

Leszek Pękalski

*Akademia Sztuk Pięknych w Gdańsku*

## Światło spolaryzowane w praktyce (wnikliwego) fotografa

Zacznijmy od rudymetów. Światło, czyli promieniowanie elektromagnetyczne, na jakie reaguje ludzkie oko (długość fali od ok. 0,0004 mm dla fioletu do ok. 0,0007 mm dla dalekiej czerwieni — rys. 1), jest falą poprzeczną: oba wektory pola (tzn. elektryczny E i magnetyczny B) są prostopadłe do kierunku propagacji (rozchodzenia się) fali (rys. 2). W odróżnieniu od fali podłużnej, której drgania są równoległe do kierunku propagacji (np. fale dźwiękowe), wektor świetlny, który umownie identyfikuje się z wektorem elektrycznym pola, drga prostopadłe do kierunku, w jakim biegnie fala — analogicznie, jak to ma miejsce w przypadku fal na wodzie. O ile jednak drgania na wodzie zachodzą, dzięki sile ciężenia, zawsze w kierunku pionowym (zaobserwujemy np. ruch zapałki umieszczonej na powierzchni fali), w przypadku fali elektromagnetycznej każdy kierunek na płaszczyźnie prostopadłej do ruchu fali (rys. 3) jest równie dobry, zatem zwykle żaden kierunek drgań nie jest wyróżniony. Jeśli jednak zdarzy się inaczej i mamy do czynienia A) tylko z jednym kierunkiem drgań, albo gdy B) jakiś kierunek drgań dominuje nad pozostałymi, mówimy, że światło jest *spolaryzowane* — całkowicie (przypadek A) lub częściowo (B). Ze światłem spolaryzowanym mamy zresztą do czynienia znacznie częściej, niż podejrzewamy — spolaryzowane w pewnym stopniu jest światło błękitnego nieba, spolaryzowane jest światło odbite od np. szyby czy od powierzchni wody, wreszcie polaryzację światła wykorzystuje się w tak popularnych urządzeniach jak wyświetlacze ciekłokrystaliczne (LCD — liquid crystal display). We wszystkich tych wypadkach używając filtra polaryzacyjnego fotograf może stwierdzić, czy ma do czynienia ze światłem spolaryzowanym oraz sterować jego natężeniem, uzyskując specyficzne efekty. Wymieńmy najważniejsze:

1. Przyciemnianie błękitu nieba. Najsilniejszą polaryzację światła i, co za tym idzie, przyciemnienie nieba, obserwuje się w kierunku prostopadłym do Słońca (fot. 1 – 4). Jeśli Słońce mamy za plecami lub przed sobą, polaryzacja światła jest znikoma i przyciemnienie praktycznie nie występuje. Warto już w tym miejscu wspomnieć, że kierunek polaryzacji jest zawsze prostopadły do linii łączącej Słońce i kierunek obserwacji (rys. 4).
2. Intensyfikacja barw przedmiotów. Obracając filtr polaryzacyjny łatwo znajdziemy ustawienie, przy którym barwy są najżywsze, zwykle znacznie jaskrawsze niż widzia-

ne gołym okiem. Efekt ten bierze się stąd, iż filtr wygasza odbłaski na powierzchniach liści, dachówek, wody itd., które zwykle powodują rozbielenie barw i tym samym zmniejszają ich natężenie (fot. 5 – 8).

3. Wygaszanie odbić światła od powierzchni wody, szyb, werniksowanych powierzchni obrazów itd.. Nie zawsze się to udaje — filtrem polaryzacyjnym nie osłabimy refleksów na powierzchniach metalicznych, takich jak np. lustro, biżuteria, szyny kolejowe czy chromowane części maszyn. W przypadku zaś niemetali (woda, szkło, lakier, drewno, ceramika itp.) efekt wygaszenia zależy od kąta, pod jakim odbija się światło — np. dla szkła czy wody najsilniej występuje wtedy, gdy patrzymy pod kątem ok.  $30^\circ$  do powierzchni odbijającej<sup>1</sup> (rys. 5), a nie będzie go wcale, gdy światło pada na nią (i odbija się) prostopadle. Można też stwierdzić, że kierunek polaryzacji jest zawsze prostopadły do płaszczyzny odbicia (wyznaczonej przez promienie padający i odbity).
4. Barwne efekty występujące wtedy, gdy niektóre przezroczyste substancje (głównie kryształy) umieścimy w świetle spolaryzowanym i obserwujemy je przez filtr polaryzacyjny.

