Materiały do wykładu



Fizyka w doświadczeniach

Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010-26

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego,
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

13. Emisja i widzenie światła

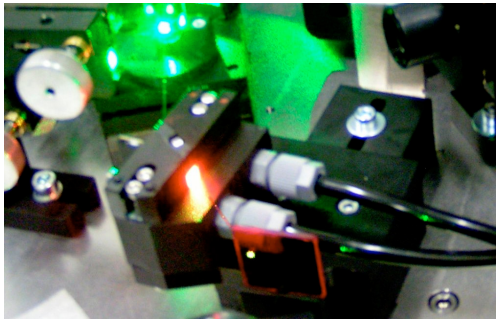


Fig. 13.1 Wymuszona emisja fotonów (czerwonych)

13.1 Wstęp

Wykład ten poświęcony jest oddziaływaniu światła z materią.
Światło jest falą elektromagnetyczną, ale jednocześnie strumieniem fotonów. Gdy światło rozchodzi się nie oddziałując z materią, wtedy do jego opisu wystarczy znajomość praw dotyczących fal. Jednak, gdy światło jest emitowane lub pochłaniane przez materię, wtedy ujawniają się korpuskularne (cząsteczkowe) właściwości światła.

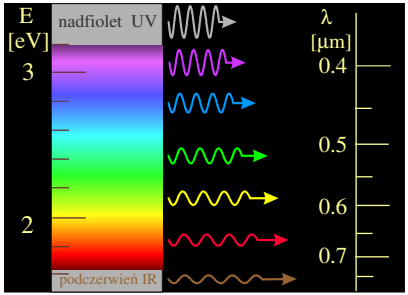
Plan

1. Wstęp
2. Podczerwień, absorpcja
3. Ultrafiolet i luminescencja
4. Oddziaływanie światła z materią
5. Wzrok
6. Podsumowanie

13.2 Podczerwień, absorpcja

Jaka barwa niesie najwięcej ciepła?

Każdy wie, że kolory takie, jak niebieski i zielony są zimne, a barwy czerwona i pomarańczowa - ciepłe. Czy za naszym odczuciem stoją jakieś prawa fizyki?



Rys. 13.2 Barwy światła, widzialne i niewidzialne.

Pomiar widma światła żarówki przy pomocy termostosu pokazuje, że najmniej ciepła niesie światło fioletowe i niebieskie, więcej żółte, jeszcze więcej czerwone, a najwięcej niewidzialne promieniowanie poniżej czerwonego - podczerwień. Rozgrzane ciała łatwiej emitują podczerwień niż światło widzialne, ponieważ podczerwień ma fotony o niższej energii niż w przypadku światła widzialnego.

Podczerwień (!)

Podczerwień to promieniowanie elektromagnetyczne mające fale dłuższe od światła widzialnego.
Nazwa nie pochodzi od porównania długości fal. Zakres ten znajduje

się pod czerwienią (tak jak na rys. 13.2) ponieważ ma mniejsze energie fotonów (i mniejsze częstości) niż światło widzialne.

Zakresy:

	początek VIS/ UV	bliższy/ daleki FUV	koniec zakresu granica X
dł. fali	0,78 μm	10 μm	1000 μm
częstość	380 THz,	30 THz	0,3 THz,
energia,	1,6 eV	0.124 eV	0,0012 eV

Źródła podczerwieni:
rozgrzane ciała, żarówki, lasery i diody świecące, promienniki.
Warto wiedzieć, że diody podczerwone stosowane są w pilotach sterujących telewizorami i innym sprzętem elektronicznym.
Wykrywanie:
efekt termoelektryczny, półprzewodniki wąskoprzerwowe, kamery IR. Podczerwień widzą na przykład węże.
Zastosowania:
telekomunikacja, sterowanie, ogrzewanie, pomiary temperatury.

Jak rozpalić ognisko?

Aby rozpalić ognisko przy pomocy wiązki światła, dobrze jest wiedzieć, jaki jest związek pomiędzy natężeniem światła a temperaturą.

Prawo Stefana-Boltzmanna:

Natężenie światła emitowanego przez źródło jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury źródła.

$$I = \sigma T^4, \qquad (13.1)$$

Ta zależność oznacza, że aby uzyskać wysoką temperaturę trzeba bardzo silnie zwiększyć natężenie światłą. Natężenie światła *I*, to moc P padająca na jednostkę powierzchni S:

$$I = P/S. \qquad (13.2)$$

Jeżeli skupimy światło, to przy tej samej mocy uzyskamy większe natężenie, a więc także wyższą temperaturę. Skupiając światło do 4 razy mniejszej średnicy, uzyskujemy 16 razy większe natężenie, a to oznacza 2 razy wyższą temperaturę (licząc w kelwinach).

Bliska podczerwień

Bliska podczerwień to fale od 0,8 μm do około 10 μm.
Fale te są silniej absorbowane przez wodę i powietrze, niż światło widzialne. Do ich emisji potrzebna jest temperatura wyższa od pokojowej. Ich źródłami są m.in. żarówki, diody świecące, lasery.

