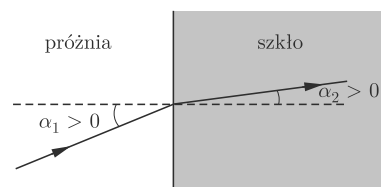


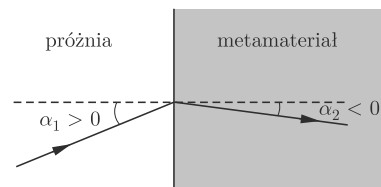
Ujemny współczynnik załamania

Grzegorz DERFEL*

*Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki



Rys. 1



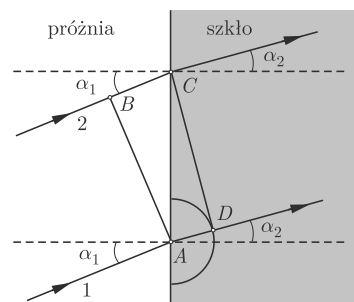
Rys. 2

Światło dochodzące do granicy oddzielającej dwa ośrodki częściowo odbija się od niej, a częściowo przechodzi przez nią, zmieniając kierunek, co określamy mianem załamania. Najprostszy przypadek załamania ma miejsce, gdy promień światła pada z próżni na powierzchnię ośrodka izotropowego, np. szkła. Zjawisko to opisane jest prawem załamania Snella: promienie padający i załamany oraz prosta prostopadła do powierzchni (zwana normalną) leżą w jednej płaszczyźnie (zwanej płaszczyzną padania), a stosunek sinusa kąta padania α_1 do sinusa kąta załamania α_2 jest stały (rys. 1). (Na wszystkich rysunkach pominięto promienie odbite.) Kąty padania i załamania mierzone są między normalną a odpowiednim promieniem. Danemu kątowi można przypisać znak, np. dodatni, jeśli dla pokrycia się promienia z normalną trzeba ten promień obrócić zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, a ujemny, gdy w tym celu konieczny jest obrót w przeciwnym kierunku. Jeśli do ośrodka materialnego światło przechodzi z próżni, to stosunek sinusów nosi nazwę bezwzględnego współczynnika załamania tego ośrodka i bywa oznaczany symbolem n . Zwróćmy uwagę, że gdy promienie padający i załamany biegną po przeciwnych stronach normalnej, to kąty padania i załamania mają jednakowe znaki i współczynnik załamania jest dodatni. Wartość bezwzględna współczynnika załamania jest zawsze równa stosunkowi prędkości światła c w próżni, do prędkości światła w ośrodku v , $|n| = c/v$. Ponieważ prędkość światła w ośrodkach materialnych jest mniejsza niż prędkość światła w próżni, to ich współczynniki załamania mają wartość większą od 1.

Dopuszczymy jednak możliwość załamania rządzonego ujemnym współczynnikiem. Koncepcja takiego zjawiska została przeanalizowana teoretycznie w 1967 r. przez rosyjskiego fizyka Wiktora Wiesielago. Kąty padania i załamania miałyby wtedy przeciwne znaki, a więc promień załamany znajdowałby się po tej samej stronie normalnej co promień padający (rys. 2). Materiały o ujemnym współczynniku, określane mianem metamateriałów, miałyby niezwykle właściwości będące źródłem zaskakujących efektów, stwarzając pole dla spekulacji na temat ich praktycznych zastosowań. Najciekawsze zjawiska można uzyskać w przypadku otrzymania cieczy o ujemnym współczynniku załamania. Obraz zanurzonej części np. ołówka, umieszczonego skośnie w szklance z taką cieczą, byłby skierowany w przeciwną stronę niż dla standardowej cieczy, a pozorny obraz ryby pływającej w stawie wypełnionym taką cieczą, mógłby być widoczny ponad powierzchnią stawu. Poza zadziwiającymi efektami wizualnymi takie materiały miałyby zastosowanie praktyczne w optyce. Tutaj wpływ ujemnego współczynnika załamania przejawia się tym, że soczewki wypukłe mogłyby rozpraszać wiązkę światła, a wklęsłe skupiać. Dodatkowo płytki równoległe mogłyby skupiać światło, co dla standardowych materiałów nie jest możliwe. Tak skonstruowana soczewka byłaby pozbawiona przeszkadzających efektów dyfrakcji, które nie pozwalają na obrazowanie przedmiotów o mniejszych wymiarach niż długości fali użytego światła. Jak dotąd otrzymano prototypy materiałów o ujemnym współczynniku załamania w zakresie mikrofal, tworząc sztuczne struktury kompozytowe o złożonej budowie.