Aby zrozumieć istotę tych zjawisk, musimy prześledzić mechanizmy, w wyniku których ze zwykłego, niespolaryzowanego światła otrzymujemy światło o drganiach uporządkowanych przestrzennie, tzn. światło spolaryzowane.

## Polaryzacja światła

### A. Przez odbicie — prawo Brewstera

*Światło padające na granicę dzielącą dwa ośrodki przezroczyste penetruje tę granicę ulegając załamaniu zgodnie z prawem Snelliusa, ale również częściowo ulega odbiciu, w proporcji od kilku do kilkunastu procent — w zależności od kąta padania i rodzaju powierzchni odbijającej (aby te odbicia zminimalizować, stosuje się warstwy przeciwodblaskowe na powierzchniach obiektywów i filtrów).*

Rozważmy dość szczególną sytuację, gdy światło spolaryzowane w płaszczyźnie rysunku odbija się od powierzchni rozgraniczającej dwa ośrodki przezroczyste (np. powietrze i szkło) tak, że promień odbity i załamany tworzą kąt prosty (rys.). Mamy tu pewien problem. Z punktu O wychodzą dwie wiązki wzajemnie prostopadłe, kierunek drgań każdej z nich pokrywa się z kierunkiem rozchodzenia się drugiej. W ten sposób obie wiązki uzyskały składową podłużną drgań, światło zaś jest **zawsze** falą poprzeczną, tzn. drgania odbywają się w kierunku ściśle prostopadłym do kierunku propagacji. Zachodzi tu oczywista sprzeczność, z którą przyroda radzi sobie w ten sposób, że... po prostu nie będzie fali odbitej! Jeśli natomiast światło jest spolaryzowane tak, że drgania odbywają się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku (która pokrywa się z płaszczyzną odbicia), powyższa sprzeczność nie występuje — obie wiązki, przechodząca i odbita, mają ten sam kierunek drgań i światło może się odbić bez przeszkód. W ogólnym wypadku, gdy światło nie jest spolaryzowane, możemy je traktować jako superpozycję (złożenie) dwóch wiązek spolaryzowanych tak jak powyżej i podczas odbicia składowa o drganiach w płaszczyźnie rysunku zostanie wygaszona. Wniosek: dowolna fala świetlna, odbijając się od powierzch-

<sup>1</sup> Zwykle kąty mierzy się od normalnej, czyli prostopadłej do powierzchni; tu byłby to zatem kąt ok.  $60^\circ$ .

ni w taki sposób, że promień odbity i przechodzący tworzą kąt prosty, ulega całkowitej polaryzacji, przy czym kierunek polaryzacji jest **prostopadły** do płaszczyzny odbicia.

Zajmiemy się teraz wyznaczeniem kąta, pod jakim musi padać światło, by spełnić opisany warunek. Kąty  $\alpha$  padania i  $\beta$  załamania wiąże prawo Snelliusa:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} \quad (1)$$

gdzie  $n_{21}$  — współczynnik załamania światła ośrodka 2 względem ośrodka 1 (aneks..). Jednocześnie, jak widać z rysunku,  $\alpha + \beta = 90^\circ$ , więc  $\sin \beta = \cos \alpha$ . Prawo Snelliusa przybierze zatem postać:

$$\operatorname{tg} \alpha = n_{21} \quad (2)$$

Jest to tzw. *prawo Brewstera*, a kąt padania spełniający warunek (2) nazywamy *kątem Brewstera*. Dla szkła ( $n = 1,5$ ) wynosi on  $56,3^\circ$ , dla wody ( $n = 1,33$ ) około  $53^\circ$  (kąty mierzymy od normalnej, tj. prostopadłej do powierzchni).

