



BIULETYN WAT
VOL. LV, NR 2, 2006

Optoelektroniczne systemy zdalnego wykrywania skażeń i zanieczyszczeń atmosfery

ANDRZEJ GIETKA, ZYGMUNT MIERCZYK, MICHAŁ MUZAL

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Techniki Wojskowej, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule omówiono dwa rodzaje systemów zdalnego monitorowania: typu „stand-off” i typu „remote”. Systemy „stand-off” pozwalają wykrywać zanieczyszczenia (gazy, aerozole, dymy, pyły) ze znacznej odległości bez kontaktu z obszarem występowania tego zanieczyszczenia. Są to aktywne systemy laserowe (lidary) lub pasywne systemy termowizyjne z wąskimi filtrami dopasowanymi do pasm pochłaniania gazów i obrazujące zmiany transmisji promieniowania pochłanianego wzdłuż drogi występowania gazu. Pojedyncza stacja typu „stand-off” może pokryć znaczny obszar, którego wielkość zależy od zasięgu promieniowania próbkującego, pola widzenia i szybkości skanowania. Systemy typu „remote” wykorzystują różne rodzaje niewielkich czujników punktowych, przy czym dane z tych czujników przesyłane są za pomocą łącz przewodowych lub bezprzewodowych do centrów alarmowych. Należy podkreślić, że w tym przypadku konieczny jest kontakt czujnika z analizowanym obszarem, zdalne wykrywanie osiąga się dzięki systemom transmisji danych pomiarowych.

W artykule przedstawiono budowę, zasadę działania i podstawowe charakterystyki analityczne wybranych systemów pomiarowych „stand-off” i „remote” opracowanych w Wojskowej Akademii Technicznej, przeznaczonych do ciągłego monitorowania skażeń i zanieczyszczeń atmosfery.

Słowa kluczowe: czujniki optoelektroniczne, urządzenia optoelektroniczne, zanieczyszczenia atmosfery — wykrywanie, skażenia — wykrywanie

Symbole UKD: 621.38:535.8

1. Wprowadzenie

Spośród różnych elementów środowiska, takich jak atmosfera (powietrze), hydrosfera (wody) i litosfera (gleby), największe problemy, jeśli chodzi o monitorowanie skażeń oraz zanieczyszczeń, dotyczą atmosfery. Składają się na to dwa podstawowe czynniki: ogromna dynamika atmosfery, powodująca, że stanowi

ona główną drogę rozprzestrzeniania skażeń i ich transportu między pozostałymi elementami środowiska oraz powszechność narażenia populacji na skutki skażenia bez możliwości odizolowania się od skażeń, co jest możliwe w przypadku skażonej gleby czy wód.

Zanieczyszczenia atmosfery klasyfikuje się według wielu kryteriów, m.in. ze względu na postać fizyczną (pyły, gazy, aerozole), rodzaj i stopień szkodliwości (pyły i gazy niskiej oraz wysokiej szkodliwości, zanieczyszczenia biologiczne, opad radioaktywny). Gazy stanowią podstawowe źródło zanieczyszczeń, w tym o niskiej szkodliwości (dwutlenek węgla, węglowodory alifatyczne) oraz o wysokiej szkodliwości (NO_x , SO_2 , H_2S , fosgen, dioksyny, związki aromatyczne). Ta sama substancja może być zaliczona do różnych grup szkodliwości w zależności od tego jak często występuje i w jakim stężeniu.

Źródła zanieczyszczeń mogą być naturalne i sztuczne. Wśród źródeł naturalnych najistotniejsze są: wulkany (związki siarki, pyły wyrzucane do wysokich warstw atmosfery), błota, bagna i rozlewiska (skażenia biologiczne), niektóre rozproszone źródła energii, kolonie planktonu i zooplanktonu, pustynie i obszary stepowe (pyły).

Do najgroźniejszych źródeł sztucznych zanieczyszczeń należą: transport samochodowy (drobna sadza, węglowodory aromatyczne, tlenek węgla, ozon, tlenki azotu, pyły zawierające ołów, pyły rakotwórcze), przemysł chemiczny, rozproszone źródła energii (tlenki azotu, substancje odorowe, dwutlenek siarki, pyły), energetyka (dwutlenek siarki, tlenki azotu, pyły radioaktywne), rolnictwo (środki ochrony roślin, produkty rozpadu substancji biologicznych).

