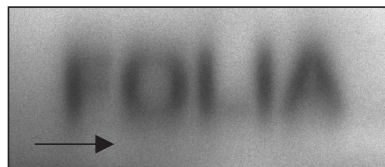
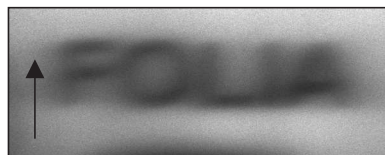


Przezroczysta folia, czyli od pakowania zakupów do badania struktury tkanek mięśniowych Piotr PODZIEMSKI

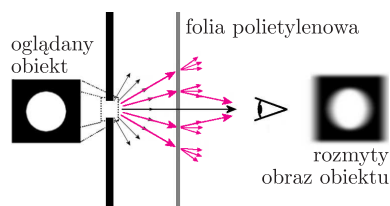


Rys. 1, 2, 3. Zdjęcie tekstu widzianego „gołym okiem” (1) i widzianego przez folię znajdującą się 10 cm nad tekstem, dla dwóch ustawień płaszczyzny folii (2 i 3). Widać wyraźnie różnicę w rozpraszaniu dla obu ustawień.

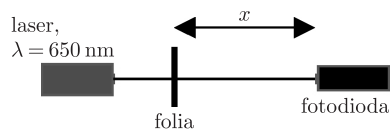
Aby uwidocznić różnicę między rozpraszaniem w obu ustawieniach, wszystkie trzy obrazy poddano następującej modyfikacji: Monochromatyczne zdjęcia potraktowano jako tablice pikseli, tj. wartości od 0 do 1 kodujących kolor, gdzie 1 oznacza kolor czarny, 0 biały, a wartości pośrednie różne odcienie szarości. Została dobrana tak, by największe różnice wystąpiły między odcieniami ciemnej szarości, co uwydatnia efekt rozmazania.

$$f(k) = \exp(1,2 - 5 \cdot (\max(k) - k)),$$

gdzie k oznacza kolor piksela, a $\max(k)$ kolor najjaśniejszego piksela. Funkcja ta powodowała zwiększenie różnic między bliskimi odcieniami szarości. Została dobrana tak, by największe różnice wystąpiły między odcieniami ciemnej szarości, co uwydatnia efekt rozmazania.



Rys. 4. Prezentacja mechanizmu rozpraszania zachodzącego na folii polietylenowej. Strzałki reprezentują promienie świetlne. Rozproszone światło koncentruje się wokół oglądanej plamki, powodując rozmycie obrazu.



Rys. 5. Układ doświadczalny służący do badania natężenia światła przechodzącego przez folię w zależności od odległości folii od fotodiody.

Kiedy rano w sklepie (najczęściej niewyspani) pakujemy zakupy do przezroczystych, jednorazowych torebek, zdarza się, iż zapominamy, co już spakowaliśmy. Wtedy albo wyjmujemy wszystko i pakujemy jeszcze raz, albo wpatrujemy się przez torbę, próbując sprawdzić, co w niej jest. Ale w ten sposób wyraźnie widzimy tylko te produkty, które są blisko „ścianek” siatki – te znajdujące się głębiej widzimy już niewyraźnie. . . W pierwszej chwili nie zastanawiamy się, dlaczego tak jest, a nawet w drugiej nie wydaje się to oczywiste.