Dociekliwy czytelnik ma prawo zapytać: a co będzie w ogólności, gdy wiązka odbita i przechodząca nie są wzajemnie prostopadłe? Wektor świetlny wiązki odbitej można wtedy rozłożyć na składowe równoległą i prostopadłą do promienia załamanego (rys.). Składowa równoległa, tak jak poprzednio, nie ma racji bytu, ale składowa prostopadła nie powoduje sprzeczności, bo zgadza się z kierunkiem drgań wiązki odbitej. Zatem wiązka spolaryzowana w płaszczyźnie odbicia tym razem się odbije, ale osłabiona; można wykazać, że ostatecznie stopień polaryzacji (czyli wygaszenia składowej równoległej w stosunku do prostopadłej) jest równy  $\sin(\alpha + \beta)$ . Mamy więc tu do czynienia tylko z polaryzacją *częściową*. W szczególności, gdy światło pada pod kątem Brewstera ( $\alpha + \beta = 90^\circ$ ), polaryzacja jest całkowita ( $\sin 90^\circ = 1$ ), zaś gdy pada prostopadle do powierzchni (i odbija się wstecz;  $\alpha = \beta = 0$ ), stopień polaryzacji wynosi zero ( $\sin 0^\circ = 0$ ) — w takim przypadku nie można w ogóle wygasić odbłasków.

Dotąd mówiliśmy o sytuacji, w której istnieją obie wiązki, przechodząca i odbita. Co jednak stanie się w sytuacji, gdy brak wiązki przechodzącej? — a dotyczy to wszystkich metali (dokładniej — przewodników elektryczności), takich jak np. lustro (szkło podlane warstwą srebra), czy chromowany zderzak samochodu. Pole elektryczne nie wnika do wnętrza przewodnika, a światło jest przecież falą elektromagnetyczną, zatem w całości musi się odbić (dlatego metale błyszczą). Jeśli więc nie ma wiązki przechodzącej, to nie ma również kłopotu opisanego powyżej i odbije się zarówno fala o drganiach równoległych, jak i prostopadłych do płaszczyzny odbicia. Zatem: **światło, odbijając się od powierzchni metalicznych, nie ulega polaryzacji.**

Podsumujmy:

Światło odbijając się od powierzchni niemetalicznych (niekoniecznie przezroczystych) ulega polaryzacji: całkowitej, gdy kąt odbicia jest równy kątowi Brewstera lub częściowej — w każdym innym wypadku. Kierunek polaryzacji jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez promienie padający i odbity.

Przy odbiciu od powierzchni metalicznych światło nie ulega polaryzacji.

Gdy używamy filtra polaryzacyjnego do wygaszania refleksów na powierzchniach błyszczących, trzeba pamiętać, że najsilniejszy efekt uzyskamy wtedy, gdy światło odbija się pod kątem Brewstera — obiektywy szerokokątne mogą tu sprawić pewien kłopot bo

stopień polaryzacji silnie zależy od kąta odbicia (fot.). Nadto — często może się nie udać wygaszenie odbłasków na dwóch lub więcej powierzchniach jednocześnie, jeśli ustawione są wzajemnie pod kątem, ponieważ pod różnym kątem odbijają światło i tym samym kierunki polaryzacji mogą się różnić (fot.)<sup>2</sup>.