Bliska podczerwień: pilot, wykrywanie kamerą (!)

Przyrządy i materiały
- pilot do telewizora,
- kamera turystyczna lub internetowa.

Przebieg doświadczenia



Rys. 13.3 Pilot od telewizora

Aby zobaczyć świecenie pilota telewizyjnego, wystarczy poświecić nim w kierunku kamery internetowej lub amatorskiej kamery wideo i obserwować obraz na ekranie. Kamery takie wyposażone są w detektory krzemowe i widzą światło o falach krótszych niż 1,1 μm (o energii ponad 1,1 eV – odpowiadającej przerwie energetycznej krzemu). (Niestety nowsze kamery mają filtry nie widza już podczerwieni.)
Z kolei diody LED używane w pilotach są produkowane na bazie arsenku galu (GaAs) i emitują światło o długości 0,9 μm (czyli o energii 1,4 eV – odpowiadającej przerwie energetycznej GaAs). Ponieważ energia ta jest wyższa od energii absorpcji dla krzemu, detektor krzemowy widzi światło diody GaAs.

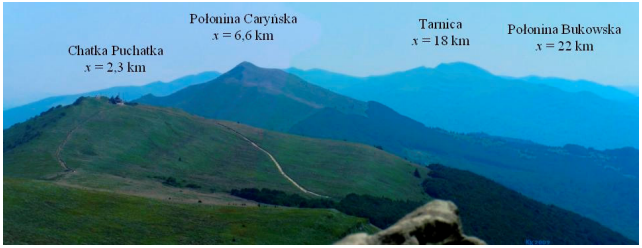
Prawo absorpcji światła

Prawo Bouguera-Lamberta

Natężenie światła maleje wykładniczo z grubością absorbera.

$$I = I_0 * e^{-\alpha x}, \qquad (13.3)$$

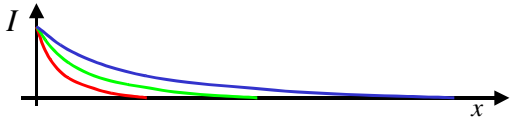
Parametr α nazywamy współczynnikiem absorpcji.



Rys. 13.4 Powietrze nad Bieszczadami. Widok z Osadzkiego Wierchu, Połonina Wetlińska

O tym, że natężenie światła maleje z odległością, możemy się przekonać, gdy obserwujemy strumień światła w wodzie lub na dużych odległościach - w powietrzu.

Ujmując rzecz bardziej ściśle, o absorpcji powinniśmy mówić, gdy jakaś substancja pochłania światło. Jeśli tylko zmienia jego kierunek, mówimy o rozpraszaniu. Tym niemniej w obu przypadkach zależność jest taka sama i końcowy efekt jest podobny - światło nie dociera do celu.



Rys. 13.5 Zanik natężenia światła na skutek absorpcji i rozpraszania.

Współczynnik absorpcji zależy od rodzaju absorbera, długości fali światła i stężenia absorbującej substancji.

Współczynnik absorpcji, α, jest proporcjonalny do stężenia absorbującej substancji, c: $\alpha = Ac$. Uwzględniając to, otrzymujemy prawo Bouguera-Lamberta-Beera

$$I = I_0 * e^{-Acx}, \qquad (13.4)$$

Dalsza podczerwień

Dalsza podczerwień to fale od 10 µm do około 1000 µm.

Źródła:

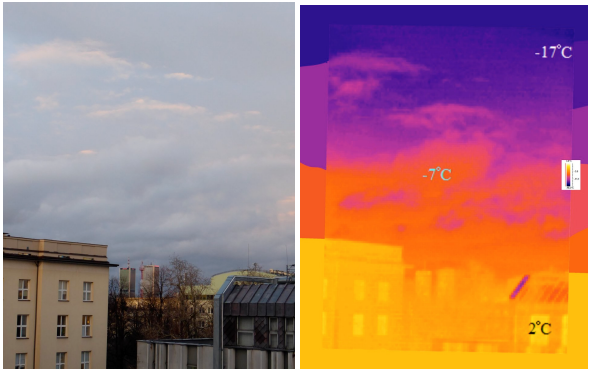
przedmioty o temperaturze porównywalnej z pokojową, lasery, ludzie.

Wykrywanie:

termostos, dioda z półprzewodnika o małej przerwie energetycznej, kamera termowizyjna.

Zastosowanie:

- pomiary temperatury (medycyna, przemysł),
- ogrzewanie (rolnictwo, przemysł).



Rys. 13.6 Zdjęcia nieba w świetle widzialnym i przy użyciu kamery IR, w zakresie dalekiej podczerwieni, widać różnice temperatur.

Rozkład Plancka

Zgodnie z prawem Wiena, wraz ze wzrostem temperatury maksimum natężenia emitowanego światła przesuwa się w stronę krótszych fal.

$$\lambda_{MAX} = b/T, \qquad (13.5)$$

gdzie b = 2898 µm*K. Zauważmy, że temperatura podana jest w kelwinach.

