

Materiałoznawstwo optyczne

INNE

$$I_0 = I_T + I_A + I_R$$

$T = I_T / I_0$ Transmissivity

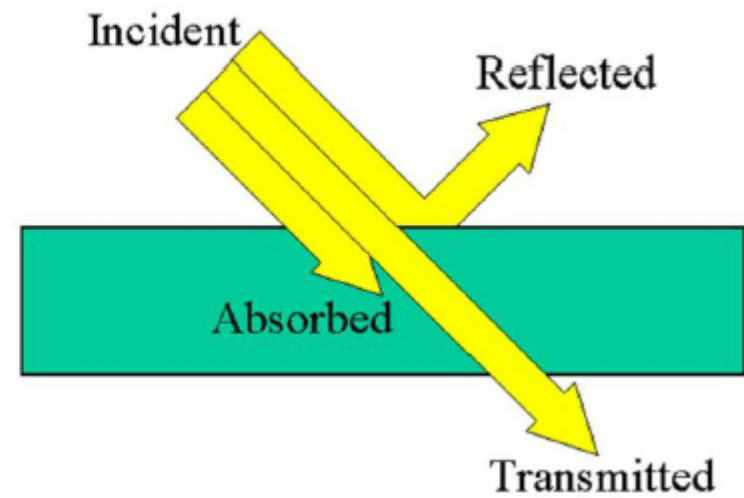
$A = I_A / I_0$ Absorptivity

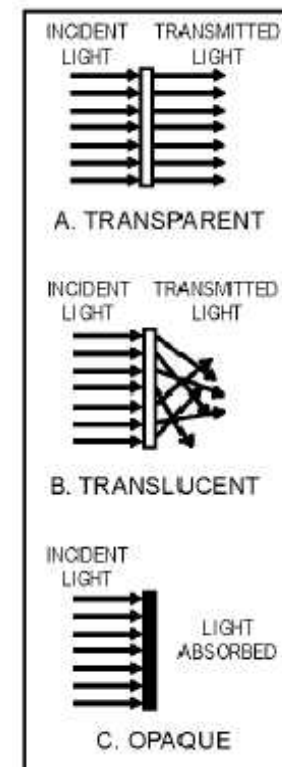
$R = I_R / I_0$ Reflectivity

$T \sim 1$: Transparent

$T \sim 0$: Opaque

$$T + A + R = 1$$





- obiekty przezroczyste
- półprzezroczyste
- nieprzezroczyste



Oddziaływania elektronowe i atomowe

- zjawiska optyczne, które występują w materiałach stałych obejmują oddziaływania między promieniowaniem e-m oraz atomami, jonami i/lub elektronami.

Polaryzacja elektronowa

- jedna ze składowych fali e-m jest zmieniającym się gwałtownie pole elektrycznym
- w widzialnym zakresie częstotliwości to pole elektryczne oddziałuje z chmurą elektronową otaczającego atomu co wywołuje polaryzację elektronów (chmura elektronów jest przesuwana w stosunku do jądra atomu przy każdej zmianie kierunku składowej pola elektrycznego)
- konsekwencje: (1) może nastąpić absorpcja części energii, (2) opóźnienie prędkości światła podczas przechodzenia przez ośrodek

Energia przejścia elektronów

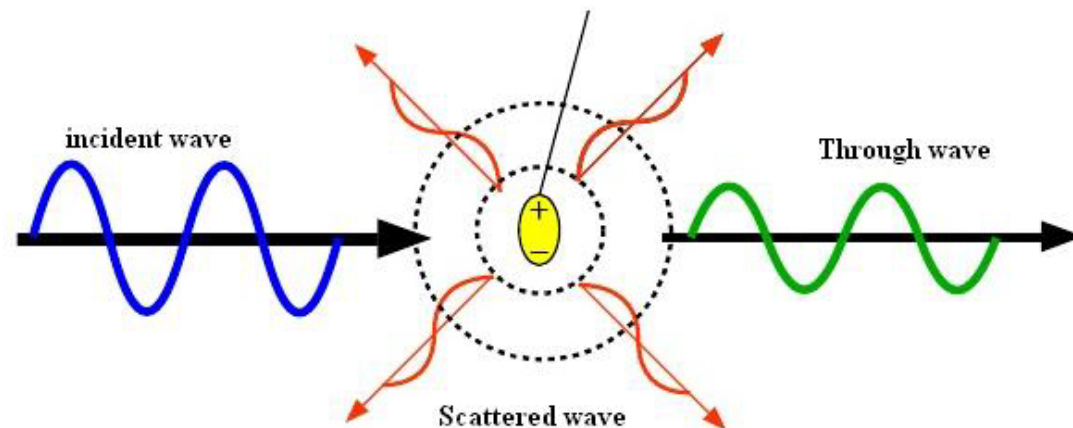
- absorpcja i emisja promieniowania e-m (przechodzenie elektronów z jednego stanu energetycznego na drugi)

Optyczne właściwości metali:

- nieprzezroczyste, ponieważ padające promieniowanie (z zakresu widzialnego) wzbudza elektrony do niezajętych stanów energetycznych powyżej energii Fermiego
- całkowita absorpcja na małej grubości zewnętrznej warstwy ($< 0,1 \mu\text{m}$), zatem tylko folie metalowe cieńsze od $0,1 \mu\text{m}$ są zdolne do przepuszczania światła widzialnego
- W rzeczywistości metale są nieprzezroczyste dla promieniowania e-m dla dolnego zakresu częstotliwości, poczynając od fal radiowych, podczerwonych, światła widzialnego, aż do średniego UV
- są przepuszczalne dla promieniowania X i γ
- Większość pochłoniętego promieniowania jest emitowana w postaci światła widzialnego o tej samej długości fali, która jest widziana jako światło odbite
- aluminium i srebro są dwoma metalami które wykazują odbicie
- miedź i złoto wydają się odpowiednio czerwono-pomarańczowe i żółte ponieważ część energii związanej z fotonami światła o krótkich długościach fal nie jest reemitowane jako światło widzialne.

Przezierność:

- Rozproszenie :
 - granice ziaren w materiałach polikrystalicznych
 - drobne pory w ceramice
 - różne fazy materiałów
- w materiałach „czystych” istotne znaczenie może mieć rozproszenia Rayleigha (losowe małe różnice w wartościach współczynnika załamania w objętości elementu)
- materiały amorficzne (np. szkło) –zazwyczaj spowodowane losowymi różnicami gęstości i składu struktury.
- kryształy – defekty sieci krystalicznej, ruchy termiczne atomów itp.
- Mechanizm ma znaczenie technologiczne – straty w włóknach optycznych stosowanych w komunikacji.



ROZPRASZANIE ŚWIATŁA W FILTRACH OPTYCZNYCH

- doprowadzenie do powstania w masie szklanej zawiesiny krystalitów lub koloidalnych cząstek metali, będących źródłem rozproszenia i absorpcji światła.
- rozproszenie Rayleigha – bardzo silna zależność od długości fali ujawnia się stromością krawędzi krzywej przepuszczania → filtry odcinające promieniowanie krótkofalowe (filtry typu OG i RG –Schott, szkło rubinowe)
- filtr Christiansena –zawiesina materiału optycznego np. sproszkowanego kwarcu w cieczy lub w gazie; rozproszeniu ulega światło o takiej długości fali, dla której współczynnik załamania materiału zawiesiny jest różny od współczynnika załamania ośrodka, w którym się ona znajduje – krzywa widmowa współczynnika przepuszczania wykazuje wyraźne maksimum dla długości fali, dla której obydwa współczynniki załamania są równe.