Analogicznie można wyjaśnić fakt, że światło, jakie dociera do nas ze strony pogodnego nieba, jest spolaryzowane — najsilniej w kierunku prostopadłym do Słońca. Wytłumaczenie jest następujące:

Niebo świeci rozproszonym światłem słonecznym. Jak można wykazać, spośród wszystkich barw składających się na światło białe najsilniej rozpraszają się fale krótkie — fioletowe i niebieskie. Właśnie to niebieskie, rozproszone światło nadaje barwę niebu — w Kosmosie niebo jest czarne, a światło słoneczne ma wyższą temperaturę barwy, ponieważ zawiera również tę krótkofalową składową niebieską, która w atmosferze ziemskiej ulega rozproszeniu. Jednocześnie to rozproszone światło ulega polaryzacji: podobnie jak w przypadku odbicia efekt jest najsilniejszy w kierunku prostopadłym — tu do Słońca. W kierunku ze Słońcem i pod Słońce polaryzacja jest znikoma, zatem na próżno będziemy kręcić filtrem w nadziei, że przyciemni nam niebo.

Posłużmy się teraz rozumowaniem bardzo podobnym do użytego poprzednio. Rozważmy światło biegnące od Słońca do wybranego punktu O na niebie widocznego pod kątem prostym do Słońca, rozpraszające się tam i trafiające do naszego oka (rys.). Jeśli jest ono spolaryzowane prostopadle do płaszczyzny odbicia, drgania fali padającej i rozproszonej są zgodne. Natomiast w przypadku polaryzacji równoległej do tej płaszczyzny fala rozproszona w punkcie O drgałaby zgodnie z kierunkiem drgań fali pierwotnej — biegnącej od Słońca, czyli byłaby falą *podłużną*, co, jak wiemy, w przypadku promieniowania elektromagnetycznego jest niemożliwe. Wniosek — punkt O **nie może** być źródłem światła o polaryzacji równoległej do osi łączącej go ze Słońcem; dociera w tym kierunku jedynie światło o drganiach prostopadłych, czyli spolaryzowane. Jeśli patrzymy w inną stronę niż pod kątem prostym do Słońca, również zaobserwujemy polaryzację, ale w stopniu zmniejszającym się w miarę zbliżania się kierunku obserwacji do osi: ze Słońcem — pod Słońce. Także i tu uważać trzeba szczególnie, gdy używamy obiektywu szerokokątnego, ponieważ stopień polaryzacji — a tym samym tonacja nieba — dość silnie zależy od kierunku (fot.).

## B. Dwójłomność optyczna

Istnieją ośrodki przezroczyste, głównie kryształy anizotropowe, w których prędkość światła, a zatem współczynnik załamania zależy od kierunku, w jakim to światło jest spolaryzowane. Jeśli z takiej substancji zrobimy np. pryzmat, wycinając go odpowiednio względem tzw. głównych osi kryształu (dokładna analiza tych zależności zaprowadziłaby nas zbyt daleko), możemy uzyskać rozdzielenie wiązki światła na dwie, załamane pod różnymi kątami i spolaryzowane względem siebie prostopadle (rys. 9). Nazywa się je odpowiednio

<sup>2</sup> Stwarza to pewne problemy np. przy reprodukcji obrazów, których nierówna powierzchnia odbija światło w różnych kierunkach, często uniemożliwiając wygaszenie powstałych „blików”. Rozwiązaniem problemu jest przysłonięcie reflektorów oświetlających obraz arkuszami folii polaryzacyjnej. Ustawiając je pod odpowiednim kątem, można zminimalizować odbłaski, a dodatkowo wygasić je przy pomocy filtra polaryzacyjnego na obiektywie. Warto na marginesie wspomnieć, że nie zawsze całkowite wygaszenie takich refleksów jest korzystne, ponieważ zamazujemy w ten sposób fakturę obrazu. Jak zawsze, uzyskanie właściwych proporcji wymaga od fotografa wyczucia i doświadczenia.

wiązką zwyczajną i nadzwyczajną. Wystarczy pozbyć się jednej z nich, by nasz kryształ działał jak polaryzator. W praktyce robi się to zwykle tak, że kryształ przecina się i skleja ponownie (np. balsamem kanadyjskim, który ma mniejszy współczynnik załamania) — pod takim kątem, by wiązka zwyczajna uległa na płaszczyźnie przecięcia całkowitemu odbiciu i następnie została pochłonięta przez poczernioną ściankę boczną kryształu. Obecnie polaryzatory takie jak Glana-Foucaulta (rys. 10) czy Nicola (rys. 11) wykorzystujące dwójłomność kryształu kalcytu (węglan wapnia  $\text{CaCO}_3$ ) są stosowane wyłącznie do celów naukowych, zaś w praktyce używa się m.in. jako filtrów polaryzacyjnych w fotografii, głównie polaryzatorów *dichroicznych*.