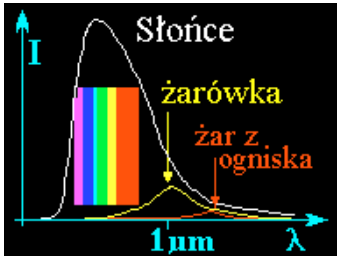
Kształt widma (zwany rozkładem Plancka) wyprowadzony został w 1890 roku przez Maxa Plancka przy założeniu, że światło jest

emitowane w postaci kwantów o energii: $E = h\nu = hc/\lambda$, wzór (9.8).

Wzór Plancka ma postać:

$$I = \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(h\nu / k_B T\right) - 1} \qquad (13.6)$$

Słońce, którego temperatura powierzchni wynosi 5800 K, świeci światłem białym. Żarówka mająca temperaturę 2000 K świeci na żółto, a żar z ogniska (ok. 1000 K) świeci na czerwono.



Rys. 13.7 Rozkład natężenia światła.

Do wyemitowania fotonu potrzebna jest określona energia. Tak więc, wysokoenergetyczne fotony światła widzialnego są emitowane tylko w wysokich temperaturach. Energia termiczna wynosi k_BT, a zatem fotonom o energii 1 eV (λ = 1,24 µm) odpowiada temperatura T = 11600 K.

Podczerwień grzeje i chłodzi.

Ciała o temperaturze odpowiadającej naszemu otoczeniu 10 - 30°C czyli około 300 K emitują najwięcej promieniowania w zakresie 10 µm,

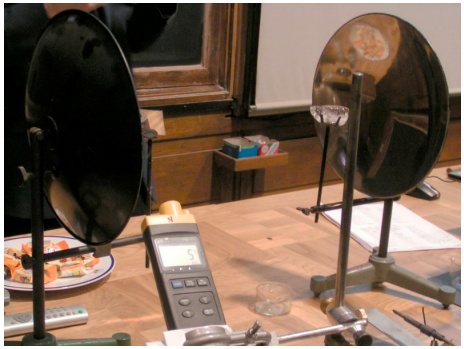
a więc na granicy bliskiej i dalekiej podczerwieni. Zatem, poprzez fale o tej długości odbywa się wymiana ciepła w naszym otoczeniu.



Rys. 13.8 Transmisja ciepła przy pomocy podczerwieni.

Podczerwień nie przechodzi przez niektóre materiały przezroczyste dla światła, jak np. szkło, dlatego zwykłe soczewki mogą nas zawieść w tym zakresie fal. Natomiast podczerwień, podobnie jak inne fale elektromagnetyczne odbija się od metalu. Zatem do odbijania i skupiania podczerwieni możemy używać tych samych zwierciadeł, co do światła widzialnego. Nawet daleka podczerwień, która nie przenika przez szkło, odbija się od zwierciadła, jak światło widzialne.

Ciekawy efekt zaobserwujemy, gdy ustawimy układ według schematu z rys. 13.8 i 13.9. Jeżeli w ognisku pierwszego ze zwierciadeł wstawimy termometr, to będzie on odbierał promieniowanie z ciała umieszczonego w ognisku drugiego zwierciadła. Gdy umieścimy tam np. rozgrzaną lutownicę, to temperatura termometru wyraźnie wzrośnie. Można powiedzieć, że termometr będzie mierzył temperaturę lutownicy. Dzieje się tak, bo promieniowanie cieplne lutownicy zostanie odbite przez zwierciadło, w którego ognisku jest lutownica, a następnie zostanie skupione przez kolejne zwierciadło na termometrze.
Niespodziewany efekt zaobserwujemy, gdy w ognisku zwierciadła umieścimy kostkę lodu. Okazuje się, że w tym przypadku temperatura pokazywana przez termometr spadnie poniżej temperatury pokojowej (rys. 13.9). Czyżby lód promieniował zimnem?



Rys. 13.9 Podczerwień chłodzi. Termometr widząc lód pokazuje 5^{o}C.

Efekt można wyjaśnić biorąc pod uwagę, że podczerwień nie tylko dostarcza ciepła, ale też, że jej emisja powoduje utratę ciepła. Każde ciało emituje ciepło i dostaje je równocześnie od otoczenia. W warunkach równowagi przepływy energii są równe. Jeśli jednak dane ciało widzi przed sobą inne, zimne ciało np. lód, to jego temperatura spada, bo samo emituje ciepło, a nie dostaje go z powrotem od otoczenia.

13.3 Ultrafiolet i luminescencja

Ultrafiolet (!)

