

Materiałoznawstwo optyczne

-wytwarzanie, właściwości, badania materiałów, z których wykonane są elementy optyczne.

Podział spektralny materiałów optycznych:

zakres promieniowania świetlnego:

- od ultrafioletu $\lambda=0.01\mu\text{m}$
- do dalekiej podczerwieni $\lambda=100\mu\text{m}$
- przez obszar widzialny $\lambda=0.38\div0.78\mu\text{m}$

podobnie mat. opt.

- ultrafiolet „powietrzny” (promieniowanie nie jest wyraźnie absorbowane przez atmosferę),
- ultrafiolet daleki (próżniowy) , sięgający do zakresu promieniowania rentgenowskiego (elementy ukł. rentgenowskich mogą być wykonywane z mat. opt. i za pomocą technologii optycznych),
- podczerwień :
 - bliska $\lambda=0.75\div2.5\mu\text{m}$,
 - średnia $\lambda=3\div5\mu\text{m}$,
 - daleka $\lambda=7.5\div14\mu\text{m}$

Podział strukturalny

- szkła (mat. amorficzny),
- dewitryfikatory
- kryształy
- polimery wielkocząsteczkowe
- ciekłe kryształy
- inne

Podstawowe materiały optyczne

SZKŁO

struktura bezpostaciowa amorficzna, nie wykazująca prawidłowości rozmieszczenia elementów strukturalnych w obszarach większych niż 2nm
najczęściej stosowane w tradycyjnym obszarze promieniowania i bliskiej podczerwieni

szkła tlenkowe: na bazie SiO_2 , tlenkach ołowiu, baru boru, sodu i potasu. Wyjątkowe szkło: szkło kwarcowe (czyste SiO_2) (nie mylić z kwarcem - kryształem): dobre właściwości mechaniczne, chemiczne, względnie mały wsp. rozszerzalności termicznej i szeroki zakres przepuszczania od ultrafioletu do progu II okna atmosferycznego.

- szkła filtrujące
- szkła laserowe
- szkła odporne na promieniowanie jonizujące (tzw. szkła serii 100)
- fotochromowe
- inne

szkła chalcogenkowe: na bazie (S, Se, Te)- materiał szklotwórczy w obecności modyfikatorów (Se, Si, As, Sb, P)

- średnia i daleka podczerwień
- najczęściej stosowane As_2S_3 i kompozycje Ge-As-Se

szkła fluorowcowe (halidy): głównie BeF_2 i inne z F; BeF_2 - ważny materiał laserowy o małym wsp. zał. Wada- toksyczność berylu, mała odporność na wodę i skłonność do krystalizacji. Zastosowanie również w światłowodach na podczerwień (0.001 dB/m dla $\lambda=3.4\mu\text{m}$)

KRYSTAŁY

- najdawniej stosowany mat. opt.
- mono- lub polikrystały o znacznych niekiedy rozmiarach
- zastosowania:
 - mat. dwójłomne
 - mat. elektrooptyczne
 - mat. magnetooptyczne
 - mat. akustooptyczne
 - polaryzatory
 - płytki fazowe
 - modulatory
 - deflektory

CIEKŁE KRYSZTAŁY

- ciała, w których występuje uporządkowanie molekuł w stanie ciekłym, w mezofazie między fazą stałą ciała krystalicznego a fazą cieczy izotropowej
- trzy podstawowe struktury:
 - nematyczna
 - smektyczna
 - cholesteryczna
- dwójłomność, aktywność optyczna kilka razy większa niż w kryształach, dichroizm kołowy
- przepuszczalność, rozproszenie i odbicie światła zależne od stanu fazowego i struktury
- sterowanie własnościami:
 - termiczne
 - elektryczne
 - magnetyczne
 - mechaniczne
 - chemiczne
- zastosowanie: głównie w systemach obrazowania optycznego (tzw. displeje)

DEWITRYFIKATORY

- szkło z częściową krystalizacją (faza amorficzna z drobnymi 50nm kryształami),
- mały wsp. rozszerzalności termicznej (efekt kompensacji)
- dla temperatur pokojowych można dostać $\alpha=0$
- większa odporność na zmiany temperatury
- większa wytrzymałość mechaniczna
- wady - zmniejszona przepuszczalność zwłaszcza w obszarze krótkofalowym
- zastosowanie: w dużych układach zwierciadlanych