### C. Polaryzatory dichroiczne

Omawiając polaryzację światła na szkolnych lekcjach fizyki, nauczyciele uciekają się na ogół do następującej analogii: jeśli na sznurze przechodzącym przez szczelinę między sztachetami w płocie wzbudzimy falę (rys. 12), to fala ta przejdzie przez szczelinę bez zakłóceń tylko wtedy, gdy drgania są równoległe do szczeliny, tu pionowe. Drgania poziome zostaną całkowicie zatrzymane, a w ogólnym przypadku szczelina przepuści tylko składową pionową i fala ulegnie osłabieniu w stosunku  $\cos\alpha$  (rys. 13).

Popatrzmy teraz, co się stanie, gdy światło, czyli fala elektromagnetyczna, przechodzi przez siatkę utworzoną z cienkich, równoległych i gęsto rozmieszczonych drucików. Składowa pola elektrycznego równoległa do naszych „sztachet” spowoduje w nich przepływ prądu — światło zostanie pochłonięte, a siatka się ogrzeje. Składowa prostopadła do drucików, jeśli są one naprawdę cienkie, nie indukuje w nich prądu, zatem pole prostopadłe do szczelin w „płocie” penetruje go bez przeszkód. W ogólnym wypadku nasza siatka przepuści *tylko* składową prostopadłą do drucików, zatem działa jak polaryzator — światło o dowolnym kierunku polaryzacji po przejściu przez nasze urządzenie będzie spolaryzowane w kierunku prostopadłym do osi siatki (rys. 14). Widzimy, że analogia ze szczelinami w płocie tylko częściowo jest słuszna, ponieważ w przypadku światła to właśnie drgania *równoległe* do szczelin zostaną zablokowane, a prostopadłe przejdą bez przeszkód.

Idea polaryzatora siatkowego została zrealizowana przez Edwina H. Landa, genialnego amerykańskiego wynalazcę, twórcę m.in. również materiałów do fotografii natychmiastowej, zwanych popularnie, acz bałamutnie, „polaroidami”, bo rzeczywiste polaroidy to właśnie folie i optyczne filtry polaryzacyjne oparte na wyżej omówionej zasadzie. Oczywiście, nie druciki napięte na ramce wykorzystuje się do produkcji filtrów polaryzacyjnych, tylko łańcuchy przewodzących polimerów ułożone równoległe do siebie, ale zasada jest ta sama. W najbardziej popularnych polaroidach H błonę alkoholu poliwinylowego rozciąga się, by splecione łańcuchy polimerów ułożyły się możliwie równoległe, a następnie poddaje się ją kąpeli w roztworze jodu, w wyniku czego łańcuchy stają się przewodnikami elektryczności<sup>3</sup>. **Uwaga:** Sama zasada działania filtra polaryzacyjnego implikuje, że zatrzymuje on co najmniej połowę padającego nań niespolaryzowanego światła (jedną

<sup>3</sup> Pierwotnie (1928) E.H. Land stosował kryształki herapatytu (dwójłomnego minerału mającego postać drobnych igiełek, co ułatwiało ich równoległe ułożenie), wprasowane w przezroczystą folię — były to tzw. polaroidy J. Po 10 latach (1938) zostały one zastąpione przez doskonalsze polaroidy H i dziś praktycznie nie są już używane. Kilka innych typów polaroidów produkowanych obecnie nie ma bezpośredniego zastosowania w fotografii.

z dwóch wzajemnie prostopadłych składowych); w praktyce nieco więcej, bo około 70%-krotność filtrów PL wynosi zwykle około 2,5x.