Zagrożenia naturalnego środowiska człowieka mogą również wystąpić na skutek awarii, katastrof, klęsk żywiołowych, działań terrorystycznych. Wynikiem tych wypadków mogą być między innymi zagrożenia chemiczne, biologiczne, radiologiczne i pożarowe.

W krajach uprzemysłowionych w zakładach chemicznych magazynowane są bardzo duże ilości związków silnie trujących, tzw. toksycznych substancji przemysłowych (TSP). Są to zarówno surowce i półprodukty do syntez (np. chlor, amoniak, siarkowodór, arsenowodór, izocyjanian metylu, fosgen), jak i gotowe produkty (np. pestycydy). Substancje te swoją toksycznością niekiedy dorównują dawniej używanym bojowym środkom trującym lub wręcz nimi były (np. fosgen, cyjanowodór). Awaria bądź sabotaż, w wyniku których do środowiska w sposób nagły zostaną wprowadzone duże ilości TSP, może spowodować ogromne straty wśród ludności, a także wśród służb biorących udział w akcji ratowniczej, o ile nie będzie możliwości technicznych szybkiego wykrycia skażeń i określenia aktualnych i przewidywanych stref zagrożenia. Posiadanie efektywnego systemu wykrywania, analizy i lokalizacji skażeń chemicznych daje gwarancję odpowiednio wczesnego informowania o aktualnym i przewidywanym skażeniu.

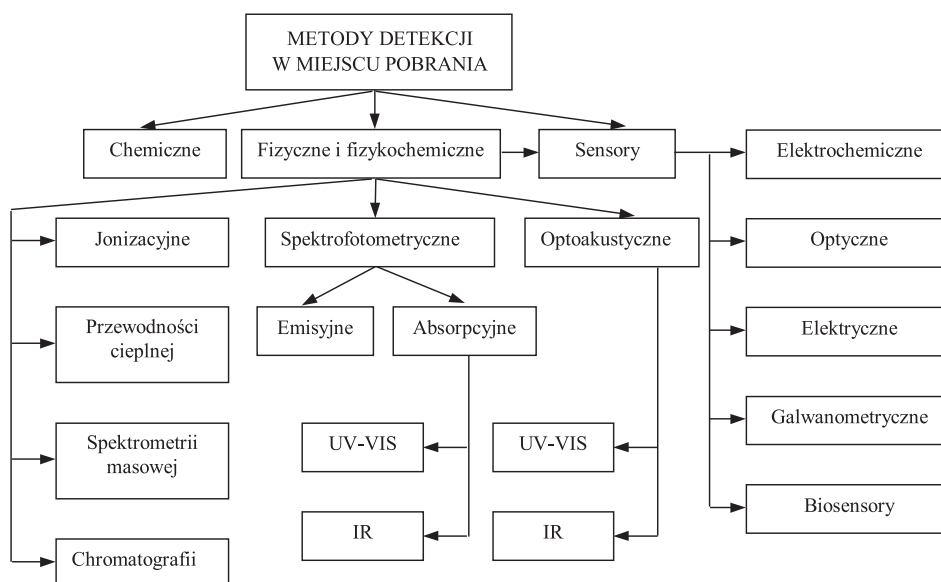
Ekspertki analizujący zagrożenia wywołane przez rozprzestrzenianie się technologii związanych z bronią masowego rażenia, oceniają, że technologie jądrowe znajdują się pod kontrolą i na tym polu niebezpieczeństwo nie powiększa się. Inna jest sytuacja w dziedzinie broni chemicznej, a zwłaszcza biologicznej. Technologie te nie wymagają tak zaawansowanych urządzeń, jak technologie jądrowe, a ponadto nie występuje wyraźna granica oddzielająca sprzęt służący do produkcji chemikaliów lub leków od sprzętu do produkcji gazów bojowych lub szczepów bakterii używanych jako broń biologiczna [1].