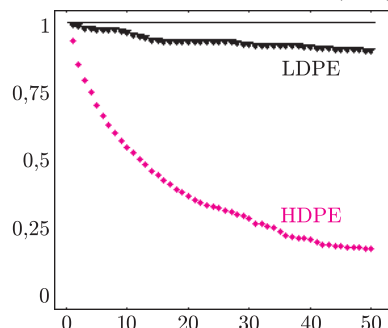
Proponuję w tym miejscu przeprowadzić małe doświadczenie. Umieścimy kawałek wyżej wymienionej torebki do zakupów, czyli po prostu cienkiej folii polietylenowej, na drukowanym tekście – nie będziemy mieli żadnego kłopotu z odczytaniem druku. Lecz w miarę zwiększania odległości między folią a tekstem druk staje się coraz bardziej zamazany, a nawet znika (rysunki 2 i 3). Dlaczego tak się dzieje? Jest to spowodowane rozpraszaniem światła na folii, czyli odchyleniem biegu promieni świetlnych od kierunku pierwotnego (rysunek 4). Lecz co jest przyczyną rozpraszania światła na folii? Zanim poznamy odpowiedź na to pytanie, musimy dowiedzieć się więcej o polietylenie i rozpraszaniu światła.

Z wielu rodzajów folii polietylenowych do badania zjawiska wybierzmy dwie: folię LDPE (*low density polyethylene*) i HDPE (*high density polyethylene*). Ta pierwsza, o małej gęstości i krystaliczności, jest bardziej miękka, lecz mniej wytrzymała. W związku z tym przy produkcji folia jest mniej rozciągana i w efekcie grubsza. Folia HDPE, o dużej gęstości i krystaliczności, jest sztywniejsza i wytrzymalsza, a te właściwości pozwalają na duże rozciąganie w procesie produkcji, a więc na otrzymanie bardzo cienkich folii. Wiedząc już trochę o polietylenie, przejdźmy do zapoznania się z rozpraszaniem światła.

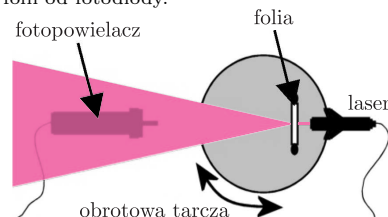
Rozpraszanie światła badał już Leonardo da Vinci, próbując znaleźć przyczynę niebieskiego koloru nieba. 350 lat po da Vincim Tyndall opublikował wyniki badania rozpraszania światła na zawiesinach w przezroczystych płynach. W XIX wieku lord Rayleigh użył falowej teorii światła Maxwella do teoretycznego wyjaśnienia rozpraszania światła na cząsteczkach o średnicy mniejszej niż jedna dziesiąta długości fali światła padającego. Jednakże dopiero w XX wieku podjęto próby analizy rozpraszania na bardziej lub mniej przezroczystych ciałach stałych nie tylko fal świetlnych, ale też np. promieni Röntgena. Okazało się, iż można za pomocą rozpraszania światła uzyskać informacje o materiałach, dla których struktury rozpraszające mają ten sam rząd wielkości co długość padającej fali. Zatem, czy badając rozproszenie światła na folii odkryjemy i dowiemy się, jaka jest tego przyczyna?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, zbadajmy dokładniej zjawisko utraty czytelności tekstu. Okazuje się, że ten efekt zachodzi w różnym stopniu dla różnych folii. W badanym przeze mnie przypadku zjawisko zachodziło silnie dla folii typu HDPE i bardzo słabo dla folii LDPE. Ponadto dla folii HDPE rozmazanie tekstu zależy od ustawienia płaszczyzny folii – istnieje wyróżniony kierunek większego rozpraszania – tekst wyraźnie rozmazuje się bardziej w jednym kierunku! Zaprezentowano to na rysunkach 1, 2 i 3 (efekt ten można też zobaczyć, przykładając folię do oka i patrząc np. na gruby pionowy pręt – kręcąc folię zauważymy rozmazywanie się obrazu pręta w różne strony – w zależności od ustawienia pręt będzie bardziej lub mniej widoczny). Od czego więc może zależeć zmętnienie obrazu oglądanego przez folię polietylenową? Mogą być dwa powody – albo światło jest rozpraszane na niejednorodnościach związanych ze strukturą wewnętrzną folii, albo jest rozpraszane na jego powierzchni. Można to sprawdzić, zanurzając folię polietylenową w cieczy o podobnym do polietylenu współczynniku załamania – taką cieczą jest alkohol benzylowy. Zmętnienie obrazu znika! Zatem rozpraszanie zachodzi na nieregularnościach powierzchni folii. Okazuje się jednak, że struktura powierzchni ściśle zależy od struktury wewnętrznej w folii.