## Polaryzatory liniowe a kołowe

Dotychczas rozważaliśmy sytuację, w której wektor świetlny drga w ściśle określonym kierunku. Mówimy wtedy o świetle spolaryzowanym *liniowo*. Okazuje się, że nie wyczerpuje to wszystkich możliwości uporządkowania drgań. Jeśli złożymy dwa drgania o tej samej amplitudzie, wzajemnie prostopadłe i przesunięte względem siebie w fazie o ćwierć okresu (lub, co na jedno wychodzi, o ćwierć długości fali, czy też o  $90^\circ$ ), koniec wektora świetlnego będzie zataczał okrąg ze stałą prędkością (rys. 15). W zależności od tego, czy różnica faz jest „w przód” ( $+90^\circ$ ), czy „w tył” ( $-90^\circ$ ), wektor obracać się będzie w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara lub w przeciwnym — otrzymamy polaryzację prawoskrętną lub lewoskrętną. Dociekliwi mogą prześledzić wszystkie możliwe rodzaje polaryzacji na rys. 16.

Aby światło spolaryzowane kołowo otrzymać w praktyce, potrzebujemy urządzenia, które wytworzy różnicę faz  $90^\circ$ . Jest to tzw. ćwierćfalówka, szczególnie przypadek *płytki opóźniającej*. Aby zrozumieć jej działanie, przypomnijmy sobie, co wiemy o dwójłomności. Prędkość rozchodzenia się światła w ośrodku dwójłomnym zależy od kierunku polaryzacji. Płytkę płaskorównoległą wyciętą z substancji dwójłomnej w określony sposób (mniejsza o szczegóły) dzieli wiązkę światła na dwie, spolaryzowane względem siebie prostopadłe i *poruszające się z różną prędkością*. Zatem stopniowo jedna wiązka zacznie się spóźniać w stosunku do drugiej i fazy drgań obu przestaną się pokrywać. Opóźnienie fazy zależy od drogi, jaką przebywają fale, a zatem od grubości płytki. Można ją dobrać tak, by przesunięcie fazowe było zgodne z potrzebą; w szczególności może być ono równe ćwierci długości fali —  $\lambda/4$  (lub, jak kto woli,  $90^\circ$ ). Polaryzator kołowy składa się więc z: a) polaryzatora liniowego, który światło niespolaryzowane porządkuje tak, że drgania odbywają się w określonym kierunku, b) ćwierćfalówki, która przekształca polaryzację liniową w kołową (rys. 17).

Filtry kołowe mają zatem bardziej złożoną budowę i w konsekwencji są droższe. Powstają dwa pytania:

1. Czy obraz otrzymany przy użyciu filtra kołowego różni się czymś od tego, który daje filtr liniowy?
2. Kiedy używać filtra liniowego, a kiedy kołowego?

Odpowiedź 1: Niczym, o ile założymy go *właściwie*, tzn. ćwierćfalówką w stronę obiektywu, a filtrem liniowym na zewnątrz. O analizie światła docierającego do obiektywu decyduje filtr liniowy, ćwierćfalówka jedynie przekształca polaryzację liniową w kołową. Atoli, gdy go założymy odwrotnie, filtr praktycznie przestanie działać, choć opuszczające go światło *jest* spolaryzowane liniowo. Wyjaśnienie, dlaczego tak się dzieje, pozostawiamy jako materiał do przemyśleń dla dociekliwego czytelnika.