Ultrafiolet (nadfiolet) to promieniowanie elektromagnetyczne mające fale krótsze od światła widzialnego.
Nazwa 'nadfiolet' nie pochodzi od porównania długości fal. Zakres ten znajduje się nad fioletem (tak jak na rys. 13.2) ponieważ ma większe energie fotonów (i większe częstości) niż światło widzialne.

	początek VIS/ UV	bliższy/ daleki FUV	koniec zakresu granica X
częstość	790 THz,	1500 THz	30000 THz,
dł. fali	380 nm	200 nm	10 nm
energia,	3,1 eV	6,2 eV	124 eV

Źródła:
lampa Xe lub Hg, lasery i diody świecące, wyładowania elektryczne.
Wykrywanie:
efekt fotoelektryczny, luminescencja.
Ultrafiolet widzą, na przykład, pszczoły.
Zastosowania:
pobudzanie luminescencji, zapis informacji (HD DVD), opalanie, sterylizacja, dezynfekcja.

Bliski ultrafiolet przechodzi przez szkło, dalszy ($\lambda < 350$ nm) - nie przechodzi.
Ultrafiolet ma na tyle duże energie fotonów, że jest w stanie jonizować atomy i cząsteczki chemiczne oraz wywoływać reakcje chemiczne. Z tej przyczyny może być niebezpieczny dla naszej skóry. Ma też właściwości bakteriobójcze.

Fotoluminescencja

Luminescencja, zwana też fluorescencją lub zimnym świeceniem, pojawia się, gdy światło emitowane jest przez elektrony przeskakujące z wyższego na niższy stan kwantowy. Może być pobudzana światłem (fotoluminescencja), reakcjami chemicznymi (chemoluminescencja i bioluminescencja) albo energią elektryczną (elektroluminescencja).



Rys. 13.10 Fotoluminescencja sanek

W pochmurny dzień, gdy słońce jest nisko i jego promieniowanie nie może do nas dotrzeć bezpośrednio, dociera do nas stosunkowo dużo wysokoenergetycznych (ultrafioletowych) fotonów. Dzieje się tak, gdyż ultrafiolet silnie się rozprasza na chmurach. Ultrafiolet pobudza różne barwniki do świecenia.

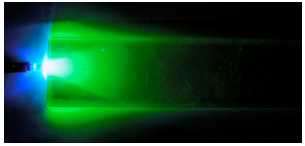
Pobudzanie luminescencji diodami święcącymi (!)

Przyrządy i materiały

- diody elektroluminescencyjne o różnych barwach,
- kawałek szkła lub przezroczystego tworzywa sztucznego zabarwionego święcącym na zielono barwnikiem.

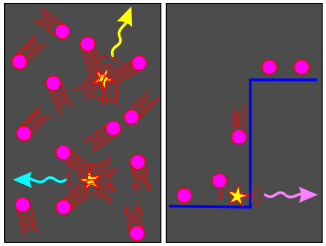
Przebieg doświadczenia

Wysokoenergetyczne (niebieskie) fotony mogą pobudzać elektrony na wyższe poziomy. Elektrony rekombinując, emitują fotony o niższej energii (zielone). Mamy w tym przypadku do czynienia z fotoluminescencją.



Rys 13.11 Zielone świecenie pod wpływem niebieskiej diody

Używając czerwonej diody święcącej, obserwujemy z kolei, że czerwone fotony nie są w stanie pobudzić zielonego luminoforu. Jedynie rozpraszają się tak, że światło nie zmienia barwy.Wyciągamy stąd wniosek, że energia fotonów pobudzających luminofor musi być wyższa (ewentualnie równa) niż fotonów emitowanych.



Rys. 13.12 Promieniowanie termiczne i luminescencja.

W procesach termicznych fotony produkowane są przypadkowo w trakcie zderzeń rozpędzonych cząstek. Natomiast, w przypadku luminescencji mamy dobrze określony proces prowadzący do emisji. W efekcie dostajemy fotony o dobrze określonej energii. Dzięki temu luminescencja ma znacznie większą sprawność, gdyż energia nie jest

tracona na produkcję niewidzialnej podczerwieni, ani na wytwarzanie ciepła.

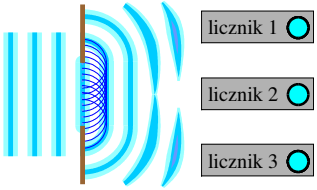
Emisja termiczna ma miejsce w żarówkach, natomiast luminescencję wykorzystujemy w lampach jarzeniowych i diodach świecących. Z tej przyczyny jarzeniówki i diody mają większą wydajność niż żarówki.

Porównanie wydajności: żarówka 10 - 20 lm/W, lampy jarzeniowe i diody - 100 lm/W.

13.4 Oddziaływanie światła z materią, spektroskopia

Światło rozchodzi się w postaci fal, ale oddziałując przekazuje pojedyncze porcje energii, czyli kwanty. Kwanty te zachowują się jak cząstki. Mówimy, że światło składa się z cząstek zwanych **fotonami**.

W laboratorium można przeprowadzić następujący eksperyment: Źródło światła spójnego (laser) emituje światło w kierunku szczeliny. Za szczeliną umieszczamy liczniki fotonów. Światło ulega dyfrakcji i interferencji jak fala. Na przykład licznik 2, umieszczony w minimum interferencyjnym nie będzie wykrywał światła.