W zależności od struktury materiału a także od właściwości padającego światła, zachodzi wiele zjawisk optycznych (nie tylko załamanie i odbicie), które są wykorzystywane w technologii:

- luminescencja
- lasery
- emisja termiczna
- fotoprzewodnictwo
- światłowody

Luminescencja

- Jest to proces, w którym materiał pochłania energię, a następnie natychmiast emituje promieniowanie widzialne i o długościach fal bliskich widzialnego. Proces polega na wzbudzeniu elektronów a następnie „zepchnięciu” ich na niższe stany energetyczne. Światło widzialne jest emitowane jeśli różnica energii mieści się w granicach: $1.8 \text{ eV} < h \nu < 3.1 \text{ eV}$.
- luminofores – specjalne materiały mające zdolność do absorbowania promieniowania wysokoenergetycznego i spontanicznej emisji promieniowania o mniejszej energii, np. niektóre siarczki, tlenki, wolframiany oraz kilka materiałów organicznych. Zwykle „czyste” materiały nie wykazują tego zjawiska, w celu ich wywołania należy „zanieczyścić” materiał w kontrolowany sposób (stężenia)
- Luminescencja: $I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ gdzie I – natężenie po czasie t , τ -czas relaksacji (stały dla danego materiału)

Luminescencja-materiały

- Krystaloluminescencja – świecenie podczas krystalizacji i narastania kryształów, np. NaCl
- Luminescencja minerału - Fosforescencja pod wpływem naświetlania UV: diament, baryt, bezbarwne kryształy gipsów
- fotoluminescencja: kalcyt, cyrkon, fluoryt, topaz, gips, autunit, dolomit, anglezyt, waryscyt, apatyt;
- Luminofores – substancje syntetyczne wykazujące luminescencję
 - Luminofores nieorganiczne: wolframiany, krzemiany, siarczki, selenki, tellurki, tlenki i inne
 - luminofores organiczne: pochodne diksantyleny, benzo- i naftodialdazyn, rodamina, eozyna, fluoroescena, uranina i inne

Luminescencja-podział

- Fotoluminescencja - wywołana przez pochłonięcie promieniowania elektromagnetycznego z obszaru widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni. Pochłonięta energia jest następnie wyemitowana także w postaci światła, na ogół o energii mniejszej niż energia światła wzbudzającego.
 - Reemisja w ciągu 10^{-8} s po wzbudzeniu – fluorescencja, jeśli trwa dłużej – fosforescencja
 - fluorescencja – przy przejściu samorzutnym z wyższego poziomu energetycznego elektronu na niższy; fosforescencja – powstaje przy udziale energii cieplnej ośrodka, warunkiem wystąpienia tego zjawiska jest istnienie poziomów metatrwałych;
 - fotoluminescencja: organiczne barwniki w odblaskowych flamastrach, luminofony stosowane w świetłówkach-rurach fluorescencyjnych
- Elektroluminescencja – luminescencja gazów zachodząca pod wpływem wyładowania elektrycznego; zachodzi również dla niektórych ciał stałych pod wpływem działania stałego lub zmiennego prądu elektrycznego; wykorzystanie: lampy jarzeniowe, LED, urządzenia pamięciowe, kondensatory elektroluminescencyjne, przetworniki obrazu
- Chemiluminescencja - wytworzona w trakcie niektórych reakcji chemicznych np. utlenianie fosforu; test wstępnej identyfikacji krwi, detekcja-chromatografia cieczowa; można zaobserwować w niektórych układach biologicznych
- elektronoluminescencja (katodoluminescencja) - świecenie pod wpływem elektronów przyspieszanych napięciem między elektrodami, wykorzystanie: oscyloskopy, kineskopy, mikroskopy elektronowe i inne

Luminescencja-podział

- Scyntylacja - emisja światła pod wpływem promieniowania jonizującego, Scyntylator pochłania energię promieniowania jonizującego (np. gamma, beta, promieniowanie neutronowe), a następnie emituje światło widzialne; wykorzystanie – np. Tomografia komputerowa

- rentgenoluminescencja – świecenie wywołane przez promieniowanie rentgenowskie; np.. Wolframian wapnia CaWO_4 – zastosowanie przy produkcji ekranów wzmacniających

- radioluminescencja - świecenie pod wpływem promieniowania alfa α , beta gamma γ

- Sonoluminescencja – luminescencja wywołana ultradźwiękami

- Termoluminescencja - następuje po uprzednim naświetleniu substancji i następnie jej ogrzaniu; mamy tu do czynienia z gromadzeniem energii świetlnej i wypromieniowaniu jej gdy chcemy – w momencie podgrzania; np. Fluorek wapnia; zastosowanie dozymetria, datowanie obiektów archeologicznych i geologicznych

- Tryboluminescencja - wywołana czynnikiem mechanicznym, np. tarciem, zginaniem, ściskaniem, ciśnieniem, uderzeniem.

Lampy fluorescencyjne - fotoluminescencja

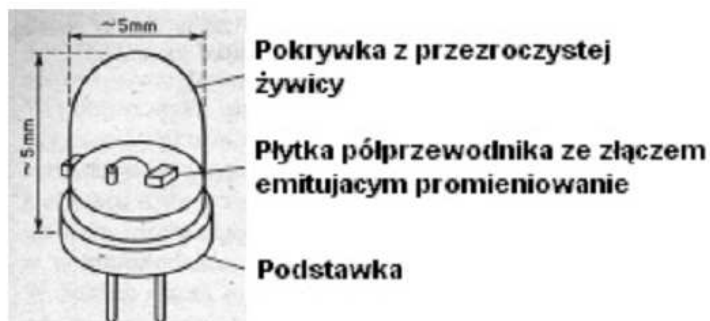
- występuje w lampach fluorescencyjnych (świelówkach). Wzbudzona zostaje rtęć na wyższy poziom energetyczny. Elektron wraca emitując fale UV. Świelówki składają się ze szklanej obudowy, pokrytej od wewnątrz specjalnie przygotowanymi wolframianami i krzemianami. Promieniowanie UV jest generowane wewnątrz rurki z wyładowania jarzeniowego rtęci, co powoduje powstanie pokrycia fluorescencyjnego i emisji światła białego
- Jest to lampa elektryczna mająca najczęściej kształt rury, pokrytej od wewnątrz luminoforem, wypełniona parami rtęci i argonem, w której źródłem świecenia jest promieniowanie widzialne emitowane przez warstwę luminoforu pokrywającego wewnętrzną powierzchnię rury. Wyładowania zachodzące pomiędzy elektrodami wolframowymi zabudowanymi przy końcach rury wytwarzają głównie promieniowanie UV o długości fali ok. 254 nm. Odpowiednio dobrane luminofony przetwarzają to promieniowanie na promieniowanie widzialne o pożądanej barwie światła
- promieniowanie UV jest „przekształcane” w światło widzialne dzięki obecności luminoforu fosforanu wapnia
- Jony antymonu Sb^{3+} emitują światło niebieskie, podczas gdy jony manganu Mn^{2+} - pomarańczowo-żółty



Elektroluminescencja - LED



- Dioda elektroluminescencyjna - dioda zaliczana do półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowanie w zakresie światła IR, VIS i UV.
- złącze p-n przymocowane do podstawki z doprowadzeniami, pokrytej osłoną z żywicy, zwykle w kształcie kuli.
- działanie – rekombinacja nośników ładunku; elektrony przechodząc z wyższego poziomu energetycznego na niższy zachowują swój pęd. Podczas tego przejścia energia elektronu zostaje zmieniona na kwant promieniowania e-m.
- Długość fali emitowanego promieniowania zwiększa się ze wzrostem temperatury złącza. Diody emitują promieniowanie w bardzo wąskim przedziale widma: od 490 nm – kolor niebieski do 950 nm – bliska podczerwień.
- Np. GaAs, GaP, GaAlAs, GaAsP



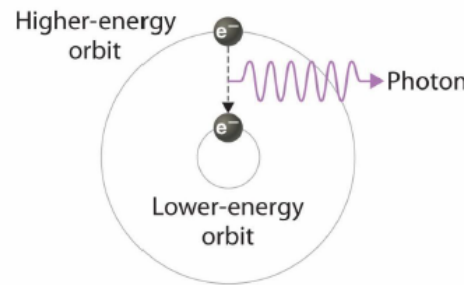
Material	$E_g [eV]$	Domieszka	Zakres
$GaAs$	1.443	Si	IR
GaP	2.26	N	Zielony
GaP	2.26	N, N	Żółty
GaP	2.26	Zn, O	Czerwony
$GaAs_{0.6}P_{0.4}$	2.1		Czerwony
$GaAs_{0.35}P_{0.65}$	2.1	N	Pomarańczowy
$GaAs_{0.15}P_{0.85}$	2.1	N	Żółty
$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	2.1	Zn	Czerwony
$Ga_xAl_{1-x}As (1 < x < 0.7)$	2.1	Si	IR