Odpowiedź 2: Filtra kołowego można używać **zawsze**; filtr liniowy może sprawiać kłopoty w określonych typach aparatów — mianowicie wszędzie tam, gdzie wiązkę światła wpadającego przez obiektyw dzieli się poprzez odbicie od powierzchni szklanych, płytek półprzepuszczalnych itp. — po to, by „obsłużyć” sensory pomiaru światła i automatyki ekspozycji TTL oraz systemów autofocus (na ogół w instrukcji obsługi aparatu produ-

cenci podają, czy wymaga on używania filtra kołowego). Wiemy już, że światło spolaryzowane — a takie wpada przez obiektyw, na który założyliśmy filtr *polaryzacyjny* — może w pewnych warunkach w ogóle nie odbić się od powierzchni *niemetalicznych* lub odbić się tylko w pewnym stopniu. Tak osłabiona wiązka może zafałszować pomiar ekspozycji lub zgoła uniemożliwić działanie automatyki ostrości. Natomiast światło spolaryzowane *kołowo* jawi się (i zachowuje) pozornie jako światło w ogóle niespolaryzowane, ponieważ wektor świetlny wiruje z olbrzymią szybkością (częstość obrotów jest równa częstości drgań fali świetlnej, tzn. rzędu  $10^{14}$  Hz!) — można się o tym łatwo przekonać umieszczając za filtrem kołowym „zwykły” filtr liniowy i obracając go wokół osi, praktycznie bez efektu. Zgoła inaczej będzie, gdy umieścimy go *przed* filtrem kołowym! Przy obrocie któregośkolwiek z nich zaobserwujemy ściemnienie i rozjaśnienie na przemian, dokładnie tak samo, jak wtedy, gdy mamy do czynienia z dwoma filtrami liniowymi. Jest to zresztą jeden ze sposobów odróżnienia filtra kołowego od liniowego. Inny, bardziej efektowny sposób przedstawia się następująco: stańmy przed lustrem i przyłóżmy do oka filtr polaryzacyjny, obserwując jego odbicie w lustrze. Filtr liniowy nie wykaże niczego szczególnego: oba filtry — ten rzeczywisty i ten odbity w lustrze polaryzują światło w tej samej płaszczyźnie, zatem każdy z nich dla drugiego jest całkowicie przezroczysty. Jeśli teraz wykonamy to samo doświadczenie z filtrem kołowym, rezultaty będą się diametralnie różnić w zależności od tego, czy przyłożymy filtr do oka tak, jak się go mocuje na obiektywie, czy odwrotnie. W pierwszym wypadku efekt będzie dokładnie taki, jak dla filtra liniowego — natomiast w drugiej sytuacji zobaczymy w lustrze **czarny**, nieprzezroczysty filtr! Wyjaśnienie jest proste: jeśli nasz filtr kołowy jest *prawoskrętny*, to jego bliźniak w lustrze jest *lewoskrętny* i odwrotnie (kto nie wierzy, niech spróbuje odczytać godzinę na zegarku odbitym w lustrze!) — a filtr kołowy prawoskrętny nie przepuszcza światła spolaryzowanego lewoskrętnie i *vice versa* (rys. 18). Można do tego problemu podejść jeszcze w inny sposób, przedstawiony na rysunku 19. (Opis: filtr — jego odbicie w lustrze; między dwoma filtrami liniowymi znajdują się dwie ćwierćfalówki, tworząc razem półfalówkę, która obraca płaszczyznę polaryzacji o  $90^\circ$  (aneks: ćwierćfalówka i półfalówka). Tak „obrócona” fala zostanie zatrzymana przez drugi filtr liniowy.)

## Polaryzacja chromatyczna

Jeśli złożymy dwa filtry polaryzacyjne i będziemy je względem siebie obracać, zobaczymy to, czego należy się spodziewać — naprzemienne ściemnienia i rozjaśnienia, w zależności od tego, czy osie polaryzacji są równoległe (najjaśniejsze), czy prostopadłe (najciemniejsze). Jeśli teraz między skrzyżowane polaryzatory wstawimy kawałek celofanu, albo, jeszcze lepiej, przezroczyste polistyrenowe wieczko od pudełka na filtr, zaobserwujemy jedno z najdziwniejszych i najpiękniejszych zjawisk, jakie funduje nam światło spolaryzowane — przestrzeń pomiędzy filtrami zajaśnieje wszystkimi barwami tęczy (fot.). Podobne efekty można zauważyć, obserwując w pogodny dzień przez filtr polaryzacyjny szyby samochodów — czasami nawet filtr polaryzacyjny nie będzie potrzebny, gdy obserwujemy odbicia. Na szybach widoczne są barwne, regularne plamy — jeśli obrócimy filtr polaryzacyjny, plamy zaczną się poruszać i zmieniać kolor. Ten sam efekt ruchu i zmiany kolorów otrzymamy również w doświadczeniu z płytką z polistyrenu opisaną poprzednio — uważny obserwator spostrzeże nawet, że przy ob-

rocie jednego z filtrów o  $90^\circ$  barwy zmieniają się na dopełniające (fot.). Pora wyjaśnić, co się tu właściwie dzieje.