Rys. 13.13 Światło jest falą i strumieniem cząstek.

Dobieramy tak małe natężenie światła, że lecą pojedyncze cząstki światła, czyli fotony. Liczniki liczą wtedy pojedyncze, impulsy odpowiadające uderzeniom fotonów.

Porównując momenty czasu, w których następowały zliczenia, stwierdzamy, że reagował albo jeden detektor albo drugi, prawie nigdy dwa na raz. Oznacza to, że światło składa się z pojedynczych czastek, które nie mogą być w dwóch miejscach równocześnie (w przeciwieństwie do fali).

Zgodnie ze wzorem (9.8) energia fotonów światła jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali, λ, a proporcjonalna do częstości, ν.

Właściwość ta ma znaczenie w przypadku absorpcji i misji światła, tak więc wzór ten pojawił się poprzednio przy absorpcji w półprzewodnikach i emisji termicznej danej rozkładem Plancka (13.6). Warto wiedzieć, że także pęd p fotonów światła zależy od długości fali

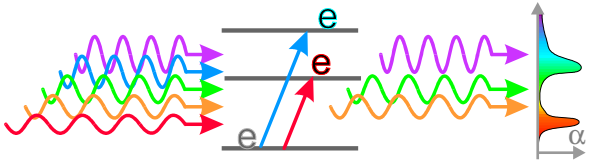
λ lub wektora falowego *k*.

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k \,. \qquad (13.7)$$

Fakt, że fotony maja pęd oznacza, że światło padające na jakaś powierzchnię wywiera na nią ciśnienie.

Widmo absorpcji

Wykład rozpoczęliśmy opisując zjawisko absorpcji. W prawie Lamberta - Beera użyliśmy współczynnika absorpcji α.



Rys. 13.14 Rejestrując natężenie światło przechodzącego przez materię, możemy obliczyć widmo absorpcji.

Współczynnik ten zależy od rodzaju absorbującej substancji oraz od energii padających fotonów, czyli od długości fali świetlnej. Funkcję opisującą tę zależność α(λ), nazywamy widmem absorpcji. Przykład jest na rys. 13.14. Pomiaru widma absorpcji dokonujemy oświetlając badany obiekt światłem o kolejnych długościach fali i mierząc stosunek natężenia światła, które przeszło do światła padającego.

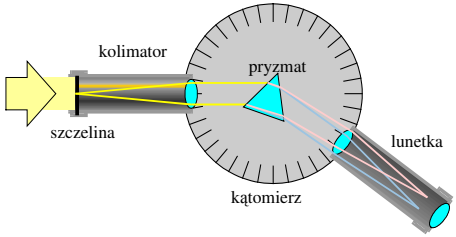
Spektroskop i spektrometr

Newton jako jeden z pierwszych stwierdził, że światło białe jest mieszaniną barw. Zestawienie pokazujące, z jakich barw składa się

dany strumień światła, nazywamy widmem światła.

Spektrometr pryzmatyczny (!)

Przyrząd pokazujący widmo światła nazywamy spektroskopem, a przyrząd mierzący to widmo– spektrometrem. Obecnie spektrometry są zazwyczaj wyposażone w kamery CCD rejestrujące widmo.



Rys. 13.15 Spektroskop pryzmatyczny

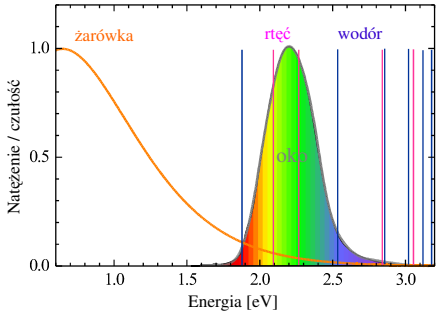
Aby można było uzyskać dobrze rozdzielone barwy światła przechodzącego przez pryzmat, strumień światła musi mieć dobrze określony kierunek przed wejściem do pryzmatu, to znaczy musi być skolimowany. Taki charakter ma światło pochodzące z dalekich obiektów, np. światło słoneczne. Dla bliskich źródeł musimy użyć kolimatora. Składa się on z soczewki lub zwierciadła i szczeliny umieszczonej w ich ognisku.

Skolimowaną wiązkę światła możemy rozszczepić przy pomocy pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej.

Aby otrzymać ostry obraz widma, rozszczepioną wiązkę światła trzeba skupić przy pomocy kolejnej soczewki.

Jeżeli na wyjściu umieścimy kamerę CCD, to będziemy mogli zarejestrować widmo (otrzymamy zatem spektrometr). Natomiast jeśli

na wyjściu umieścimy szczelinę, to będziemy mogli uzyskać światło o jednej, wybranej barwie. Taki przyrząd nazywamy monochromatorem.

