystykę napięciowo-prądową – po zapłonie jej opór spada, co bez ograniczenia prądu prowadziłoby do zniszczenia elektrod. Napięcie zapłonu niskoprężnych lamp rtęciowych wynosi zwykle w granicach 100–230 V, zależnie od typu, długości i zastosowania, natomiast napięcie pracy (po zapłonie i stabilizacji łuku) jest nieco niższe – dla typowej świetlówki liniowej ok. 60–110 V.

Główne cechy niskoprężnej lampy rtęciowej:

- Skuteczność świetlna do 105 lm/W.
- Czas pracy od ok. 8000 h do 20000 h.
- Niska zależność strumienia świetlnego od napięcia zasilającego.
- Różne temperatury barwowe.
- Efekt stroboskopowy.

3.5. Wysokoprężna lampa rtęciowa

Wysokoprężna lampa rtęciowa (Rys. 10), nazywana potocznie rtęciówką, należy do grupy lamp wyładowczych. Składa się z dwóch głównych części: zewnętrznej szklanej lub kwarcowej bańki oraz jarznika umieszczonego wewnątrz. Zewnętrzna bańka, często o elipsoidalnym kształcie, jest zazwyczaj pokryta od wewnątrz luminoforem, który zmienia część promieniowania UV na światło widzialne. Jarznik to rurka szklana (najczęściej kwarcowa) wypełniona niewielką ilością rtęci oraz argonem, pełniącym funkcję gazu pomocniczego. Wewnątrz jarznika znajdują się dwie elektrody główne oraz jedna lub dwie pomocnicze, które wspomagają zapłon lampy.

[Tekst alternatywny. Zdjęcie wysokoprężnej lampy rtęciowej w przezroczystej, elipsoidalnej bańce szklanej z dużym metalowym trzonkiem gwintowanym po lewej stronie. Wewnątrz bańki widoczny jest cylindryczny jarznik kwarcowy z elektrodami oraz połączeniami elektrycznymi. Lampa tego typu jest stosowana głównie w oświetleniu ulicznym i przemysłowym.]



Rys. 10. Wysokoprężna lampa rtęciowa.

Po przyłożeniu napięcia (zwykle ok. 180 V) między elektrodą główną a pomocniczą rozpoczyna się wyładowanie jarzeniowe w argonie (tzw. wyładowanie tłące), co powoduje stopniowe rozgrzewanie lampy. W wyniku ogrzania, rtęć odparowuje, a głównym nośnikiem wyładowania stają się pary rtęci. Wyładowanie jarzeniowe po osiągnięciu odpowiednich parametrów przechodzi w wyładowanie łukowe. W tym trybie lampę trzeba zasilac poprzez statecznik, który ogranicza prąd wyładowania do bezpiecznej wartości – lampy te mają ujemną charakterystykę napięciowo-prądową. Podczas pracy wydzielane światło posiada dominujące linie spektralne rtęci, dając lampom charakterystyczny niebieskawy-biały odcień. Część promieniowania ultrafioletowego zostaje pochłonięta przez luminofor i przekształcona na dodatkowe światło widzialne, poprawiając oddawanie barw.

Główne cechy wysokoprężnej lampy rtęciowej:

- Moc: 50 - 2000 W.
- Skuteczność świetlna: 36 - 61lm/W.
- Wskaźnik oddawania barw R_a : 43 – 45.

3.6. Lampa metalohalogenkowa

Lampa metalohalogenkowa (MH) (Rys. 11) należy do grupy wysokoprężnych rtęciowych źródeł światła wysokiej intensywności i posiada konstrukcję opartą na jarzniku wykonanym z kwarcu lub ceramiki oraz zewnętrznej bańce szklanej o kształcie tubularnym, elipsoidalnym czy gruszkowatym. Wewnątrz jarznika znajdują się elektrody oraz mieszanina gazów: zwykle argon (lub krypton) pełniący rolę gazu startowego, pary rtęci oraz halogenki metali (głównie jodki, bromki pierwiastków jak sód, skand, ind, czy inne ziemie rzadkie). Elementem wykończeniowym jest metalowy gwintowany trzonek, a bańka zewnętrzna może być przezroczysta lub pokryta powłoką rozpraszającą światło.

[Tekst alternatywny. Zdjęcie metalohalogenkowej lampy wyładowczej o cylindrycznej, przezroczystej bańce szklanej z dużym gwintowanym metalowym trzonkiem po lewej stronie. Wewnątrz widoczny jest jarznik kwarcowy z elektrodami oraz cienkimi metalowymi elementami konstrukcyjnymi.]



Rys. 11. Lampa metalohalogenkowa.