Elektroluminescencja - LED

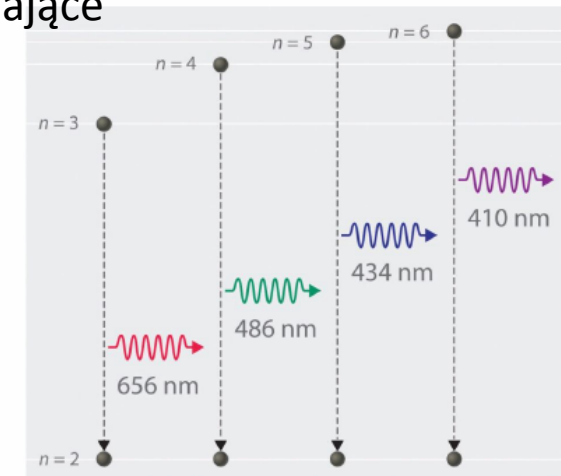
- IR-wykorzystane w łączach światłowodowych, a także w urządzeniach zdalnego sterowania
- HBLED, *High Brithtness LED* – diody o wysokiej jasności świecenia, znajdują zastosowanie w miejscach, gdzie zwykle używa się tradycyjnych źródeł światła – w sygnalizacji ulicznej, w oświetlaniu pojazdów, w latarkach;
- RGB LED – dioda mająca struktury do generowania trzech podstawowych barw co daje możliwość mieszania (uzyskanie praktycznie dowolnej barwy)
- Warm white LED – LED generująca światło bardzo zbliżone do światła żarówki

Lasery

- *light amplification by stimulated emission of radiation*
- urządzenie, które wzmacnia lub zwiększa natężenie światła tworząc silnie ukierunkowaną wiązkę o dużym natężeniu która zwykle ma bardzo czystą częstotliwość i długość fali.
- światło wytwarzane za pomocą lasera jest spójne, koherentne, monochromatyczne; wiązka o bardzo małej rozbieżności
- działanie lasera – emisja wymuszona – przejście elektronu na wyższy stan energetyczny po wzbudzeniu fotonem
- foton musi mieć energię większą od przerwy energetycznej
- Emitowane światło ma taką samą energię i fazę jak światło padające (spójność)
- w niektórych materiałach elektrony wzbudzone przez impuls „wytwarzają fotony” które z kolei pobudzają inne fotony o identycznej długości fali. Zachodzi duże wzmocnienie fotonów emitowanych z materiału



(a) Electronic emission transition



(b) Balmer series transitions

Lasery

- gazowe: inwersja obsadzeń (więcej atomów w stanie wzbudzonym niż podstawowym) uzyskuje się przez przyłożenie napięcia wzdłuż rury z rozrzedzonym gazem
- półprzewodnikowe: złącze n (nadmiar elektronów)-p (nadmiar dziur); przepływający prąd przepycha elektrony, które łącząc się (rekombinując) z dziurami powodują emisję światła i inwersję obsadzeń; wysokie prądy powodują powstanie dużych ilości ciepła

Właściwości wiązki:

- Kierunek i rozbieżność wiązki
- Profil wiązki
- Długość fali i częstotliwość światła w obszarze widma

Są określone przez zwierciadła lasera:

- Krzywizna, jakość powierzchni, współczynnik odbicia, odległość i położenie

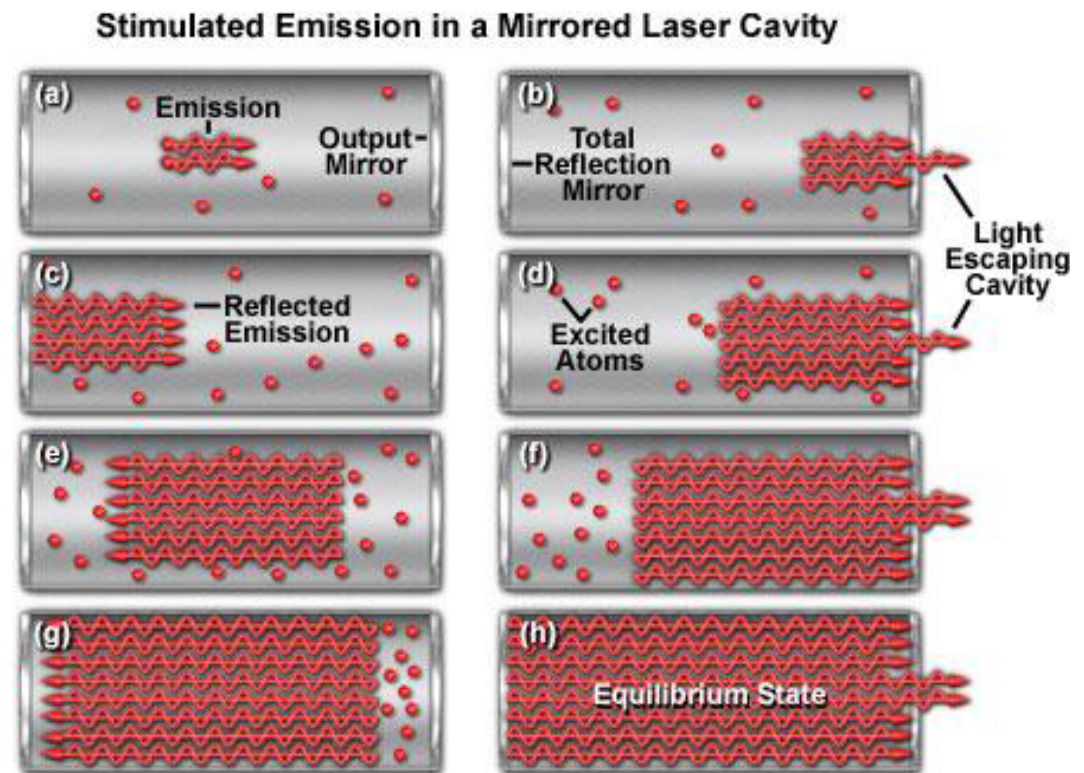


Figure 1

Ośrodki laserujące

- Atomy
 - Hel-neon, argon, hel-kadm, pary miedzi
- Cząsteczki
 - dwutlenek węgla, lasery ekscymerowe (ArF, KrF), azot
- Ciecze
 - Barwniki organiczne rozpuszczone w cieczach
- Dielektryczne ciała stałe
 - Atomy neodymu w guncie itrowo-aluminiowym (Nd:YAD) lub w szkle (Nd:glass)
- Półprzewodniki
 - Arsenek galu, fosforek indu i różne mieszaniny domieszek w tych i innych półprzewodnikach

Lasery

- rubin, monokryształ Al_2O_3 domieszkowany w małej ilości Cr_2O_3 , YAG z domieszką Nd, gazy: CO_2 , He-Ne, niektóre półprzewodniki jak GaAs lub InGaAsP.

Table 21.2 Characteristics and Applications of Several Types of Lasers

<i>Laser</i>	<i>Type</i>	<i>Common Wavelengths (μm)</i>	<i>Max. Output Power (W)^a</i>	<i>Applications</i>
He-Ne	Gas	0.6328, 1.15, 3.39	0.0005–0.05 (CW)	Line-of sight communications, recording/playback of holograms
CO_2	Gas	9.6, 10.6	500–15,000 (CW)	Heat treating, welding, cutting, scribing, marking
Argon	Gas ion	0.488, 0.5145	0.005–20 (CW)	Surgery, distance measurements, holography
HeCd	Metal vapor	0.441, 0.325	0.05–0.1	Light shows, spectroscopy
Dye	Liquid	0.38–1.0	0.01 (CW) 1×10^6 (P)	Spectroscopy, pollution detection
Ruby	Solid state	0.694	(P)	Pulsed holography, hole piercing
Nd-YAG	Solid state	1.06	1000 (CW) 2×10^8 (P)	Welding, hole piercing, cutting
Nd-Glass	Solid state	1.06	5×10^{14} (P)	Pulse welding, hole piercing
Diode	Semiconductor	0.33–40	0.6 (CW) 100 (P)	Bar-code reading, CDs and DVDs, optical communications

^a "CW" denotes continuous; "P" denotes pulsed.