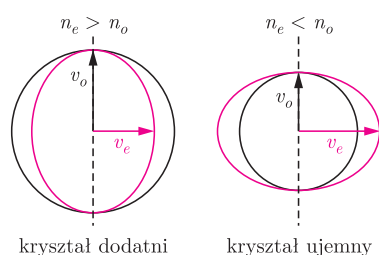
Okazuje się jednak, że załamanie światła z ujemnym współczynnikiem występuje także w ośrodkach naturalnych, jakimi są pewne kryształy istniejące w przyrodzie lub wyhodowane sztucznie. W tym artykule przyjrzymy się temu zjawisku.

Załamanie światła można uzasadnić, uwzględniając jego falową naturę i stosując obowiązującą dla fal zasadę Huygensa. Mówi ona, że każdy punkt, do którego dotarła fala, jest źródłem nowej fali o kulistym czole (w ośrodku izotropowym). Obwiednia tych wszystkich wtórnych fal tworzy czoło fali wypadkowej. W ten sposób powstaje np. płaski front falowy padającej wiązki światła. Dla wyznaczenia kierunku wiązki załamanej pomocne jest określenie wypadkowego czoła fali związanej z tą wiązką. Rysunek 3 przedstawia przydatną do tego konstrukcję opartą na zasadzie Huygensa. Uwidocznione są dwa skrajne promienie wiązki padającej z próżni na powierzchnię szkła. Załóżmy, że w pewnej chwili promień 1 dociera do powierzchni granicznej w punkcie A. Promień 2 dochodzi wtedy do punktu B. Po czasie $t = |BC|/c$ promień 2 osiąga powierzchnię graniczną, po czym cała wiązka rozchodzi się już w szkło. Punkt A jest źródłem fali, która rozchodzi się z prędkością $v = c/n$ jako wtórna fala kulista i po czasie t dociera do miejsc odległych o vt od punktu A. Prosta wystawiona z punktu C i styczna do półkuli w punkcie D jest obwiednią wszystkich fal kulistych wychodzących ze wszystkich punktów odcinka AC i stanowi czoło CD fali załamanej. Odcinek AD wytycza kierunek wiązki załamanej. Zauważmy, że jest on prostopadły do czoła fali wypadkowej.



Rys. 3. Wyznaczając sinusy kątów α_1 i α_2 z trójkątów ABC i ADC, można łatwo wyprowadzić prawo Snella.

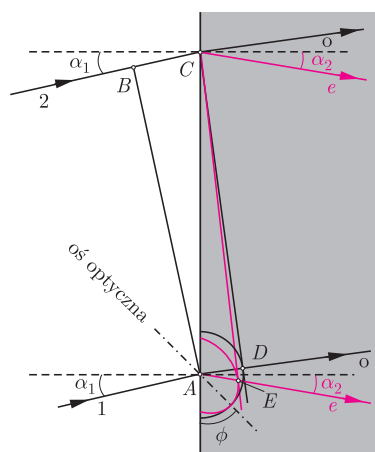
Opisany przypadek jest mało skomplikowany, a to dzięki temu, że po załamaniu światło rozchodzi się w ośrodku izotropowym, w którym żaden kierunek nie jest wyróżniony. Inaczej przedstawia się sprawa w niektórych kryształach (a także w polimerach i ciekłych kryształach), których właściwości fizyczne zależą od kierunku. Z punktu widzenia optyki klasyfikuje się je jako ośrodki dwójłomne. Na ich powierzchniach zachodzi tzw. podwójne załamanie, bardziej złożone niż załamanie na powierzchniach ośrodków izotropowych. W wyniku podwójnego załamania promień padający rozdziela się na dwa promienie biegnące w różnych kierunkach, z różną prędkością i spolaryzowane liniowo w różnych płaszczyznach. Istnieją dwa rodzaje materiałów dwójłomnych. W tzw. ośrodkach jednoosiowych istnieje jeden szczególnie kierunek, zwany osią optyczną, wzdłuż którego oba promienie załamane mają tę samą prędkość. W ośrodkach dwuosiowych istnieją dwa takie kierunki. W tym artykule ograniczymy się do przedstawienia zjawiska załamania w ośrodkach jednoosiowych.



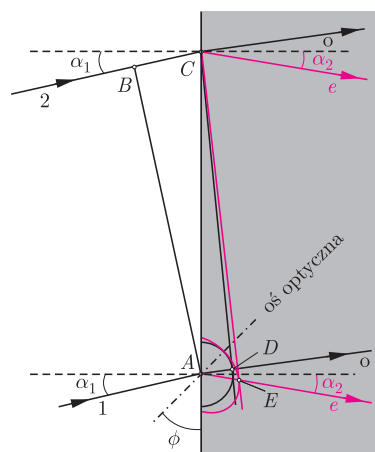
Rys. 4

Jeden z promieni załamanych, zwany zwyczajnym, podlega prawu załamania Snella. Kąt załamania określony dla niego jest stałym współczynnikiem zwanym współczynnikiem załamania promienia zwyczajnego danego ośrodka, n_o . Promień zwyczajny ma tę samą prędkość $v_o = c/n_o$ niezależnie od kierunku propagacji. Można to zilustrować kulistą powierzchnią o promieniu v_o reprezentującą tę wartość prędkości we wszystkich kierunkach, zwaną powierzchnią normalnych. Kuliste są także czoła fal wtórnych składające się na płaskie czoła fali związanej z wiązką promieni zwyczajnych.