Metody stosowane w monitorowaniu atmosfery, z punktu widzenia sposobu pobierania próbek do analizy, można podzielić na dwie grupy: próbkowanie w miejscu występowania zanieczyszczeń (metody działania miejscowego, punktowe — „in situ”) [2] oraz zdalna detekcja, identyfikacja i pomiar stężenia w odległości od kilkuset metrów do kilkuset kilometrów (metody „stand-off” i „remote”) [3]. W pierwszej grupie metod, z powodu rozdzielania w czasie i przestrzeni miejsc pobrania próbki i jej analizy, dokładność i wiarygodność pomiarów jest ograniczona. Metody zdalne pozbawione są tych wad i w zależności od zastosowanej techniki pomiarowej umożliwiają prowadzenie monitorowania atmosfery nawet na wielokilometrowych odległościach. W zdalnej detekcji szczególną rolę odgrywają metody i technologie optoelektroniczne, które jako bardzo precyzyjne narzędzie do wykrywania i pomiaru stężenia zanieczyszczeń, w tym bojowych środków trujących i biologicznych środków masowego rażenia, stopniowo wypierają w systemach analizy skażeń dotychczas stosowane metody chemiczne i biochemiczne. Do najważniejszych zalet metod optoelektronicznych należy zaliczyć możliwość automatyzacji pomiaru, wiarygodność wyników, możliwość dokonywania pomiarów bez konieczności pobierania próbki, a także zintegrowanie różnych systemów elektrooptycznych w procesie akwizycji, przetwarzania i transmisji danych pomiarowych.

2. Metody optoelektroniczne monitorowania atmosfery

Metody wykrywania substancji niebezpiecznych w miejscu występowania stanowią obecnie zdecydowaną większość i można je podzielić na grupy przedstawione na rysunku 1.

Metody detekcji gazów, pyłów i aerozoli w powietrzu można podzielić także ze względu na miejsce przeprowadzenia pomiarów — analizę próbek w warunkach stacjonarnych w pomieszczeniach laboratoryjnych lub ciągłe monitorowanie w terenie otwartym. Do analizy pobieranych próbek „in situ” wykorzystywane są techniki analityczne o bardzo wysokiej czułości, takie jak spektrometria masowa, spektrometria ruchliwości jonów czy luminescencja. Klasyczna, bezpośrednia technika absorpcyjna w porównaniu do wymienionych metod charakteryzuje się nieporównywalnie mniejszą czułością [4].



Rys. 1. Podział metod wykrywania skażeń i zanieczyszczeń środowiska

Budowane w Wojskowej Akademii Technicznej, w oparciu o różne czujniki, systemy monitoringu środowiska opierają się najczęściej na łączeniu kilku oddzielnych przyrządów w jeden blok pomiarowy, sterowany komputerowo i przesyłaniu danych do stacji centralnych, często metodami łączności bezprzewodowej. Umożliwia to zbieranie informacji o poziomie zanieczyszczeń zarówno z dużego obszaru, jak i pojedynczych obiektów, np. lokali użytkowych, miejsc pracy, zakładów przemysłowych.

Metody detekcji zdalnej, bazujące na efektach oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z wykrywanymi substancjami, dzieli się na dwie zasadnicze grupy: metody aktywne — LIDAR-owe, w których analizuje się parametry sygnału wysyłanego przez urządzenie pomiarowe (laser) po jego oddziaływaniu z atmosferą i metody pasywne — LOPAIR (Long Path Infrared), w których analizuje się widmo promieniowania w podczerwieni (IR) emitowane przez badane otoczenie.

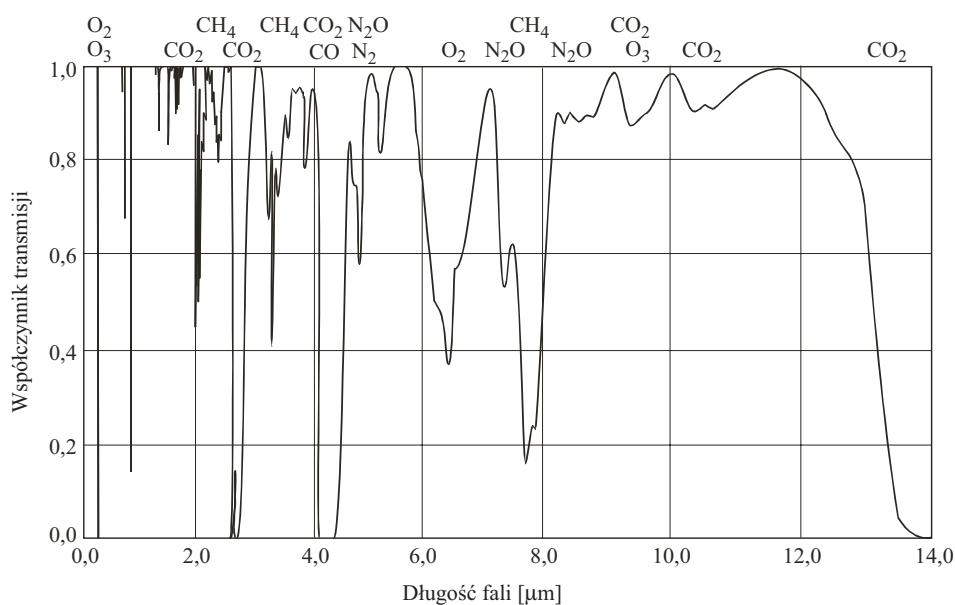
LIDAR jest akronimem angielskiego określenia Light Detection And Ranging, co oznacza wykrywanie obiektu i określanie jego położenia za pomocą światła. Podstawę działania wszystkich typów LIDAR-ów stanowią procesy oddziaływania promieniowania z materią: rozpraszanie Mie, rozpraszanie Rayleigha, rozpraszanie rezonansowe, rozpraszanie ramanowskie, fluorescencja i absorpcja. Procesy te odpowiadają różnym sposobom oddziaływania fotonów wyemitowanych w impulsie laserowym z cząsteczkami znajdującymi się w atmosferze. Stosowane obecnie LIDAR-y można podzielić na następujące rodzaje:

