

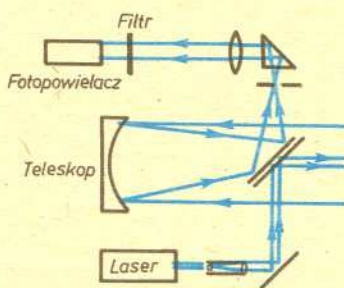
*Doc. dr Krzysztof ERNST*

O różnych zastosowaniach laserów pisaliśmy już wielokrotnie na łamach *Delty*. Staraliśmy się równocześnie zwrócić uwagę na specyfikę promieniowania laserowego, a w szczególności na te jego cechy, dzięki którym zastosowania te stały się w ogóle możliwe.

Kolejny przykład, który chcemy przedstawić dzisiaj, to LIDAR, czyli, mówiąc inaczej, laserowy radar. Już samo pochodzenie nazwy wiele nam wyjaśni, LIDAR jest bowiem akronimem od angielskiego określenia „Light Detection and Ranging”, co oznacza wykrywanie i określanie położenia za pomocą światła. Należy tu od razu zwrócić uwagę na istotną różnicę między radarem i lidarem. Zmieniając dwie pierwsze litery w nazwie przeszliśmy od fal radiowych do obszaru widzialnego zmniejszając tym samym o wiele rzędów wielkości długość fali promieniowania elektromagnetycznego używanego do poszukiwania obiektów w przestrzeni. Tylokrotnie też zwiększyliśmy zdolność rozdzielczą naszego układu, który jest teraz w stanie wykrywać obiekty nawet tak małe, jak np. cząsteczki gazów znajdujących się w atmosferze.

Stosowane od dawna metody badań atmosfery, a w szczególności jej zanieczyszczeń, polegały na pobieraniu próbek z atmosfery, a następnie wykonywaniu pomiarów w warunkach laboratoryjnych. Sam pomiar jest w ten sposób bardzo prosty, ale zdobycie próbki dosyć kłopotliwe, szczególnie jeśli interesuje nas trudno osiągalny obszar. Spróbujmy więc ustawić taki układ detekcyjny, który umożliwiałby pomiary przy przestrzennym rozdzieleniu badanego obiektu i aparatury badawczej.

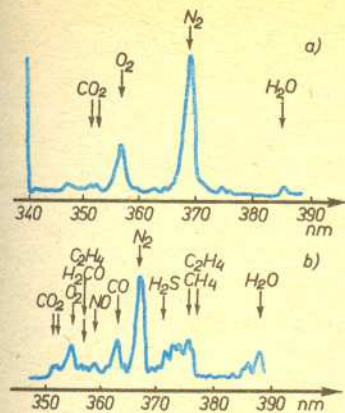
Rozpatrzmy na początku prosty układ, w którym wykorzystany jest jeden z podstawowych procesów oddziaływania promieniowania z materią, jakim jest rozpraszanie światła. Układ składa się z lasera, teleskopu i detektora promieniowania, a jego schemat przedstawiony jest na rysunku 1. Wiązka światła wyemitowana przez laser oddziałuje z cząsteczkami gazów lub też z większymi obiektami typu cząstek aerozoli, pyłu czy kurzu znajdującymi się w atmosferze. Światło rozproszone do tyłu powraca do naszego układu i po zebraniu przez teleskop rejestrowane jest za pomocą czułego detektora (np. fotopowielacza). Światło powracające do układu stanowi na tyle znikomą część światła wyemitowanego w przestrzeń, że praktycznie tylko użycie lasera pozwala na uzyskanie mierzalnego sygnału. Monochromatyczność i spójność umożliwia dobrą kolimację wiązki, co z kolei pozwala na uzyskanie przestrzennej gęstości fotonów na tyle dużej, że nawet powracająca ich część przewyższa tło wynikające z rozproszenia światła słonecznego. Ponadto mała rozbieżność wiązki pozwala na wysoką kierunkową zdolność rozdzielczą układu.