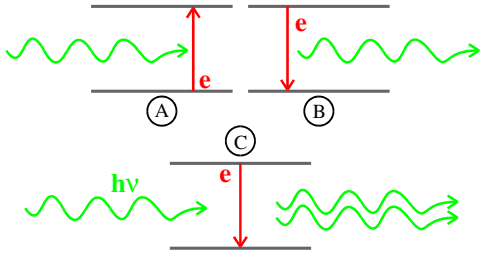


Rys. 13.16 Przykłady widm światła

Na poprzednich wykładach poznaliśmy już przykłady widm dźwięku i fal elektromagnetycznych. W przypadku światła, widma mogą być wykorzystane do rozpoznawania pierwiastków i związków chemicznych. Dzięki widmom można dokonać analizy składu chemicznego, nawet w przypadku odległych gwiazd.

Emisja i emisja wymuszona

Podstawowe procesy oddziaływania światła z materią to rozpraszanie, absorpcja i emisja.



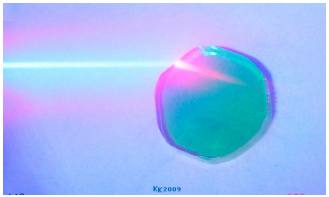
Rys. 13.17 Oddziaływanie światła z materią: A) absorpcja, B) emisja i C) emisja wymuszona.

Rozpraszanie polega na zmianie kierunku ruchu fotonów. **Absorpcja** następuje wtedy, gdy foton zostaje pochłonięty i dzięki swojej energii przenosi elektron z dolnego stanu na górny. **Emisja** następuje, gdy elektron spadając na dolny poziom emituje swoją energię w postaci fotonu. W świecie cząstek kwantowych możliwy jest jeszcze jeden proces. Jeśli elektron jest w górnym (wzbudzonym) stanie i padnie na niego foton, to wymusza on emisję drugiego, identycznego pod względem częstości i fazy fotonu. Taki proces nazywamy **emisją wymuszoną**. Stanowi on podstawę działania laserów.

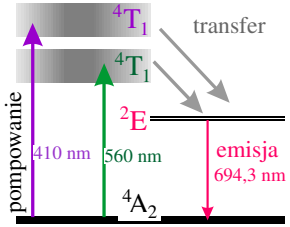
W laserach doprowadzamy do inwersji obsadzeń, czyli umieszczamy dużo elektronów w stanie wzbudzonym, o wysokiej energii. Następnie przy pomocy zwierciadeł powodujemy, że fotony krążą we wnęce lasera w tą i z powrotem, za każdym razem powodując emisję wymuszoną, która wzmacnia wiązkę światła.

Laser rubinowy

Laser rubinowy był pierwszym działającym typem lasera. Został skonstruowany w 1960 roku przez Theodora Maimana.



Rys. 13.18 Kryształ granatu YAG z jonami chromu Cr^{3+}. Pobudzany niebieskim laserem, świeci na czerwono.



Rys. 13.19 Przejścia wewnątrz jonu chromu Cr^{3+} (w Al_2O_3)

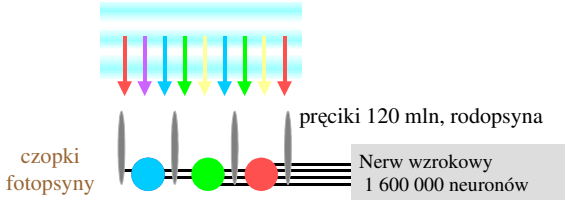
W laserze rubinowym wykorzystuje się przejścia wewnątrz jonu chromu Cr^{3+} (rys. 13.18 i 13.19). Chrom pobudzany jest niebieskim i zielonym światłem z lampy jarzeniowej. Elektrony spadają na stan, z którego emisja spontaniczna jest zabroniona. Uzyskaną w ten sposób inwersję obsadzeń wykorzystujemy do otrzymania emisji wymuszonej.

13.5 Wzrok

Nasze oczy maja wiele ciekawych właściwości, na przykład, różne strumienie światła mogą mieć dla oka podobna barwę, choć w rzeczywistości mają różny skład. Na przykład, mieszanina światła czerwonego i zielonego oraz czyste żółte światło będą dla oka wyglądać tak samo.

Mechanizm widzenia barwnego (!)

Mechanizm rozróżniania barw przez nasze oczy różni się od zasady działania spektroskopu. Oko nie rozszczepia światła. Światło wpadające do oka skupiane jest przez soczewkę na siatkówce. Znajdują się tam światłoczułe komórki, dzięki którym widzimy i możemy rozróżniać barwy.