- **LIDAR rozproszeniowy** wysyła bardzo silne impulsy laserowe a następnie rejestruje sygnał powrotny będący wynikiem rozproszenia na aerozoluach lub pyłach w atmosferze. Jest stosowany do badania dymów kominowych, opadów atmosferycznych oraz chmur. Lidary rozproszeniowe wykorzystują zjawisko rozpraszania Mie na aerozoluach i pyłach w powietrzu. Najczęściej stosowanym w tych urządzeniach laserem jest laser Nd:YAG, generujący na $1,06 \mu\text{m}$ i wyższych harmonicznym.
- **LIDAR absorpcji różnicowej (DIAL)** sonduje przestrzeń dwoma wiązkami laserowymi: jedną, dostrojoną do pasma absorpcji określonej substancji gazowej oraz drugą, leżącą poza pasmem absorpcji, stanowiącą wiązkę odniesienia umożliwiającą ilościowy pomiar stężenia.
- **LIDAR ramanowski** wykorzystuje zjawisko przesunięcia częstości promieniowania rozproszonego na cząsteczkach gazu. Przesunięcie jest różne dla różnego typu cząsteczek, co umożliwia wykrycie oraz identyfikację określonego rodzaju substancji. Lidary ramanowskie wykorzystywane są do wykrywania pary wodnej, azotu lub tlenu. Szczególnie rozpraszanie wsteczne (Raman Backscattered Light) może być wykorzystywane do badań troposfery lub stratosfery, gdzie oprócz składu chemicznego, można przy pomocy lidarów ramanowskich mierzyć zdalnie na odległość temperaturę i szybkość wiatru. W lidarach ramanowskich najczęściej wykorzystywane jest promieniowanie lasera ekscimerowego XeF (351 nm) lub III harmoniczna lasera Nd:YAG (355 nm).
- **LIDAR fluorescencyjny** wysyła impulsy dostrojone do pasma absorpcji badanych substancji, zaabsorbowane promieniowanie wzbudza substancję do fluorescencji, która jest rejestrowana przez detektor. Lidary fluorescencyjne są stosowane do monitorowania rozkładu aerozoli w powietrzu i na podstawie odchyień od rozkładów standardowych sygnalizują pojawienie się podejrzanych skupisk cząsteczek (zarodników). Najczęściej stosowanym w tych urządzeniach laserem jest laser Nd:YAG, generujący na $1,06 \mu\text{m}$ i wyższych harmonicznym.
- **LIDAR dopplerowski**, stosowany do pomiaru prędkości wiatru oraz dynamiki różnego rodzaju turbulencji atmosferycznych, oparty jest na zjawisku Dopplera, które polega na przesunięciu częstości promieniowania diagnostycznego o wartość wynikającą z ruchu cząstek.

Zastosowanie LIDAR-u do wykrywania zanieczyszczeń atmosfery oznacza wiele wymiernych korzyści. Możliwe jest bowiem dokonywanie pomiarów emisji zanieczyszczeń bez konieczności wchodzenia na teren badanego przedsiębiorstwa lub trudnodostępnego obszaru oraz skuteczna kontrola emisji przez odpowiednie służby ochrony środowiska.