Zapłon lampy MH wymaga zainicjowania wyładowania elektrycznego między elektrodami w środowisku gazu pomocniczego. Pierwotna jonizacja argonu lub kryptonu rozpoczyna wyładowanie, po czym pod wpływem wzrostu temperatury odparowuje rtęć oraz halogenki metali. Wyładowanie przekształca się w łuk elektryczny, w którym pary metali i ich halogenki emitują światło o pożądanym widmie. Skład chemiczny mieszaniny pozwala na kształtowanie barwy światła i podniesienie współczynnika oddawania barw (CRI), nawet do wartości powyżej 90 dla konstrukcji z jarznikiem ceramicznym. Lampy pracują w warunkach wysokiego ciśnienia, co poprawia ich sprawność i stabilność parametrów pracy. Napięcie pracy lamp MH zależy od typu, lecz zwykle wynosi ok. 80–130 V pomiędzy elektrodami podczas pracy; napięcie zapłonu wymagane do startu łuku to zwykle od 1 000 do 5

000 V. Do pracy lampy wymagany jest statecznik i (najczęściej) układ zapłonowy, gdyż sam żarnik nie może być uruchomiony bez impulsu wysokiego napięcia (zwykle kilka kV).

Główne cechy lampy metalohalogenkowej:

- Moc: 20 do 2000 W.
- Skuteczność świetlna: 75 do 148 lm/W.
- Trwałość: 8 000 – 20 000 h.
- Temperatura barwowa: 3 000 – 20 000 K.
- Współczynnik oddawania barw R_a : 70 – 95.

Uniwersalność lamp metalohalogenkowych sprawia, że są wykorzystywane w oświetleniu ulic, hal przemysłowych, obiektów sportowych, sklepów, biur oraz w oświetleniu dekoracyjnym i akwarystyce. Wysoka skuteczność świetlna i dobre oddawanie barw sprzyjają zastosowaniu ich tam, gdzie wymagane jest intensywne i naturalne światło oraz specjalistyczna iluminacja.

3.7. Źródła LED

Diody LED (Light Emitting Diode) (Rys. 12) to półprzewodnikowe źródła światła działające na zasadzie elektroluminescencji – zjawiska polegającego na emisji światła pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. W przeciwieństwie do tradycyjnych żarówek, które wytwarzają światło poprzez rozgrzanie żarnika, diody LED przekształcają energię elektryczną bezpośrednio w światło poprzez procesy zachodzące w złączu p-n półprzewodnika.

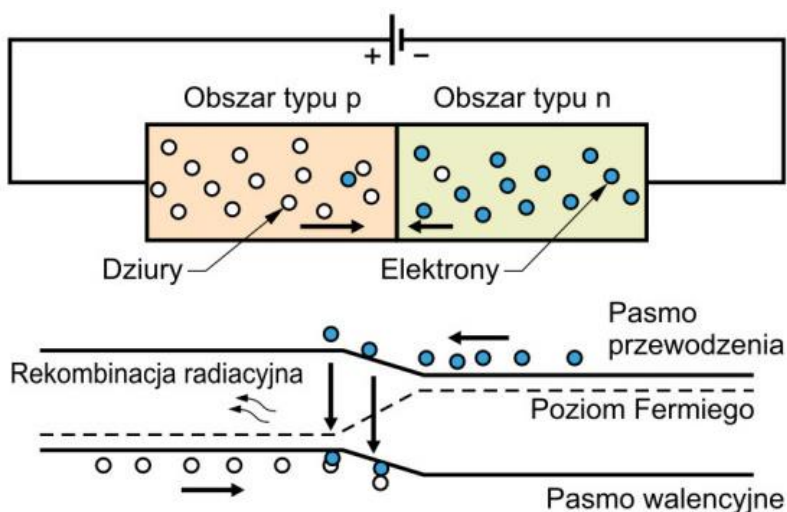
[Tekst alternatywny. Zdjęcie białej, wysokiej mocy diody LED typu COB (Chip-On-Board) zamontowanej na kwadratowym metalowym podłożu. Centralną część zajmuje żółty prostokątny obszar pokryty luminoforem, służącym do konwersji światła niebieskiego generowanego przez półprzewodnik w światło białe. Wokół widoczne są cztery metalowe wyprowadzenia do zasilania.]



Rys. 12. Źródło światła LED.

Mechanizm świecenia opiera się na rekombinacji elektronów i dziur w obszarze złącza (Rys. 13). Gdy przez diodę w kierunku przewodzenia przepływa prąd, elektrony z warstwy typu n przemieszczają się do warstwy typu p, gdzie rekombinują z dziurami. W trakcie tego procesu energia zostaje uwalniana w postaci fotonów – kwantów światła. Znaczenie ma tutaj przerwa energetyczna materiału półprzewodnikowego – w materiałach z prostą przerwą energetyczną (takich jak GaAs, InP, InSb) zachodzi rekombinacja promienista, podczas której energia wydziela się jako światło.