CERAMIKA OPTYCZNA

- materiały polikrystaliczne formowane przez prasowanie i spiekanie substancji sproszkowanej
- mikroniejednorodności związane z drobnoziarnistością powodują przesunięcie krawędzi absorpcji w stronę fal dłuższych, wywołane rozproszaniem
- zastosowanie głównie w podczerwieni
- jednorodność mechaniczna, termiczna i optyczna lepsza, ale mniejsza odporność chemiczna
- możliwość formowania gotowych elementów optycznych
- pierwsze katalogowe materiały: IRTRAN 1-6

TWORZYWA SZTUCZNE

- polimery nazywane też szklami organicznymi
- parametry optyczne porównywalne z typowymi mat. opt.
- reprezentanci:
 - polimetakrylan metylu
 - polistyren
 - żywica poliwęglanowa
- łatwa formowalność gotowych wyrobów
- zastosowanie w seryjnej produkcji elementów średniej klasy oraz elementów o skomplikowanych kształtach (np.asfery, szkła okularowe)

INNE

- światłowody i kable światłowodowe
- materiały do wytwarzania elementów dyfrakcyjnych
- materiały do wykonywania cienkich warstw, filtrów interferencyjnych i przeciwoodbiciowych
- polaroidy
- kleje
- materiały oftalmiczne

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW OPTYCZNYCH

Właściwości optyczne:

- wsp. załamania
 - dyspersja
 - dwójłomność naturalna
 - dynamiczne zmiany wsp. zał. wywołane czynnikami mechanicznymi, termicznymi, wpływem pól elektrycznych i magnetycznych, akustycznych
- wsp. odbicia
- wsp. transmisji
- absorpcja
- charakterystyki spektralne
- luminescencja i efekty radiacyjne
- efekt fotochromowy

Właściwości mechaniczne:

- twardość
- moduł sprężystości
- kruchość

Właściwości termiczne:

- wsp. rozszerzalności liniowej
- odporność na niskie i wysokie temperatury
- przewodność cieplna
- temperatura mięknięcia i przemiany
- temperatura topnienia

Właściwości elektryczne:

- przenikalność elektryczna
- przewodność
- odporność na przebicie

Właściwości chemiczne:

- odporność na działanie roztworów kwaśnych, zasadowych
- odporność na działanie atmosfery, wody (np. rozpuszczalność w wodzie)
- toksyczność

KRYTERIA WYBORU MATERIAŁÓW PRZY KONSTRUKCJI UKŁADÓW OPTYCZNYCH

Trzy grupy właściwości:

- optyczne
- pozaoptyczne (montaż, justowanie, użytkowanie, itp.)
- ekonomiczno-handlowe (dostępność, wymiary handlowe, cena, termin dostawy)

Kryteria optyczne:

- charakterystyki spektralne (przepuszczania i odbicia)
- położenie krawędzi absorpcji
- minimalna wartość wsp. transmisji
- dopuszczalna modyfikacja charakterystyki spektralnej za pomocą czynników zewnętrznych
- dla materiałów przeznaczonych poza obszar widzialny: dobrze by było, aby charakteryzował się przepuszczalnością w obszarze widzialnym, ze względu na możliwość justowania i montażu za pomocą uniwersalnych urządzeń pomiarowo-kontrolnych
- ewentualność korekty właściwości transmisyjnych za pomocą powłok cienkowarstwowych
- charakterystyki dyspersyjne
- wsp. zał. w obszarze roboczym
- dopuszczalna zmiana wsp. zał. pod wpływem czynników zewnętrznych, a także w czasie procesu technologicznego wykonywania elementu optycznego

Kryteria pozaoptyczne:

- twardość, ścieralność
- sztywność, lekkość
- kruchość
- właściwości termiczne
- właściwości obróbcze materiału
- właściwości materiału przy współpracy z materiałami powłok cienkowarstwowych
- łatwość łączenia elementów optycznych ze sobą i w oprawach

Współczynnik załamania

- właściwość materiału optycznego wynikająca z jego składu chemicznego, gęstości, budowy strukturalnej, określonych stanów elektronowych opisywanych polaryzowalnością; ujawnia się pod wpływem pola elektromagnetycznego przenikającego przez ośrodek optyczny
- zależy od długości fali światła i w zakresie przepuszczalności maleje ze wzrostem długości fali; zakres ten ograniczony jest obszarami częstotliwości światła, dla których absorpcja gwałtownie rośnie w związku z rezonansowymi częstotliwościami własnymi przejść elektronowych (po krótkiej stronie) lub drgań sieci krystalicznej (po stronie długofalowej)