Podstawowe metody spektroskopowe stosowane w monitorowaniu środowiska to spektroskopia emisyjna, spektroskopia absorpcyjna i spektroskopia ramanowska. Metody klasycznej spektroskopii emisyjnej dotyczą wyłącznie próbek pobranych i są metodami, w których następuje destrukcja próbek spowodowana czynnikami wzbudzającymi (temperatura, prąd elektryczny, impuls laserowy). Wyjątkiem jest metoda laserowo wzbudzonej fluorescencji stosowana między innymi do wykrywania oraz identyfikacji zagrożeń biologicznych i niebezpiecznych substancji chemicznych [7].

Większość urządzeń optoelektronicznych stosowanych do monitorowania środowiska zbudowana jest ze sprzężonego układu nadajnik-odbiornik. Przestrzeń między nadajnikiem i odbiornikiem, zawierająca analizowane skażenia i zanieczyszczenia, w istotny sposób wpływa na transmisję promieniowania od źródła do systemu detekcji. Przy propagacji promieniowania laserowego w atmosferze mamy do czynienia z trzema głównymi zjawiskami: osłabianiem intensywności promieniowania w wyniku pochłaniania (absorpcji) i rozpraszania, zniekształceniem frontu falowego pod wpływem turbulencji i refrakcyjnym odchyleniem wiązki laserowej (to ostatnie zjawisko nabiera znaczenia przy propagacji na duże odległości). Tłumienie promieniowania w atmosferze wywołane jest głównie molekułami pary wodnej, dwutlenku węgla i ozonu. Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę transmisyjną atmosfery.



Rys. 2. Identyfikacja silnie pochłaniających gazów (z wyjątkiem pary wodnej) w widmie transmisji atmosfery

Tłumienie bardzo mocno zależy od długości fali promieniowania. Związane jest to z procesami rezonansowymi. Praktycznie każda substancja chemiczna ma charakterystyczne widmo absorpcji, które można wykorzystać do jej identyfikacji.

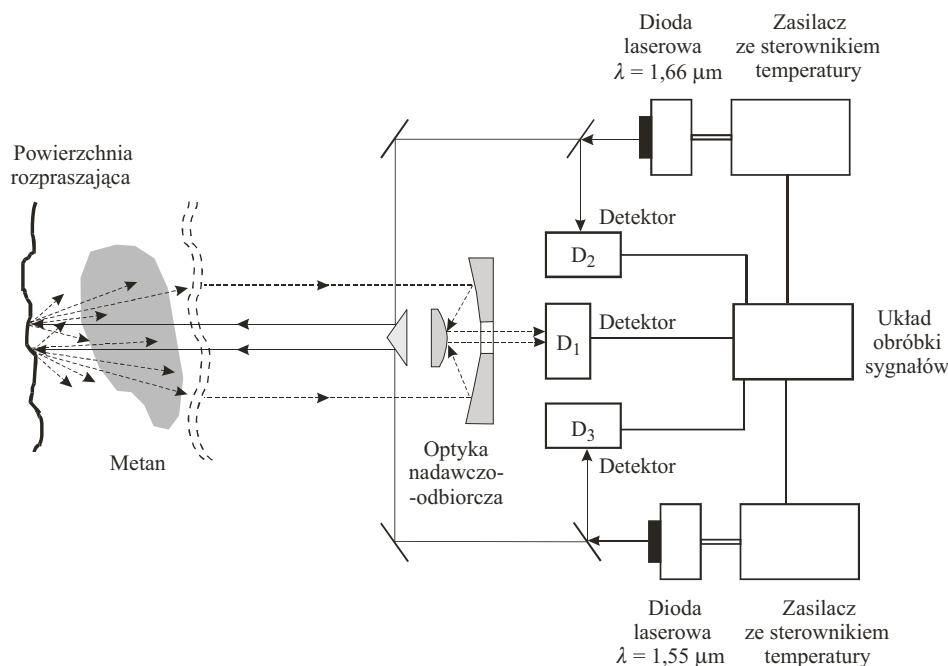
Transmisja atmosfery w paśmie długości fal od 0,5 do 14 mikrometrów wykazuje kilka charakterystycznych przedziałów, gdzie przezroczystość jest najwyższa: 0,5 do 0,8 μm , 0,95 do 1,05 μm , 1,15 do 1,35 μm , 1,5 do 1,8 μm , 2,1 do 2,4 μm , 3,3 do 4,2 μm , 4,5 do 5,1 μm , oraz 8 do 12,5 μm . W pasmach tych zwanych „oknami atmosferycznymi”, powinny pracować urządzenia do monitoringu skażeń i zanieczyszczeń atmosfery. Oczywiście, na faktyczny stan transmisji w atmosferze wpływa procentowa zawartość nie tylko wody i gazów, ale również gęstość atmosfery, temperatura, stan pogody, obecność w powietrzu pyłów i aerozoli, pora dnia, obecność mikroorganizmów itp.