Drugi promień, zwany nadzwyczajnym, nie spełnia prawa załamania, ponieważ stosunek sinusów nie jest stały, lecz zależy od wzajemnej orientacji promienia padającego, osi optycznej i powierzchni granicznej. Są sytuacje, w których promień nadzwyczajny nie leży w płaszczyźnie padania, a także takie, w których jego kąt załamania jest różny od zera nawet przy padaniu prostopadłym, a szczególną anomalią stanowi ujemny kąt załamania, o czym jest mowa poniżej. Prędkość promienia nadzwyczajnego ilustruje powierzchnia normalnych w kształcie elipsoidy obrotowej, której oś symetrii pokrywa się z osią optyczną. Prędkość w dowolnym kierunku określona jest długością odcinka, który wytycza dany kierunek, łączącego środek elipsoidy z punktem na elipsoidzie. Półoś równoległa do osi optycznej wyznacza wartość prędkości w kierunku osi, $v_o = c/n_o$, a półoś prostopadła – wartość w kierunku do osi prostopadłym, $v_e = c/n_e$, gdzie n_e nazywany jest współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego. Jeśli wartość n_e jest większa niż n_o , to ośrodek nazywa się optycznie dodatnim. W przeciwnym przypadku ośrodek jest optycznie ujemny. Rysunek 4 pokazuje powierzchnie normalnych w obu przypadkach.



Rys. 5



Rys. 6

Bieg obu promieni załamanych w ośrodku dwójłomnym można znaleźć, adaptując konstrukcję Huygensa dla zjawiska podwójnego załamania. Zastosujemy tę metodę do przedstawienia szczególnego, nieopisywanego w podręcznikach optyki kryształów przypadku, w którym realizuje się załamanie z ujemnym współczynnikiem.

Niech wiązka światła pada pod kątem α_1 na powierzchnię ośrodka optycznie dodatniego, którego oś optyczna leży w płaszczyźnie padania i tworzy kąt ϕ z normalną (rys. 5). Najpierw promień 1 dociera do powierzchni granicznej w punkcie A, a po czasie $t = |BC|/c$ powierzchnię tę osiąga promień 2. Z punktu A rozchodzą się dwie fale wtórne – zwyczajna i nadzwyczajna. Po czasie t wtórna fala zwyczajna osiąga leżące na półkuli punkty oddalone od A o $v_o t$, a wtórna fala nadzwyczajna dociera do punktów elipsoidy odległych od A o $v_e t$. Odtąd w kryształach rozchodzą się już dwie wiązki biegnące w różnych kierunkach. Kierunek promienia zwyczajnego można znaleźć w taki sam sposób jak w przypadku izotropowym. Jest prostopadły do wypadkowego czoła CD . Kierunek promienia nadzwyczajnego wynika z analogicznej konstrukcji. Prosta wystawiona z punktu C, styczna do elipsoidy w punkcie E, jest obwiednią fal kulistych wychodzących ze wszystkich punktów odcinka AC i stanowi czoło fali EC. Odcinek AE wytycza kierunek wiązki załamanej. Zauważmy, że tym razem kierunek ten nie jest prostopadły do czoła fali. Ponadto promień nadzwyczajny biegnie po tej samej stronie normalnej co promień padający. Oznacza to, że kąt padania i kąt załamania dla promienia nadzwyczajnego mają różne znaki. Stosunek ich sinusów jest ujemny, a więc można przyjąć, że załamaniem promienia nadzwyczajnego rządzi w tym przypadku ujemny współczynnik załamania. Na rysunku 6 zilustrowane jest to samo zjawisko występujące w kryształach optycznie ujemnych.

Załamanie z ujemnym współczynnikiem ma swoje źródło w anizotropii optycznej ośrodka. Warunkiem jego wystąpienia jest odpowiednia orientacja osi optycznej względem powierzchni załamującej. Możliwość zaistnienia tego zjawiska w zwykłych kryształach dwójłomnych została zademonstrowana (przy użyciu ujemnego optycznie kalcytu, CaCO_3 , i dodatniego optycznie wanadanu itru, YVO_4) stosunkowo niedawno, bo w roku 2003, mimo że dwójłomność kryształów znana jest od XVII wieku. Odkrycie to uzupełniło znany obraz zjawisk optycznych występujących w kryształach.