Definicja

$$n=c/v$$

$$n_{21}=n_2/n_1$$

Związek współczynnika załamania z własnościami materii

Model Lorentza:

- Elektrony walencyjne a światło (fala EM)
- Fala EM → polaryzacja ośrodka (efekt zmiany położenia elektronu względem jądra atomu; elektron wraz z jądrem tworzy oscylujący dipol, który drga wokół położenia równowagi)
- Częstotliwość drgań dipola i fali EM jest taka sama, ale występuje między nimi opóźnienie fazowe
- Opóźnienie to powoduje spowolnienie rozprzestrzeniania się fali EM
- Polaryzacja indukowana $\mathbf{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\mathbf{E}$
- Trzy typy polaryzowalności
 - dipolowa
 - jonowa
 - elektronowa

- wielkość charakterystyczna dla każdego dipola

współczynnik polaryzowalności α : $\mathbf{P}=\alpha\mathbf{E}$

- znajomość α_i poszczególnych zbiorów N_i atomów tworzących modelowy ośrodek optyczny pozwala obliczyć przenikalność dielektryczną ε
- wzór Clausiusa-Mosottiego

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \sum_i N_i \alpha_i$$

- wzór Lorentza-Lorenza

$$n = \frac{1 + 2Y}{1 - Y} \quad Y = \frac{N_A \alpha}{3V_m}$$

Dyspersja współczynnika załamania

Model Lorentza-Lorenza

częstotliwość światła ν a częstotliwość ν_0 drgań własnych elektronów

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = \frac{1}{3\epsilon_0} \sum_i N_i \alpha_i = \frac{e^2}{12\pi^2 m \epsilon_0} \sum_i \frac{N_i}{\nu_i^2 - \nu^2}$$

wzór Sellmeyera dla N oscylatorów w jednostce objętości drgających z jedną częstotliwością (tylko dla ośrodków przezroczystych, dielektrycznych, nieabsorpcyjnych)

$$n^2 = 1 + \frac{C}{\nu_0^2 - \nu^2}$$

Wzory dyspersyjne

- równanie Cauchy'ego

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

- równanie Sellemiera

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$$

- równanie Herzbergera

$$n = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4; \quad L = \frac{1}{\lambda^2 - 0.028}$$

- wzór katalogowy firmy Schott

$$n^2 = A_0 + A_1 \lambda^2 + \frac{A_2}{\lambda^2} + \frac{A_3}{\lambda^4} + \frac{A_4}{\lambda^6} + \frac{A_5}{\lambda^8}$$

Współczynnik dyspersji

- przyjęto, że będzie wyznaczany dla określonych długości fal
- długości fal emitowanych przez źródła promieniowania dające widmo dyskretne (pary metali, gazy, itp.)
- indeksy: oznaczenia literowe linii widmowych Fraunhofera charakterystycznych pierwiastków
- podstawowa linia: żółta linia d sodu, potem żółta linia d helu
- wartości graniczne: jako skrajne linie – linie F i C
- obecnie:
 - linia podstawowa – linia e
 - linie graniczne – linie F' i C'
 - (wynika to z lepszej zgodności z krzywą czułości widmowej ludzkiego oka)

Współczynnik dyspersji

$$\nu_2 = \frac{n_{\lambda_2} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3}}$$

Dla obszaru widzialnego - liczba Abbego

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad \nu_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$$

Bardzo przydatne przy konstrukcji układów optycznych

$$\frac{D_1}{\nu_1} + \frac{D_2}{\nu_2} = 0$$

Przepuszczalność światła:

$$E = E_0 e^{-\kappa \omega z} e^{-i\omega(t - n \frac{z}{c})} \quad \tilde{n} = n + i\kappa$$

κ - wsp. ekstynkcji,

prościej: $E = E_0 e^{-\kappa \omega z} e^{i(\omega t - kz)}$

natężenie światła

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2n\kappa\omega z}{c}\right)$$

wsp. pochłaniania α $\alpha = \frac{2n\kappa\omega}{c}$

zatem

$$I = I_0 \exp(-\alpha z)$$

pochłanianie nie zależy od intensywności światła, co jest słuszne dla szerokiego zakresu spektralnego i relatywnie małych gęstości energii

absorbancja A:

$$A = \frac{1}{z} \log_{10} \frac{I_0}{I(z)}$$

wsp. przepuszczania

• τ_λ - stosunek natężenia światła po przejściu przez ośrodek do natężenia światła padającego (straty we wnętrzu materiału oraz fresnelowskie odbicia na granicach ośrodka)