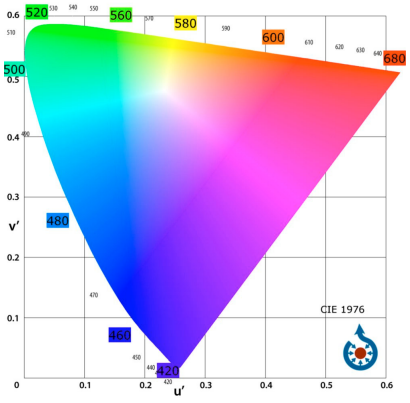
Rys. 13.20 Komórki nerwowe i barwniki w ludzkim oku

Mamy dwa rodzaje komórek światłoczułych czopki i pręciki. Pręcików jest znacznie więcej i są bardziej czułe od czopków. Widzimy dzięki nim nawet przy bardzo słabym oświetleniu. Jednak pręciki nie pomagają przy rozpoznawaniu barw. Kolory widzimy dzięki czopkom.
Mamy trzy rodzaje czopków:
S - krótkofalowe - niebieskie,

M - średniofalowe - zielone,
L - długofalowe - czerwone.

Komórki te wyposażone są w różne typy barwników. Maja one stany kwantowe oddzielone przerwami energetycznymi, tak że fotony muszą mieć odpowiednią energię, aby wzbudzić elektron. Trzy rodzaje czopków maja trzy różne energie, a więc absorbują kwanty światła (fotony) o różnych barwach. Zatem kolory rozróżniamy dzięki kwantowym właściwościom cząsteczek chemicznych . Ponieważ mamy tylko 3 barwniki, więc tak naprawdę rozróżniamy tylko 3 kolory: niebieski, zielony i czerwony. Barwniki czerwony i zielony są podobne i kodowane przez geny na chromosomie X. Mężczyźni mają tylko jeden chromosom X i zdarza się, że mają na nim tylko 1 rodzaj barwnika czułego w zakresie od czerwieni do zieleni. Nie potrafią oni odróżnić czerwonego od zielonego. Natomiast niektóre kobiety mają 3 różne barwniki czułe w tym zakresie (Świat Nauki, maj 2009, str. 50)

Paleta barw



Rys. 13.21 Paleta barw CIE 1976

Ponieważ nasze oczy rozróżniają tylko 3 kolory, wszystkie pozostałe barwy odbieramy dzięki temu że mózg analizuje stosunki natężeń tych trzech kolorów w strumieniu światła. Wiedza o tym mechanizmie daje techniczną możliwość odtworzenia wrażenia dowolnej barwy poprzez mieszanie trzech podstawowych barw.

To, jak należy mieszać barwy, pokazuje nam paleta barw (patrz rys. 13.21). Jeżeli mamy dwie barwy odpowiadające dwóm punktom na tej palecie, to mieszając te barwy możemy otrzymać dowolną inną, leżącą na odcinku łączącym barwy wyjściowe.

Paleta ma kształt trójkąta. Aby odtworzyć wszystkie barwy znajdujące się wewnątrz tego trójkąta musimy mieć do dyspozycji źródła światła o barwach leżących w wierzchołkach tego trójkąta.

Paleta na rysunku 13.21 znajduje zastosowanie, gdy chcemy uzyskać kolory na ekranie telewizora lub monitora. Możemy też mieszać barwy z diod święcących.

Addytywne składanie barw - trójkolorowa dioda świecąca (!)

Przyrządy i materiały

- potrójna dioda świecąca RGB,
- zasilacz 6V,
- przewody i potencjometry (10 kΩ)

Przebieg doświadczenia

Do diod podłączamy zasilanie poprzez potencjometry. Regulując potencjometrami zmieniamy natężenia światła emitowanego z poszczególnych diod. Światło rzucamy na biały, matowy przedmiot, tak aby wymieszało się. Obserwujemy, że dobierając różne natężenia światła uzyskujemy różne barwy.

Sumując niebieski i czerwony otrzymujemy barwę purpurową. Natomiast sumując zielony i czerwony otrzymujemy barwę żółtą lub pomarańczową w zależności od proporcji mieszanych barw. Gdy

zielonego jest dużo barwa jest żółta lub cytrynowa. Jeżeli sumujemy zielony o mniejszym natężeniu z czerwonym o większym natężeniu, to otrzymujemy kolor pomarańczowy.

Kodowanie RGB

Aby jednoznacznie podać jakąś barwę, którą na przykład chcemy wyświetlić na monitorze komputera, należy podać trzy parametry. Najczęściej podaje się parametry określające składowe czerwoną, zieloną i niebieską. Ten sposób nazywamy kodowaniem RGB, od angielskich słów: R – red, G – green, B – blue.

W grafice cyfrowej parametry RGB zapisuje się liczbami od 0 do 255. Na przykład:

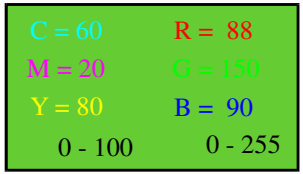
biały (255,255,255), czarny (0, 0, 0), żółty (255, 255, 0).

Addytywne i subtraktywne kodowanie barw (!)

System RGB wykorzystywany jest do składania barw emitowanych (jak w przypadku diod czy telewizji). Składając dwa kolory w tym systemie dostajemy trzeci kolor, jaśniejszy. Taki sposób składania barw nazywamy systemem addytywnym.

Inaczej się dzieje, gdy malujemy farbami. Wtedy mieszając ze sobą dwa barwniki otrzymujemy kolor ciemniejszy. Farby bowiem pochłaniają światło.