Celofan, polistyren i *hartowane* szyby samochodów zachowują naprężenia powstałe — celowo lub nie — w procesie produkcji i w ten sposób uzyskują w pewnym stopniu strukturę uporządkowaną, podobną do kryształów anizotropowych (inaczej niż zwykłe szkło, które jest w gruncie rzeczy przechłodzoną cieczą). Należy się zatem spodziewać, iż, przynajmniej w pewnym stopniu, uzyskają one optyczne własności takich kryształów, tzn. dwójłomność. Skoro tak, to przechodzące przez nie światło dzieli się na dwie wiązki, spolaryzowane wzajemnie prostopadle i poruszające się z różnymi prędkościami. Wychodząc na zewnątrz, obie wiązki łączą się ze sobą i dalej podróżują razem; nic specjalnego się nie dzieje.

Jeśli jednak umieścimy tę płytkę między dwoma polaryzatorami (w przypadku samochodów w plenerze mamy do czynienia ze spolaryzowanym światłem docierającym od pogodnego nieba), sytuacja się zmienia:

Pierwszy polaryzator przekształca światło niespolaryzowane w spolaryzowane liniowo. Przechodzi ono następnie przez płytkę dwójłomną, dzieląc się na dwie wiązki poruszające się z różną prędkością — powstaje różnica faz. Ponieważ polaryzacje obu wiązek są wzajemnie prostopadle, nic szczególnego nie zauważymy. Aby nastąpiła widoczna interferencja fal, musimy drgania zrzutować na wspólny kierunek, tak by mogły się dodawać lub znosić. Po to właśnie jest potrzebny drugi polaryzator. W zależności od tego, jak go zorientujemy względem „azymutu” naszej płytki dwójłomnej, te same fale mogą się dodawać lub odejmować, dając w ten sposób barwy wzajemnie dopełniające (rys. 20). Efekt barwy zależy oczywiście od tego, dla *której* długości fali otrzymujemy w danym miejscu różnicę faz  $\lambda/2$  ( $180^\circ$ ), podobnie jak w bańce mydlanej, gdzie kolor błonki w danym miejscu zależy od jej grubości (por. aneks..).

Zjawisko polaryzacji chromatycznej jest szczególnie użyteczne wtedy, gdy trzeba sfotografować przedmioty przezroczyste, a dwójłomne — takimi są niektóre kryształy, a także wiele mas plastycznych, przy których produkcji następują naprężenia wewnętrzne. Czytelnik może sam poczynić stosowne eksperymenty, uzbroiwszy się uprzednio w jeden lub dwa filtry polaryzacyjne.

## Literatura

W.A. Shurcliff, S.S. Ballard, *Światło spolaryzowane*; PWN 1968

R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*; t. I cz. 2; PWN 1971

## Resumé

Tekst daje popularne omówienie podstawowych faktów dotyczących fizyki światła spolaryzowanego oraz jego wykorzystania w fotografii. Zakres materiału odpowiada wykładowi wchodzącemu w obręb przedmiotu „Technika i technologia fotografii” prowadzonemu przeze mnie na Wyższym Studium Fotografii ASP w Gdańsku. Od Czytelnika oczekuje się znajomości jedynie podstawowych praw optyki (odbicie i załamanie światła, ruch falowy) oraz własności funkcji trygonometrycznych i elementarnych operacji na wektorach — wszystko w zakresie co najwyżej szkoły średniej.