Lasery

- Zastosowania:
 - poligrafia
 - znakowanie produktów
 - przesyłanie energii
 - cięcie i spawanie metali
 - obróbka cieplna
 - Technologia wojskowa (dalmierze laserowe, czujniki laserowe, wskaźniki celu, łącza telefoniczne, mierniki wysokości, aneometry, mierniki szybkości lotu)
 - Medycyna (diagnostyka, terapia schorzeń)
 - telekomunikacja (nadajniki przy transmisji światłowodowej, odczyt i zapis informacji na płytach kompaktowych)
 - efekty wizualne
 - geodezja, budownictwo
 - produkcja układów scalonych
 - czytniki kodów w sklepach

Podatność materiałów optycznych na działanie promieniowania laserowego

- koncentracja wiązki laserowej na niewielkiej powierzchni lub objętości wywołuje zjawiska, będące z jednej strony skutkami oddziaływania pola elektrycznego o dużym natężeniu, z drugiej – efektami termicznymi, ujawniającymi się w wyniku absorpcji lub rozpraszania energii światła wewnątrz ośrodka.

- jonizacja lawinowa wywołująca lawinę elektronową
- elektrostrykcja
- generacja hiperdźwięku przy wymuszonym rozpraszaniu Brillouina,
- różnego rodzaju efekty cieplne inicjowane w materiale optycznym absorpcyjnymi wtrąceniami i defektami (naprężenia termosprężyste, jonizacja termiczna, fotojonizacja promieniowaniem nagrzanym wtrąceń, reakcje termochemiczne i mechaniczno-chemiczne itp.)

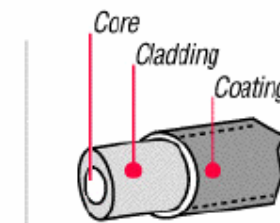
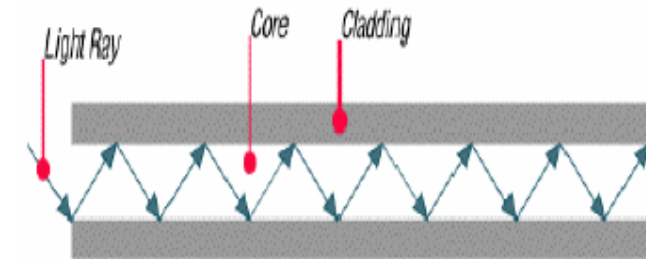
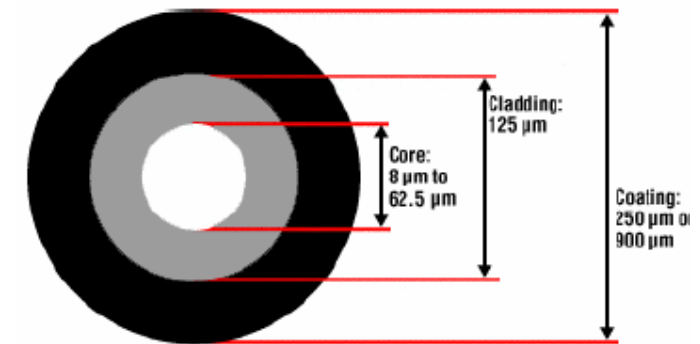
- Wprowadzanie domieszek w materiał optyczny może obniżać, jak i zwiększać odporność laserową.

Fotoprzewodnictwo:

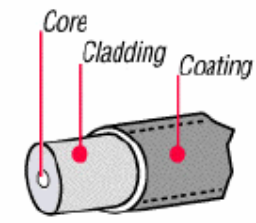
- Przewodność materiałów zależy od liczby wolnych elektronów, a także od liczby dziur w paśmie przewodzenia
- bombardowanie półprzewodników fotonami może skutkować powstaniem par elektron-dziura które mogą być wykorzystane do generowania prądu – fotoprzewodnictwo
- wytwarzany prąd jest bezpośrednio związany z natężeniem padającego światła
- wykorzystanie : detekcja światła, do detekcji światła widzialnego najczęściej jest używany siarczek kadmu
- podstawowa zasada działania fotokomórki oraz baterii słonecznych (przetwarzanie energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną).

Włókna optyczne:

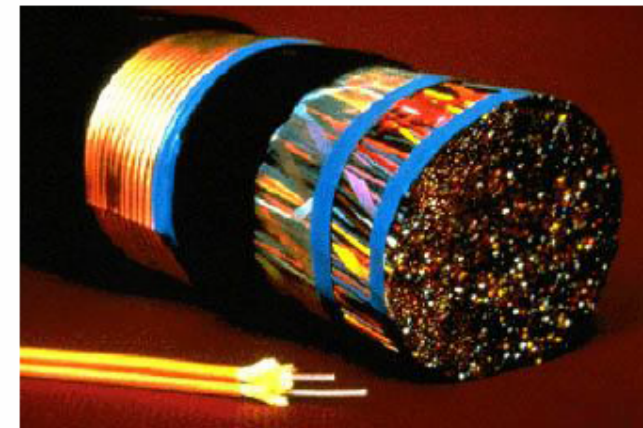
- Zrewolucjonizowały przemysł telekomunikacji
- włókno optyczne – rdzeń, płaszcz i pokrycie; rdzeń transmituje sygnały, natomiast płaszcz ma za zadanie ograniczać transmisję światła tylko w rdzeniu, zewnętrzna powłoka chroni rdzeń i płaszcz przed wpływem środowiska zewnętrznego.
- zarówno rdzeń i płaszcz wykonane są ze specjalnych rodzajów szkła o ściśle kontrolowanym współczynniku załamania.
- współczynnik załamania płaszcza musi być mniejszy niż n rdzenia (zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia)

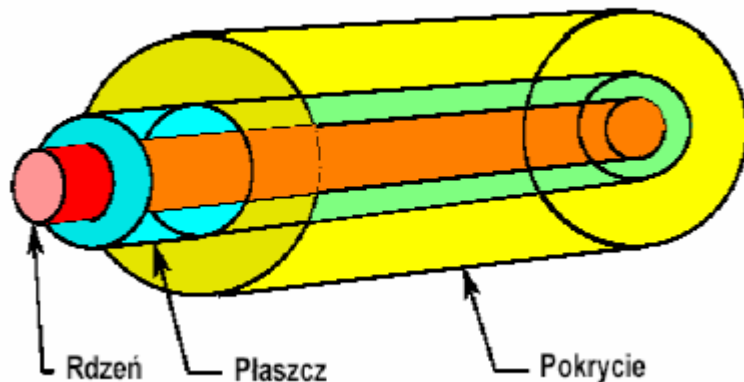
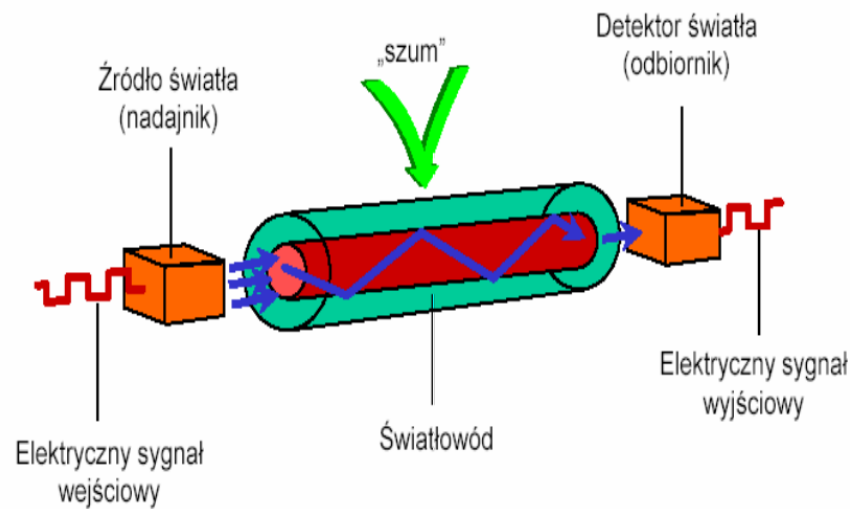