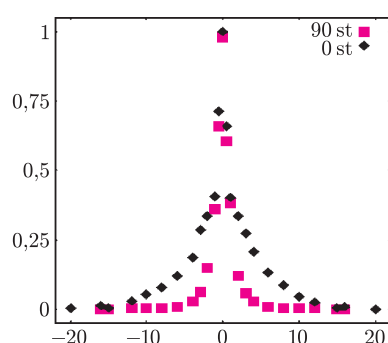
Przyjrzyjmy się teraz wynikom badań sprawdzających, jak światło przechodzi przez folie różnego typu. Aby to sprawdzić, wystarczy zbudować prosty układ doświadczalny przedstawiony na rysunku 5 – pozwala on na zbadanie za pomocą fotodiody natężenia światła przechodzącego przez folię w zależności od odległości



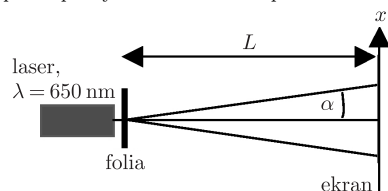
Rys. 6. Wykres zależności unormowanego natężenia światła jako funkcji odległości folii od fotodiody.



Rys. 7. Układ doświadczalny do badania rozkładu kąтового rozproszonego światła.



Rys. 8. Wykres zależności unormowanego natężenia światła jako funkcji kąta odchylenia fotopowielacza dla dwóch prostopadłych kierunków rozpraszania.



Rys. 9. Układ doświadczalny do badania wielkości struktur rozpraszających.

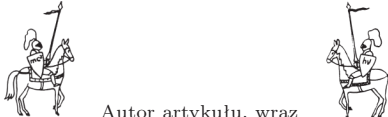
folii od fotodiody. Doświadczenie przeprowadzone dla dwóch folii – HDPE i LDPE wykazało (rysunek 6), że spadek natężenia światła na folii HDPE jest znacznie większy niż na LDPE. Dla tej pierwszej ponadto największy spadek natężenia światła zachodzi dla małych odległości folii od fotodiody.

Z kolei aby sprawdzić, jak światło rozpraszane jest przez folię w różnych kierunkach (wybrałem dwa – jeden dla największego, drugi dla najmniejszego rozpraszania, kierunki okazały się prostopadłe), możemy posłużyć się układem przedstawionym na rysunku 7. Folię ustawiamy wraz z laserem na obrotowej tarczy, a natężenie badamy za pomocą unieruchomionego fotopowielacza czy fotodiody. Pozwala to na zbadanie rozkładu kąтового natężenia światła dla dwóch kierunków – wyniki takiego doświadczenia prezentuje rysunek 8. Widać wyraźnie, że dla jednego kierunku zachodzi znacznie większe rozpraszanie. (Zdjęcie znajdujące się na tylnej okładce przedstawia obraz rozproszonej wiązki światła, jaki możemy zobaczyć, umieszczając w układzie zamiast fotopowielacza ekran, czyli np. białą kartkę papieru.)