[Tekst alternatywny. Schemat złącza p-n w diodzie LED przedstawia dwa poziomy energetyczne: wyższy – pasmo przewodzenia oraz niższy – pasmo walencyjne. Poziomy te są przedzielone poziomem Fermiego, a między nimi występuje przerwa energetyczna (przerwa wzbroniona). Elektrony, znajdujące się w paśmie przewodzenia po stronie typu n, przesuwają się w kierunku warstwy typu p, gdzie spotykają dziury z pasma walencyjnego. Gdy elektron przeskakuje z pasma przewodzenia do pasma walencyjnego, następuje rekombinacja radiacyjna, której rezultatem jest emisja fotonu (światła). Na schemacie kierunki ruchu nośników i emisji fotonu są zaznaczone strzałkami, a cały proces odbywa się w strefie złącza p-n, co skutkuje pojawieniem się promieniowania świetlnego.]



Rys. 13. Schemat złącza p-n w diodzie LED.

3.7.1. Metody uzyskiwania światła i barw w diodach LED

Diody LED są źródłami emitującymi promieniowanie w bardzo wąskim zakresie widma, przez co uznaje się je za emitery światła monochromatycznego. Tymczasem światło białe jest jedynie wrażeniem wzrokowym, doświadczanym przez człowieka, gdy na siatkówkę oka dociera promieniowanie obejmujące fale świetlne z pełnego

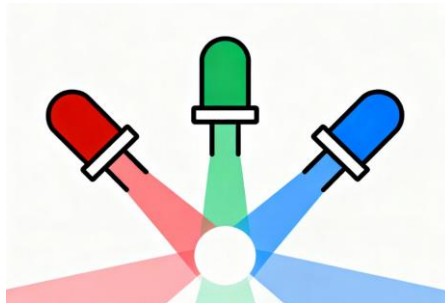
zakresu widma widzialnego. Z tego powodu nie jest możliwe uzyskanie światła białego bezpośrednio z pojedynczego złącza półprzewodnikowego p-n, którego emisja obejmuje widmo o szerokości nieprzekraczającej kilkunastu nanometrów. Mimo tej przeszkody, w praktyce wytwarza się białe diody LED poprzez zastosowanie jedną z trzech metod generacji światła:

- Metody mieszania światła,
- Metody konwersji światła,
- Metody hybrydowej.

Mieszanie światła

Zastosowanie trzech (RGB) lub więcej odrębnych diod emitujących światło czerwone, zielone i niebieskie pozwala uzyskać dowolny kolor w wyniku optycznego nakładania się ich wiązek (Rys. 14).

[Tekst alternatywny. rafka przedstawia trzy diody LED: czerwoną, zieloną i niebieską, które emitują promieniowanie w swoich barwach podstawowych. Promienie świetlne tych trzech diod nachodzą na siebie w jednym punkcie, powodując powstanie światła białego w miejscu ich zsumowania. Schemat ilustruje addytywną metodę tworzenia białego światła poprzez mieszanie trzech wiązek – czerwonej, zielonej i niebieskiej. Każda dioda widoczna jest jako uproszczony symbol elektroniczny, a kolory śladów świetlnych są zgodne z kolorystyką diod.]



Rys. 14. Ideowy schemat metody mieszania światła w LED.

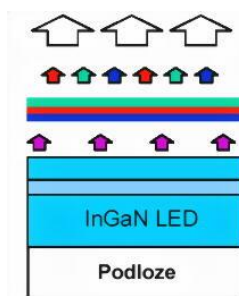
Sterując natężeniem prądu poszczególnych diod, uzyskuje się szeroką paletę barw, w tym światło białe o regulowanej temperaturze barwowej. Metoda ta znajduje zastosowanie w wyświetlaczach LED, oświetleniu dekoracyjnym oraz w systemach oświetlenia dynamicznego (np. architektonicznego).

Konwersja światła

Metoda uzyskiwania światła białego zwana metodą konwersji (Rys. 15) w diodach LED polega na zastosowaniu specjalnego luminoforu, którym pokrywa się diodę emitującą promieniowanie w zakresie nadfioletu. Luminofor taki składa się z trzech warstw, z których każda realizuje konwersję światła UV na jedną z podstawowych barw: czerwoną, zieloną i niebieską. Po wymieszanu się tych barw w warstwie luminoforowej uzyskuje się światło o barwie białej. Zaletą tej technologii jest prosty

proces produkcyjny oraz nieskomplikowany układ zasilania, dzięki czemu możliwe jest znaczne obniżenie kosztów. Minusem jest jednak niska efektywność energetyczna spowodowana stratami na konwersji światła oraz brak możliwości regulacji barwy światła i współczynnika oddania barw, których parametry są ustalane już na etapie produkcji. Wadą w niektórych zastosowaniach bywa również szczątkowe promieniowanie UV przedostające się przez warstwę luminoforu. Z tego powodu diody białe wykorzystujące wzbudzenie luminoforu światłem UV są obecnie rzadko produkowane. Wynika to z problemów z odpornością obudów na promieniowanie ultrafioletowe, trudności ze znalezieniem odpowiednich emiterów oraz szkodliwego działania UV na zdrowie