Multimode Fiber (MM)



Single-Mode Fiber (SM)





- układ telekomunikacyjny składa się z nadajnika (laserowego) który zamienia sygnał elektryczny na sygnał świetlny, włókna optycznego który transmituje sygnał świetlny i fotodiody do konwersji światła na sygnał elektryczny

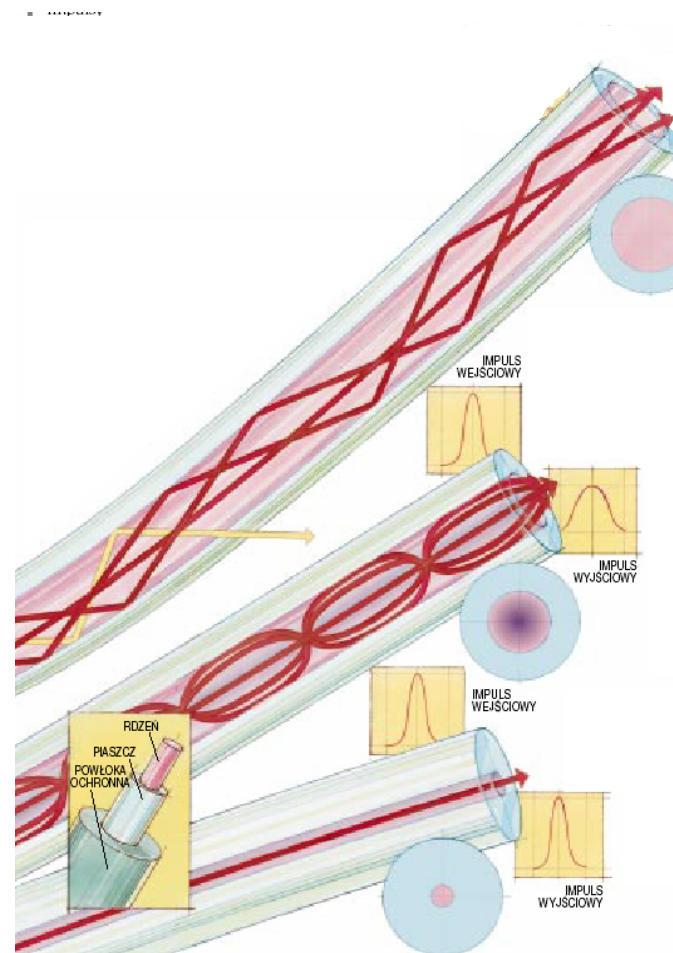
- Rdzeń jest ośrodkiem w którym biegnie światło. Najczęściej wykonany jest z domieszkowanego szkła (np. $\text{GeO}_2 + \text{SiO}_2$) zapewniającego dobre właściwości przewodzące.

- Płaszcz światłowodu jest zrobiony z czystego szkła mającego niższy współczynnik załamania niż rdzeń

- Różnica współczynników załamania pozwala światłu poruszać się w rdzeniu (całkowite wewnętrzne odbicie).

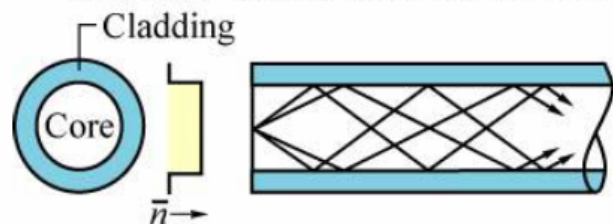
Rodzaje włókien optycznych (światłowodów)-podział ze względu na rozkład współczynnika załamania:

- skokowy – nagła zmiana współczynnika załamania między rdzeniem i płaszczem; sygnał wyjściowy będzie szerszy niż sygnał wejściowy (promienie światła przechodzące przez taki światłowód pokonują różne drogi optyczne)
- gradientowy – uniknięcie poszerzenia impulsu; droga optyczna jest helikalna a nie „zygzakowata” jak w światłowodach skokowych
 - dodaje się tlenek boru lub germanu do szkła kwarcowego, tak że współczynnik załamania w całym przekroju zmienia się stopniowo w sposób paraboliczny; większa prędkość rozchodzenia się światła w części peryferyjnej, w porównaniu do centrum
- jednomodowe – większość światła rozchodzi się równoległe do osi światłowodu z małym zakłóceniem impulsu świetlnego. Wykorzystywane są w transmisji światła na dalekie odległości.

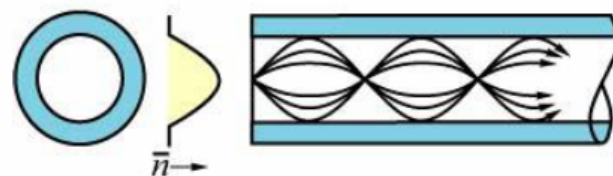


Rodzaje włókien optycznych (światłowodów)-podział ze względu na rozkład współczynnika załamania:

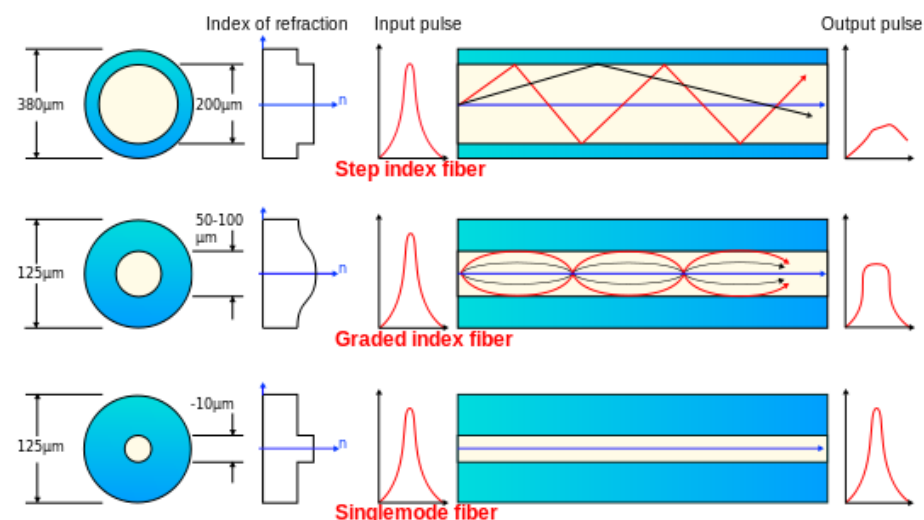
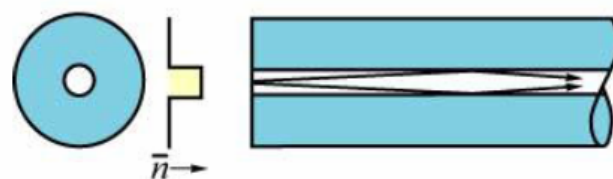
(a) **Step-index multimode fiber**
Simple coupling; large modal dispersion



(b) **Parabolically-graded-index multimode**
Simple coupling; difficult fabrication; low



(c) **Step-index single-mode fiber**
Difficult coupling; difficult fabrication; low



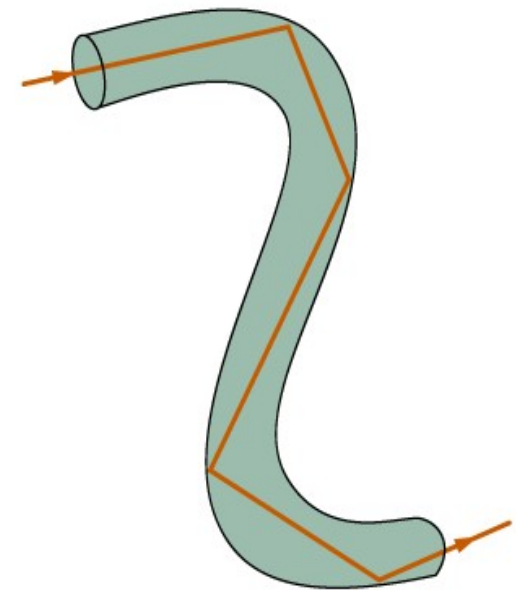
Właściwości optyczne światłowodów:

- dobór materiałów na wykonanie rdzenia i płaszczu następuje nie tylko poprzez dopasowanie współczynnika załamania, lecz także w oparciu o łatwość procesu wytwarzania światłowodu, straty świetlne, wytrzymałość mechaniczną oraz właściwości dyspersyjne. Jednak to gęstość i współczynnik załamania są parametrami najbardziej branymi pod uwagę.