Zatem dalszą analizę zjawiska można przeprowadzić, badając albo natężenie światła przechodzącego przez folię dla różnych odległości fotodetektora (np. fotodiody) od folii, albo rozkład kątowy natężenia światła (wraz z analizą obrazów rozproszonej wiązki światła) – w zależności od kierunku ustawienia folii. Drugi z tych sposobów wydaje się ciekawszy, a jednocześnie stosując go, nie jesteśmy zmuszeni do analizy wielu różnych folii, by uzyskać ogólne pojęcie o przyczynach rozpraszania na niej światła. Takie podejście nazwano w optyce analizą małokątowego rozpraszania (*Small-Angle Scattering, SAS*) – samo zjawisko prezentuje rysunek 4. Aby omówić najprostsze zastosowanie metody SAS, przyjrzyjmy się układowi doświadczalnemu przedstawionemu na rysunku 9. Równoległa wiązka fali elektromagnetycznej (w naszym przypadku światła monochromatycznego z lasera) pada na próbkę (w naszym przypadku folię) i ulega rozproszeniu. Obserwowany na ekranie wzór powstanie w wyniku interferencji rozproszonych w folii fal na strukturach takich jak zgrupowania cząsteczek i będzie zależny od ich ułożenia. To, że światło jest rozpraszane w jednym kierunku bardziej, może oznaczać gęstsze ułożenie struktur rozpraszających w jednym kierunku, a rzadsze w drugim. Okazuje się, że w folii HDPE rzeczywiście tak jest! Podczas rozciągania w folii tworzy się struktura włóknista, a cząsteczki ustawiają się podłużnie, co z kolei powoduje powstanie na jej powierzchni podłużnych mikrobruzd, na których zachodzi rozpraszanie!

Mierząc natężenie światła w zależności od kąta pomiędzy promieniem padającym a rozproszonym, możemy zbadać strukturę wewnętrzną folii. Jednakże nawet nie dysponując profesjonalnym sprzętem optycznym, można oszacować rozmiar struktur rozpraszających, stosując proste wzory dla dyfrakcji (dla przybliżenia Fraunhoffera). Przy założeniu, że ekran znajduje się bardzo daleko od folii ($L \gg x$ na rysunku 9), mierząc na ekranie średnicę całego obrazu oraz odległości pomiędzy lokalnymi maksimumi, możliwe jest obliczenie rzędu wielkości struktur rozpraszających r ($r = 0,5 \cdot \lambda \cdot \Delta\alpha^{-1}$, $\Delta\alpha \cong x/L$). Analizując zdjęcie przedstawione na okładce, przekonujemy się, że mikrostruktura obrazu odpowiada nierównościom o rozmiarze około 1 mm – łatwo zauważalnym na powierzchni folii. Interesująca jest jednak makrostruktura obrazu (czyli szerokość kątowa całego obrazu) – wyliczony rząd wielkości struktury rozpraszającej odpowiada około 10 μm dla folii LDPE i kilku mikrometrom dla folii HDPE. Porównując to ze zdjęciami mikroskopowymi folii HDPE, przedstawionymi na okładce, można wyraźnie wskazać struktury rozpraszające oraz przekonać się, iż oszacowane wartości zgadzają się z wartościami wyliczonymi z obrazu mikroskopowego! W dodatku, przyglądając się obrazowi mikroskopowemu, wyraźnie możemy zobaczyć wyróżniony kierunek (zaznaczony na rysunkach 2 i 3 strzałką), odpowiedzialny za niesymetryczność rozpraszania, na którą wskazywały wcześniejsze doświadczenia!

W wyniku analizy rozpraszania światła na folii dowiedzieliśmy się dwóch ważnych faktów o jej strukturze wewnętrznej – wielkości i rozkładzie cząstek wewnątrz folii. Można by tu zadać pytanie, czy badając dowolne przezroczyste błony, można za pomocą rozpraszania światła dowiedzieć się czegoś o ich strukturze wewnętrznej? Oczywiście, można – i takie badania znajdują zastosowanie w medycynie i biologii. Małokątowe rozpraszanie światła (*Small-Angle Light Scattering, SALS*) pozwala, na przykład, na określenie średnicy włókien w tkance mięśniowej czy chrzęstnej, jak również na optymalizację budowy cienkich baterii słonecznych.

 Autor artykułu, wraz z Anną Magdą Sowińską (kapitanem), Jackiem Bobińskim, Tomkiem Czekalą i Andrzejem Nowojewskim tworzyli zespół XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie, który pod opieką mgr. Stanisława Lipińskiego zdobył drugie miejsce w **Finale Międzynarodowego Turnieju Młodych Fizyków**, Uppsala 2003.