• $\tau_{i\lambda}$ - współczynnik przepuszczania wewnętrznego

przykład - płytka o grubości z : $\tau = \frac{I}{I_0} = (1 - \rho_p)^2 \exp(-\alpha z) = (1 - \rho_p)^2 \tau_i$

gęstość optyczna

$$D = \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

tłumienność A

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_i} \right) \text{ [dB/km]}$$

katalogowe szkła : 500-1000dB/km, szkło kwarcowe do światłowodów - mniej niż 1dB/km.
0.2dB/km oznacza osłabienie sygnału wejściowego o połowę na długości 15km

mechanizmy strat:

- w obszarze krótkofalowym: elektronowe przejścia międzypasmowe
- w obszarze przepuszczania: absorpcja wynikająca z przejść elektronowych nie w pełni obsadzonych powłok wewnętrznych w atomach, absorpcja na jonach OH⁻ związana z rezonansowymi częstotliwościami drgań cząsteczek wody, rozproszenie Rayleigha na fluktuacjach gęstości i składu chemicznego ośrodka w przypadku gdy zaburzenie ma wymiar mniejszy niż λ , rozproszenie Mie na większych cząstkach
- w obszarze długofalowym: absorpcja wywołana oddziaływaniem promieniowania z termicznie wzbudzonymi oscylacyjnymi modami sieci strukturalnej, prowadząca do powstania fononów

Nieoptyczne własności mat. opt.

właściwości mechaniczne

twardość :

- skala Mohsa: odporność na zarysowanie porównywana z odpowiednią odpornością jednego z 10 minerałów ułożonych w porządku wzrastającej twardości od 1 (talk) do 10 (diament)
- skala Knoop : stosunek siły do powierzchni odcisku diamentowej piramidki w kształcie ostrosłupa o podstawie rombu, podawana w kG/mm^2 , przykład zapisu - twardość 250 przy użytej sile pomiarowej 0.98N i czasie trwania próby 20s: 250 HK 0.1/20; HK mniejsze niż 100 - b. miękkie, trudne do polerowania, większe niż 750- zdecydowanie twarde
- metoda Martensa: siła potrzebna do uzyskania rysy o szerokości $10\mu\text{m}$ wykonywanej diamentowym stożkiem o określonych rozmiarach; symbol H_r
- porównawcze metody: stosunek objętości zeszlifowanego szkła odniesienia do objętości szkła badanego

sprężystość:

dla materiałów izotropowych

- moduł Younga E $E = \frac{\sigma}{\gamma_w}$

- moduł sprężystości Kirchhoffa G $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

- współczynnik Poissona ν : $\nu = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$

gdzie: σ - naprężenie wzdłużne, γ_w - odkształcenie wzdłużne, γ' - odkształcenie poprzeczne
E w szklach optycznych 40-140GPa

dla materiałów anizotropowych: tensory

kruchość, łupliwość: zdolność kryształów do pękania pod wpływem uderzenia lub nacisku na wzdłuż płaszczyzn łupliwości, w mineralogii: łupliwość doskonała (NaCl), dokładna, wyraźna (kwarc), jednopłaszczyznowa (mika), wielopłaszczyznowa (np. kostkowa NaCl); równoległe do płaszczyzn łupliwości leży kierunek najmniejszej twardości; miara - naprężenie potrzebne do powiększenia pęknięcia w odniesieniu do MgF_2 - Al_2O_3 (3) diament (2), Si (0.95), Ge 0.66) CaF_2 (0.5)

właściwości termiczne

rozszerzalność cieplna

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \quad \alpha = A + BT + CT^2$$

istotne znaczenie przy konstrukcji układów pracujących w zmiennych warunkach atmosferycznych

przewodność cieplna:

- jednostka: W/m²K

szkło o wyższej przewodności - bardziej wytrzymałe na nagłe zmiany temperatury, mała przewodność cieplna- zdolność do hartowania szkła (naprężenia termiczne)

znaczenie w procesie produkcji szkła

odporność termiczna: największa różnica temperatur, jaką może wytrzymać przedmiot bez pękania