- Wysokiej czystości szkło kwarcowe (średnica włókien w zakresie 5-100 μm)
- staranność wykonania światłowodów (wolne od skaz)

•Zalety:

- Relatywnie niskie straty optyczne
- dobra izolacja od wpływów środowiska zewnętrznego
- wbudowany gradient refrakcji



Rodzaje włókien optycznych (światłowodów)-materiał:

- szklane
- Plastikowe
- półprzewodnikowe

Zastosowania

- Generacja prom. e-m – lasery światłowodowe
- wzmacnianie prom. e-m – wzmacniacze światłowodowe Ramana
- pasywne i aktywne przetwarzanie prom e-m – światłowody instrumentalne i czujnikowe
- transmisja sygnałów na duże odległości – ultraniskostratne jednomodowe światłowody transmisyjne
- dystrybucja – światłowody wielomodowe
- detekcja prom e-m – włókna optyczne scyntylacyjne
- obrazowody

ELEMENTY GRADIENTOWE

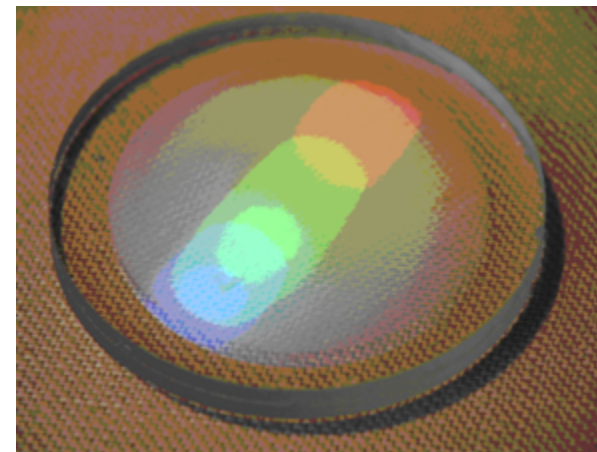
- Jednozmienny vs. wielozmienny
 - Jednozmienny - zależne od jednej współrzędnej przestrzennej r , φ , z takie jak osiowy, radialny, sferyczny, a oprócz tego monotoniczny, niemonotoniczny, okresowy i nieuporządkowany
 - Wielozmienny – połączenie gradientów jednozmiennych
- Periodyczny gradient refrakcji – szklane braggowskie włókno optyczne
- Radialny układ gradientu refrakcji – refrakcja zmienia się wyłącznie jako funkcja odległości od osi optycznej elementu $n(r)$, mierzona w płaszczyźnie prostopadłej do tej osi, najczęściej dostępne w postaci szklanych soczewek GRIN
- Mogą być stosowane jako układy takich elementów w postaci matryc i zastępować objętościowe szklane elementy optyczne np. Soczewki Fresnela; zastosowania w technikach kserograficznych, skanerowych i fotograficznych.
- Osiowy gradient refrakcji – refrakcja monotonicznie zmienna wzdłuż ich osi optycznej; stosowane jako zamienniki standardowej optyki asferycznej w systemach monochromatorowych oraz w kolimatorach dla wiązek promieniowania laserowego.
- Sferyczny gradient refrakcji – symetria refrakcji względem punktu, trudne do zrealizowania w 3D; realizacja 2D – dwuwymiarowa szklana matryca mikrosoczewek z półsferycznym gradientem refrakcji tworzących mikroobiektyw gradientowy,

ELEMENTY GRADIENTOWE

- Wytwarzanie:
 - Wymiana jonowa
 - ograniczenia: średnica pręta szklanego z powodu małej wartości współczynnika dyfuzji jonów modyfikatorów refrakcji w tym procesie, dla prętów o większej średnicy znacznie wzrasta czas procesu.
 - Impregnacja jonowa (możliwa na większych średnicach >20mm)
 - Impregnacja molekularna
 - Osadzanie powłok z fazy ciekłej metodą zol-żel

DYFRAKCYJNE ELEMENTY OPTYCZNE (DOE)

- WAŻNE: wydajność dyfrakcyjna, maksymalny kąt ugięcia wiązki (podanie apertury numerycznej) oraz częstotliwość przestrzenna
- PMMA, CAR, KRS
- Żelatyna dwuchromianowa o odpowiednio zmodulowanym współczynniku załamania
- Fotograficzna (fotolitograficzna)
- holograficzna
- Fotoczuły żel między dwoma płytkami
- Technologia półprzewodnikowa
- elektronolitografia

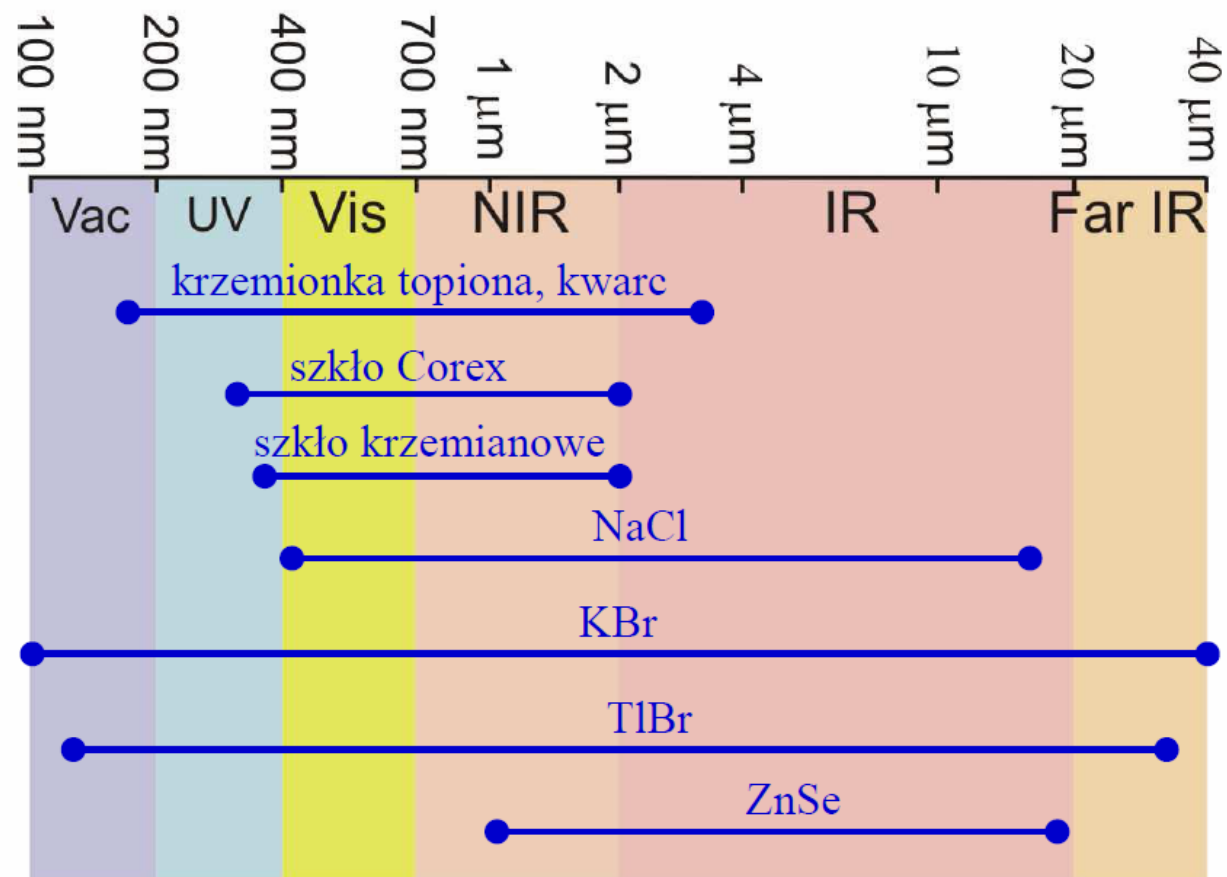


DYFRAKCYJNE ELEMENTY OPTYCZNE (DOE)