Takie składanie kolorów nazywamy subtraktywnym. Kolorami podstawowymi są wtedy: błękitny, purpurowy i żółty.
Do opisu barwy, w takim przypadku używany jest system CMY lub CMYK. Skrót pochodzi od słów Cyan, Magenta, Yellow i blacK.



Rys. 13.22 Opis koloru ciemno-zielonego (tło prostokąta) w systemach RGB i CMY.

W grafice cyfrowej parametry CMYK zapisuje się zazwyczaj liczbami od 0 do 100.

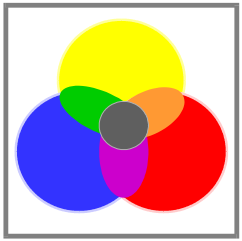
Na przykład: biały (0, 0, 0, 0), czarny (0, 0, 0, 100), żółty (0, 0, 100, 0), zielony (50, 0, 50, 0).

Porównanie dwóch metod kodowania przedstawione jest na rysunku 13.22. Znajdujący się na tym rysunku zielony prostokąt przedstawiony ma kolor opisany podanymi kodami w systemach RGB i CMY.

W sposób naturalny subtraktywna metoda mieszania barw ma zastosowanie przy malowaniu, farbowaniu tkanin, a także w wydrukach, w tym w drukarkach komputerowych.

Mieszanie trzech barw

Przy subtraktywnym mieszaniu barw, zielony nie jest już kolorem podstawowym. Otrzymujemy go mieszając żółty i błękitny. Natomiast kolor, który tu nazywam błękitnym (w angielskim cyan) jest jaśniejszy i trochę bardziej zielony od niebieskiego, będącego kolorem podstawowym w systemie addytywnym.



Rys. 13.23 Mieszanie barw podstawowych

Subtraktywne mieszanie kolorów możemy zademonstrować układając jeden na drugim filtry barwne. Zauważamy, między innymi, że niektóre pary kolorów dają w sumie kolor szary. Nazywamy je kolorami dopełniającymi.

Przykłady par kolorów dopełniających:

- czerwona + zielona = szara
- fioletowa + żółta = szara
- niebieska + pomarańczowa = szara

Doświadczalne mieszanie barw

Addytywne mieszanie barw najlepiej przeprowadzić nakładając na siebie strumienie światła z różnych źródeł. Na przykład z dwóch rzutników. Natomiast subtraktywne mieszanie barw otrzymamy, gdy z tego samego strumienia światła zabierzemy po kolei różne barwy np. nakładając na siebie filtry, można też prosto wykonać mieszanie farb. Na wykładzie demonstrowany był kolorowy wydruk pod mikroskopem.



Rys. 13.22 Mieszanie barw w teatrze cieni

Ciekawą metodą pokazującą jednocześnie mieszanie addytywne i subtraktywne jest oświetlenie ekranu zielonym, czerwonym i niebieskim strumieniem światła i wytworzenie nakładających się cieni, tak jak na zdjęciu 13.22. Można wtedy na ekranie wskazać obszary oświetlone dwoma strumieniami, gdzie dodaje się, na przykład, czerwony i zielony tworząc kolor żółty. Obserwując obszary zacienione, można prześledzić działanie metody subtraktywnej. Można, między innymi, wskazać obszar żółtego cienia, który przecinając się z błękitnym cieniem daje barwę zieloną.

13.6 Podsumowanie

Światło ma naturę falowo-cząstkową: jest **falą elektromagnetyczną** i jednocześnie strumieniem **fotonów**.

Fotony mogą być rozpraszane, **absorbowane** i **emitowane** (luminescencja). Może też nastąpić **emisja wymuszona** (lasery).

Prawo Lamberta-Beera (absorpcja): Natężenie światła maleje wykładniczo z grubością absorbera.

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha x),$$

gdzie α - **współczynnik absorpcji**.

Prawo Wiena (emisja): Ze wzrostem temperatury, maksimum natężenia emitowanego światła przesuwa się w stronę krótszych fal.

Energia, E, fotonów jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali, λ, a proporcjonalna do częstości, ν.

W przypadku **fotoluminescencji** pobudzać musimy fotonami o większej energii niż spodziewana energia emitowanych fotonów.

Podczerwień składa się z fotonów o niskiej energii (fale dłuższe od czerwieni), ale ma zazwyczaj duże natężenie i przenosi znaczące ilości ciepła.

Ultrafiolet składa się z fotonów o wysokiej energii (fale krótsze od fioletu), mogących powodować reakcje chemiczne, również szkodliwe.

Człowiek widzi barwy dzięki czopkom - receptorom czułym w trzech zakresach barw: czerwonym, zielonym i niebieskim. Dzięki temu aby zakodować barwę wystarczą trzy parametry:

czerwony, zielony i niebieski - kodowanie addytywne RGB.
lub
błękitny, czerwony i żółty - kodowanie subtraktywne CMY.