Rys. 1

Lasery stosowane w układach lidar są zazwyczaj laserami impulsowymi, co pozwala na ocenę odległości (range) z odstępem między wysłanym a powracającym impulsem. Im krótszy impuls, tym dokładniej tę odległość możemy ocenić. Np. przy impulsie o czasie trwania 10 ns (typowa szerokość impulsu z lasera barwnikowego pompowanego laserem azotowym) rozmycie przestrzenne impulsu wynosi 3 metry.

Przedstawiony na rysunku 1 przykładowy układ przy wielu swoich zaletach ma pewną istotną wadę. Zdolny do wykrywania w przestrzeni cząstek aerozolu czy też cząsteczek gazu, a także do określenia ich odległości i oszacowania koncentracji, nie pozwala nam ich jednoznacznie zidentyfikować. W jaki sposób należałoby zatem zmodyfikować nasz układ, aby oprócz odpowiedzi na pytania: „czy, gdzie i ile”, uzyskać także niezwykle ważną informację: „co”.



Rys. 2

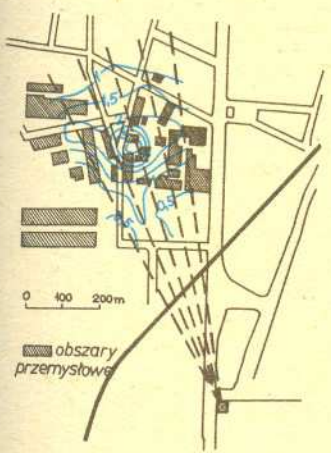
W przedstawionym układzie (rys. 1) pomiar natężenia światła odbywał się na częstości emitowanej przez laser, co oznacza, że rejestrowaliśmy rozproszenie Rayleigha. Światło rozproszone na układach cząsteczkowych zawiera również składowe o częstościach różnych od częstości światła padającego. Przesunięcie tych składowych, zwanych ramanowskimi, zależy od budowy cząsteczki i jest jednocześnie wielkością pozwalającą na jej identyfikację w sposób analogiczny do identyfikacji układów atomowych na podstawie absorbowanych lub emitowanych przez nie częstości.

Zmodyfikujmy więc teraz nasz układ stosując filtr obcinający wszelkie tło wynikające z rozproszenia rayleighowskiego i rejestrujemy rozkład widmowy tylko światła rozproszonego ze zmianą częstości. Na rysunku 2 przedstawione są typowe zapisy widma ramanowskiego dla rozproszenia w atmosferze. Zapisu a) dokonano w atmosferze "względnie" czystej, natomiast zapisu b) dokonano w atmosferze o dużej zawartości samochodowych gazów spalinyowych. Użyto lasera azotowego o długości fali 337 nm, a umieszczone na rysunku strzałki wskazują na oczekiwane położenia maksimów dla zidentyfikowanych w widmie cząsteczek.

Istotnym ograniczeniem powyższej metody jest bardzo małe natężenie linii Ramana w stosunku do linii Rayleigha. Wymagane są zatem lasery o dużej mocy, duże teleskopy, długie czasy zliczania (poprawiające stosunek sygnału do szumu) i wreszcie duże koncentracje cząsteczek w badanych obszarach.

Spróbujmy zatem zmodyfikować nasz pierwotny układ w inny sposób. Niech źródło emituje teraz dwie linie o różnych częstościach tak, aby jedna z nich wypadła w maksimum absorpcji, podczas gdy druga była słabo absorbowana przez gaz, którego obecność chcemy wykryć. Pomiarów natężenia światła rozproszonego do tyłu dokonujemy teraz dla każdej z dwóch częstości niezależnie. Obecność określonego gazu w badanej przestrzeni uwidoczni się osłabieniem jednego z sygnałów względem drugiego. Dokładna analiza pozwala na uzyskanie informacji o koncentracji gazu absorbującego, a także o jej rozkładzie przestrzennym. Pomiarów dla różnych gazów dokonywać możemy przez dobór odpowiedniej długości fali światła laserowego. Stosujemy w tym celu lasery strojone, czyli takie, w których możemy zmieniać w sposób ciągły długość fali emitowanej wiązki. Typowym przykładem takiego lasera jest działający w obszarze widzialnym laser barwnikowy.