- Zastosowania
 - Monochromatory
 - Spektrofotometry
 - Lasery
 - Urządzenia gdzie należy wyodrębnić poszczególne długości fali
 - Wiele innych instrumentów optycznych
 - CD,DVD

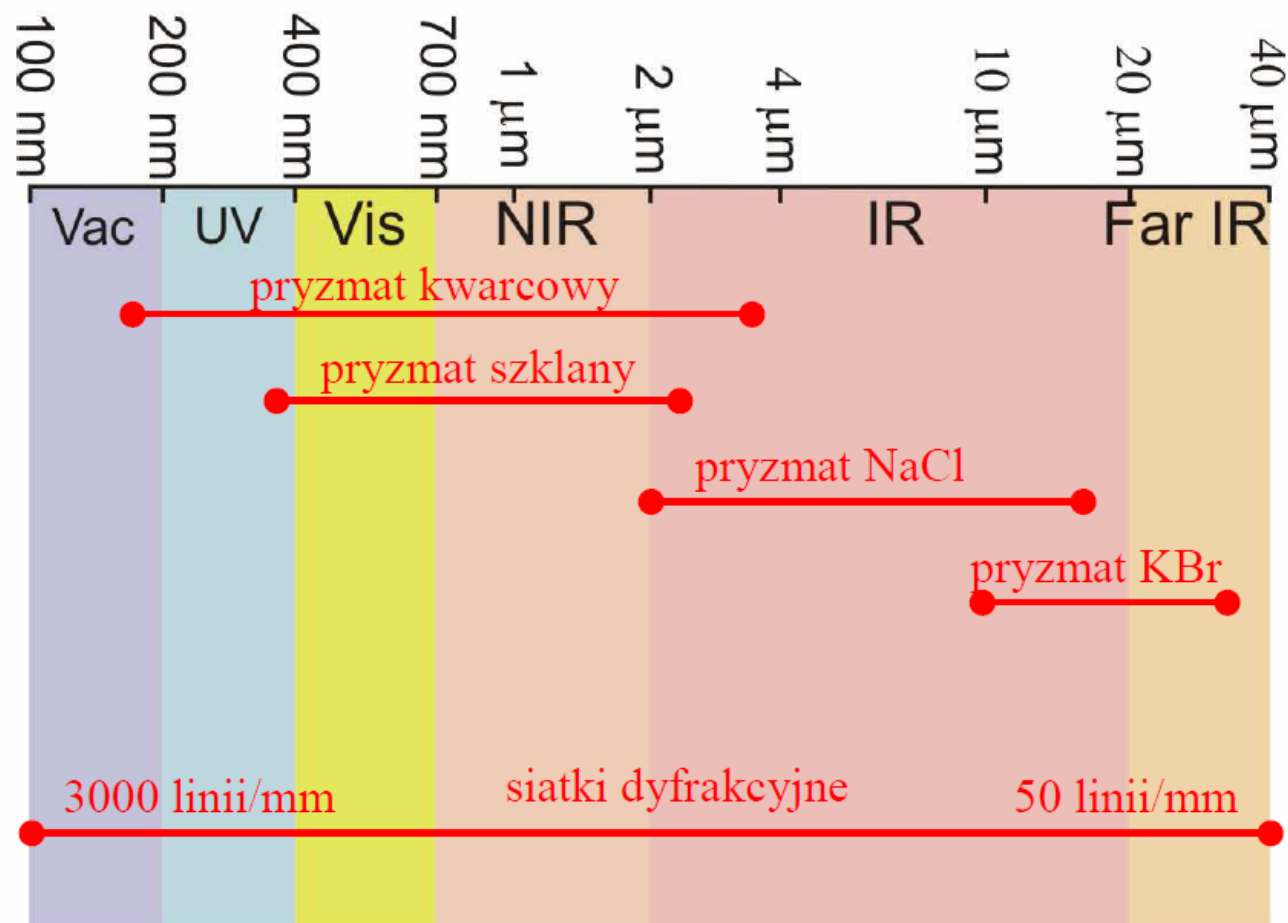
Materiały używane w poszczególnych zakresach promieniowania EM

Wytwarzanie komórek, okienek, soczewek, pryzmatów



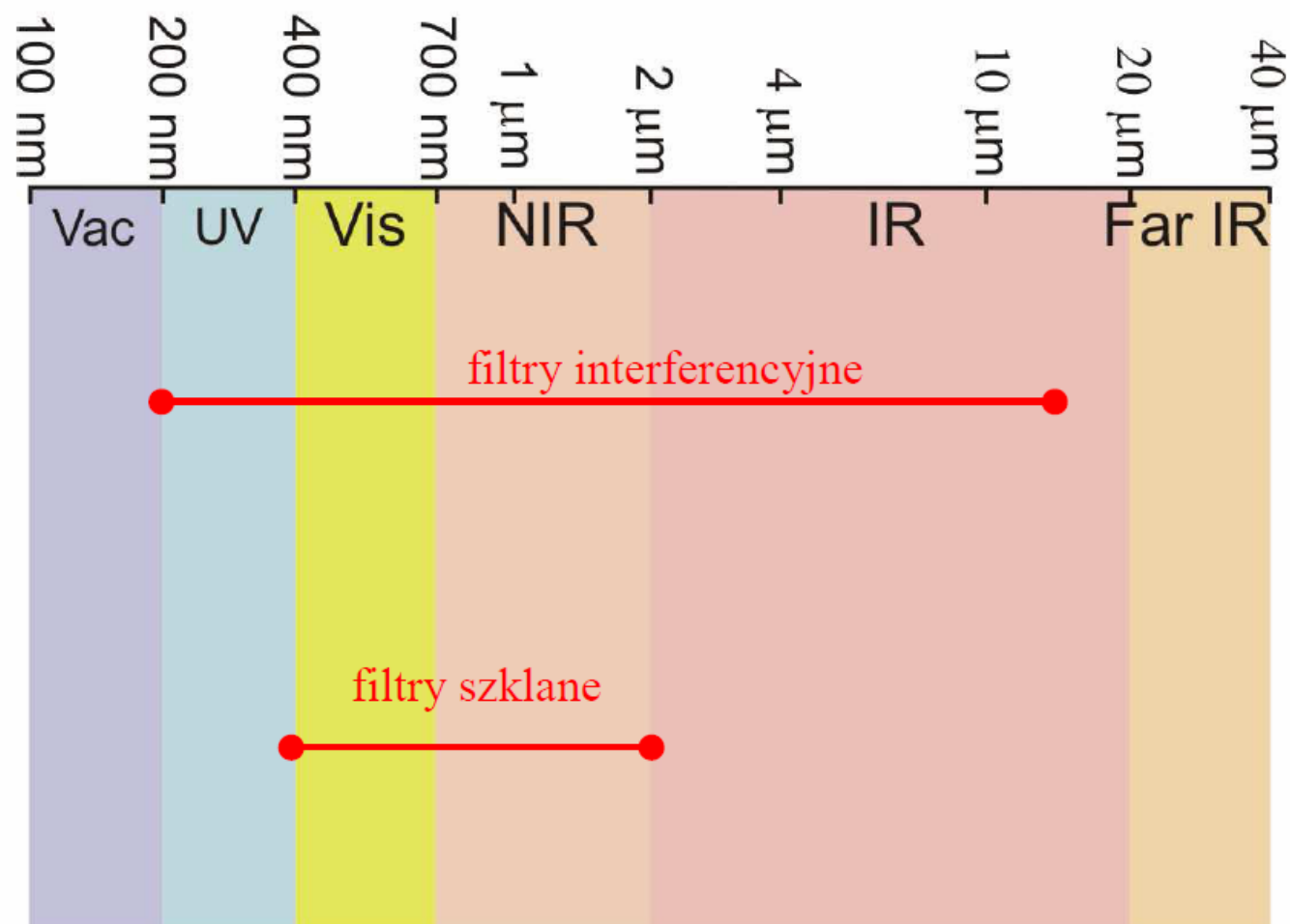
Materiały używane w poszczególnych zakresach promieniowania EM