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia warstwową budowę diody LED typu InGaN umieszczonej na podłożu. Fioletowe strzałki wskazują emisję promieniowania z diody LED w kierunku specjalnej warstwy konwertującej, która absorbuje światło niebieskie (lub fioletowe) i przekształca część z niego w zielone oraz czerwone światło. Warstwa ta została oznaczona jako poziome pasy czerwony, zielony i niebieski. Nad nią znajdują się kolorowe strzałki symbolizujące światło w trzech barwach podstawowych, a na szczycie białe strzałki przedstawiają sumaryczną emisję światła białego na zewnątrz struktury LED. Schemat ilustruje koncepcję uzyskiwania białego światła w diodach LED poprzez konwersję barwy na warstwie luminoforowej.]



Rys. 15. Ideowy schemat metody konwersji światła w LED.

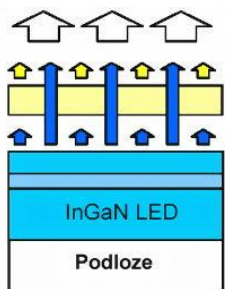
Zmiana składu luminoforu i grubości jego warstwy umożliwia dostosowanie odcienia bieli (ciepła, neutralna, zimna) oraz poprawę współczynnika oddawania barw. Konwersja stosowana jest w większości lamp i modułów LED przeznaczonych do oświetlenia ogólnego.

Metoda hybrydowa

Metoda hybrydowa (Rys. 16) w technologii białych diod LED stanowi połączenie zalet wcześniejszych sposobów generowania światła. Opiera się ona na wykorzystaniu niebieskiej diody (o długości fali 470 nm lub granatowej 460 nm), której promieniowanie wzbudza warstwę żółtego luminoforu. Część światła niebieskiego

jest przez luminofor przepuszczana, a część pochłaniana i konwertowana na światło żółte. W efekcie mieszania obu barw – niebieskiej i żółtej – powstaje światło białe..

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia budowę białej diody LED w technologii hybrydowej. Na dole znajduje się podłoże, nad którym umieszczono warstwę półprzewodnikową InGaN LED emitującą światło niebieskie. Niebieskie strzałki kierują się ku górze, pokazując ruch niebieskiego światła ku warstwie żółtego luminoforu. Część promieniowania po przejściu przez luminofor pozostaje niebieska, a część jest konwertowana na światło żółte (symbolizowane żółtymi strzałkami). Obie barwy mieszają się i wychodzą poza strukturę w postaci światła białego, co ilustrują szerokie białe strzałki u góry schematu. Całość prezentuje hybrydową metodę uzyskiwania światła białego poprzez połączenie emisji bezpośredniej i konwersji barwnej.]



Rys. 16. Ideowy schemat metody hybrydowej w LED.

Metoda konwersji ta może być obarczona problemami ze stałością parametrów luminoforu w czasie oraz charakteryzuje się współczynnikiem oddawania barw na poziomie 70–90. Jest obecnie najintensywniej rozwijaną i najpowszechniej stosowaną technologią produkcji białych diod LED.

4. Literatura

1. Banach M. (1982). *Podstawy techniki oświetlania*. PWN, Warszawa.
2. Dobrowolska A. (2012). *Synteza i badania spektroskopowe luminoforów do energooszczędnych źródeł światła. Praca doktorska*. Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
3. Grzonkowski J. (1996). *Praca zbiorowa członków Polskiego Komitetu Oświetleniowego pod redakcją Przewodniczącego PKOŚw. dr inż. Jana Grzonkowskiego. Technika Światła '96*, Warszawa.
4. Markiewicz H. (2016). *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.



5. Musiał E. (2006). *Przegląd elektrycznych źródeł światła. Główne właściwości i tendencje rozwojowe*, Biuletyn SEP, Oddział Gdański.
6. Tomaszewski D. *Podstawy technologii LED UV*.
(<https://elektronikab2b.pl/technika/56643-podstawy-technologii-led-uv>,
dostępny 23.09.2025).
7. Wiśniewski A. (2010). *Elektryczne źródła światła*. Oficyna wydawnicza
Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
8. Żagan W. (2022). *Podstawy techniki świetlnej*. Oficyna wydawnicza
Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
9. *Czym jest kolor*.
(<https://www.sensorinstruments.de/whatiswhat.php?subpage=11&language=pl>
, dostępny 22.09.2025).