Posługując się opisaną metodą zwaną DIAL (differential absorption lidar) i stosując właśnie laser barwnikowy grupa fizyków z Kolonii dokonała szeregu pomiarów rozkładu koncentracji dwutlenku azotu w atmosferze. Przy niewielkiej koncentracji NO<sub>2</sub>, odpowiadającej zanieczyszczeniu atmosfery nad Kolonią, zasięg pomiarów wynosił około 4 km. Ciekawe wyniki uzyskano badając rozkład stężenia NO<sub>2</sub> w kilkusetmetrowym otoczeniu komina fabrycznego. Pomiarów dokonano na wysokości 45 metrów w pięciu kierunkach. Dla każdego kierunku uśredniano wyniki pochodzące z wielu impulsów laserowych dla każdej z dwóch długości fal. Wyniki przedstawione są na rysunku 3. Połączone zostały punkty odpowiadające jednakowej koncentracji NO<sub>2</sub>, a zamieszczone na rysunku liczby wyrażają stężenie w ppm (part per million, czyli w milionowych). Przedstawienie danych pomiarowych na tle mapki terenu pozwala natychmiast wykryć winnych zanieczyszczenia atmosfery.



Rys. 3

Informacje, które możemy uzyskać za pomocą lidaru, znacznie wykraczają poza podane wyżej przykłady. Stosowane są również różnorodne techniki i systemy pomiarowe. Bardzo rozpowszechnione są badania atmosferycznych aerozoli. Dzięki dużym przekrojom czynnym na rozproszenie (duże cząstki) są one bardzo wygodnym obiektem do obserwacji i umożliwiają m.in. badania dynamiki dolnych warstw atmosfery. Możemy również badać chmury określając np. ich wysokość i rozkład przestrzenny, a także uzyskiwać informację o śniegu i deszczu, aczkolwiek przy przejściu do tak dużych cząstek radar mikrofalowy staje się bardziej użyteczny.

Lidar pozwala ponadto na uzyskanie wielu informacji przydatnych w meteorologii, takich jak siła wiatru, temperatura, gęstość, wilgotność czy widoczność. Wymaga to zazwyczaj precyzyjnych urządzeń i złożonej analizy danych. Np. siłę wiatru można określić na podstawie przesunięcia dopplerowskiego badanych linii, a temperaturę z rozkładu natężeń składowych rotacyjnych w widmach cząsteczkowych.

Techniki lidarowe rozwinęły się szczególnie intensywnie w latach siedemdziesiątych dzięki możliwościom zastosowania najnowszych technik laserowych. W tym też mniej więcej okresie uświadomiono sobie wielkie niedbania w tego typu badaniach. Wynikły one z prostej w zasadzie przyczyny. Otóż do niedawna atmosfera traktowana była jako zbiornik bez dna na różnego rodzaju odpady wytwarzane na Ziemi. Rzeczywistość okazała się zupełnie inna i dopiero dokładne badania atmosfery, m.in. za pomocą lidaru pokazały, jak niepokojący jest stan jej zanieczyszczenia i czym grozi nam w przyszłości zlekceważenie istniejącego niebezpieczeństwa.

**Rozwiązanie zadania M 439.** Iloczyn skalarny wektorów jest nie większy niż iloczyn ich długości. Rozpatrując wektory  $(\cos x, \sin x)$  i  $(k, 1)$  otrzymujemy

$$k \cdot \cos x + 1 \cdot \sin x \leq \sqrt{\cos^2 x + \sin^2 x} \cdot \sqrt{k^2 + 1} = \sqrt{k^2 + 1}$$