Elementy rozszczepiające światło



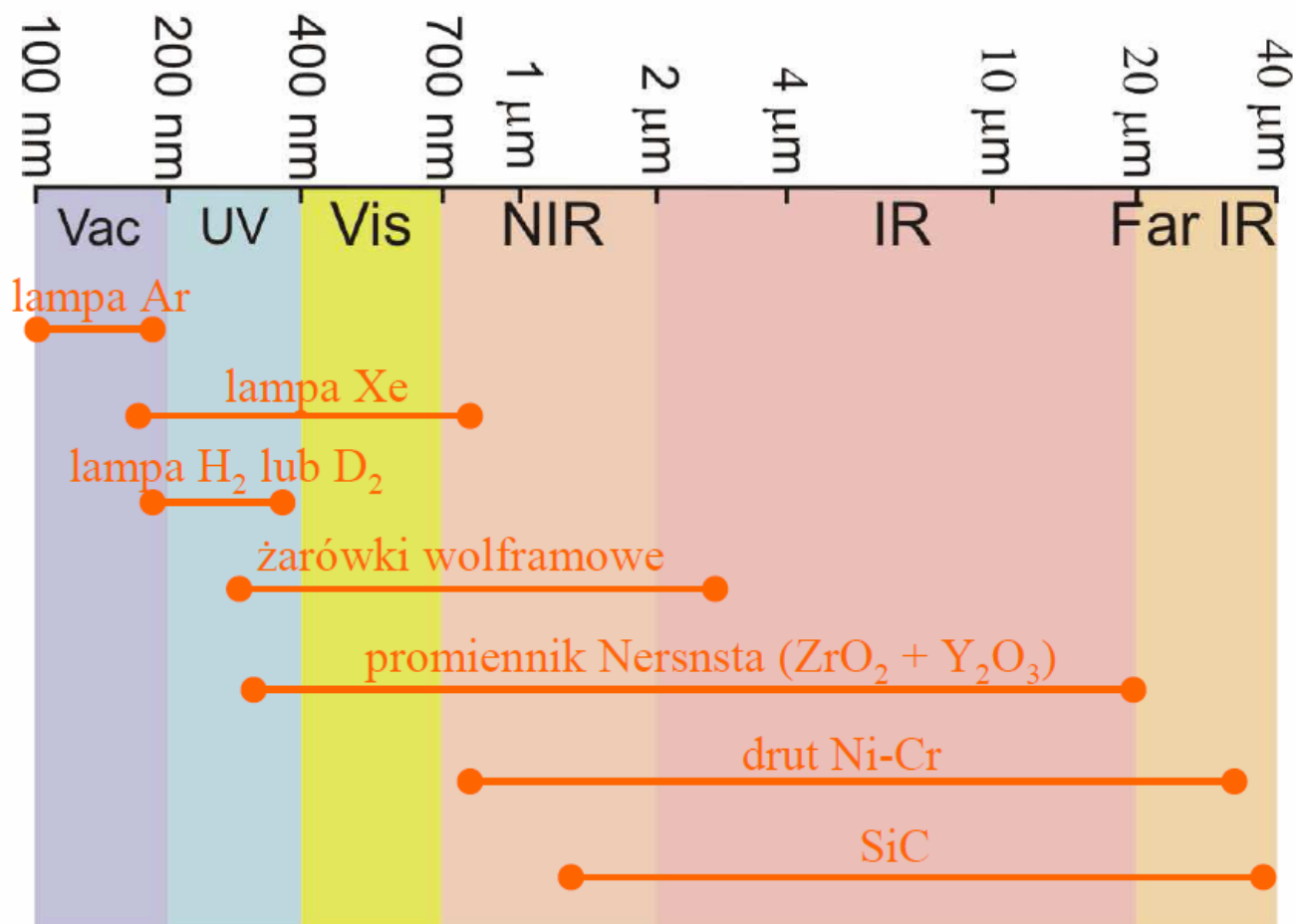
Materiały używane w poszczególnych zakresach promieniowania EM

Filtry



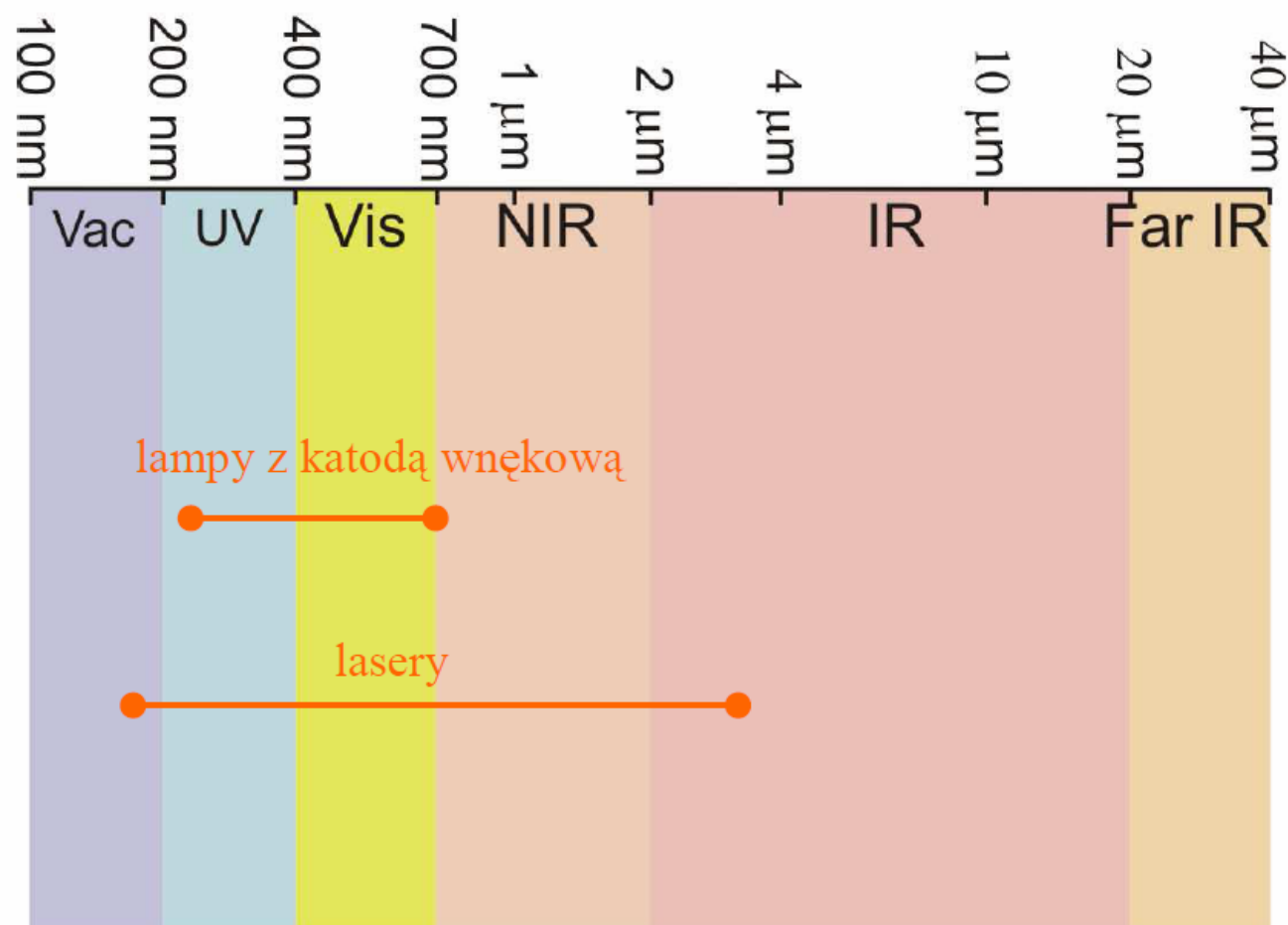
Materiały używane w poszczególnych zakresach promieniowania EM

Źródła promieniowania o widmie ciągłym



Materiały używane w poszczególnych zakresach promieniowania EM

Źródła promieniowania o widmie dyskretnym



Materiały używane w poszczególnych zakresach promieniowania EM

Detektory