W wielu ośrodkach badawczych na świecie prowadzone są badania nad zastosowaniem metod laserowych i optoelektronicznych do zdalnego wykrywania i pomiaru wycieków gazu ziemnego [8, 9]. W Instytucie Optoelektroniki WAT opracowano dwa takie systemy: aktywny system laserowy, oparty o ideę absorpcji różnicowej (DIAL), pracujący w paśmie 3,39 μm [10] oraz system pasywny, wykorzystujący absorpcję promieniowania słonecznego odbitego od otoczenia [11]. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry opracowanych systemów. System pasywny, zainstalowany na pokładzie śmigłowca wykorzystano do oznaczania stężenia metanu w różnych obszarach (tereny leśne, zurbanizowane, wysypiska śmieci itp.) oraz do monitorowania sieci przesyłowych gazu ziemnego z wysokości od 30 do 150 m.

TABELA 1
Podstawowe parametry techniczne systemów zdalnego wykrywania wycieków metanu [10, 11]

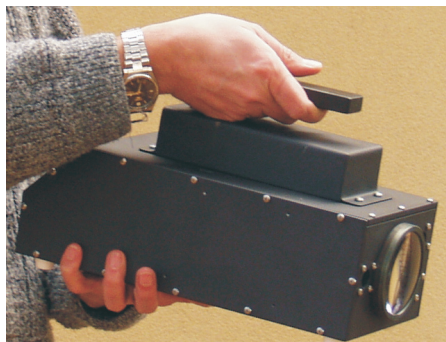
Parametr	System aktywny	System pasywny
Selektywność	metan	metan
Zasięg pomiaru	10 ÷ 50 m	do 150 m
Zakres widmowy	3,39 μm	1,66 μm
Dynamika pomiaru	10 ÷ 10 000 ppm	500 ÷ 500 000 ppm
Czułość	10 ppm	≤ 500 ppm
Błąd pomiaru	± 3%	± 5%
Czas pojedynczego pomiaru	1 sek	1 sek
Interface	RS-232	RS-232
Ciężar	15 kg	10 kg
Zasilanie	akumulator 12 V lub sieć 220 VAC	akumulator lub sieć pokładowa 12V

Na rysunku 3 przedstawiono schemat i zasadę działania opracowanego w WAT aktywnego, przenośnego systemu DIAL do zdalnej detekcji metanu, w którym zastosowano absorpcję promieniowania podczerwonego w obszarze pasma $1,66 \mu\text{m}$ [12]. Analizowane otoczenie oświetlane jest przez dwa lasery półprzewodnikowe, generujące promieniowanie o minimalnie różnych długościach fali, z których jedna — sygnałowa jest równa długości fali centrum pasma absorpcji metanu ($1,66 \mu\text{m}$), a druga — referencyjna, leży poza pasmem absorpcji ($1,55 \mu\text{m}$). Rozproszone, powracające do układu detekcyjnego promieniowanie jest rejestrowane różnicowo przez czuły detektor germanowy, a układ obróbki elektronicznej sygnałów wyznacza zmiany spowodowane przez absorpcję wiązki sygnałowej w metanie, znajdującym się na jej drodze.



Rys. 3. Schemat ideowy przenośnego systemu laserowego DIAL do zdalnej detekcji metanu i zasada jego działania

Opracowany przenośny czujnik metanu przedstawiony na fotografii 1 zapewnia pomiar stężenia metanu w zakresie $200\text{-}2000 \text{ ppm} \times \text{m}$, zasięg wykrywania metanu do 20 m oraz minimalną czułość $50 \text{ ppm} \times \text{m}$. Przyrząd może znaleźć zastosowanie do pomiarów emisji metanu na terenach zurbanizowanych (fotografia 2), rolniczych, wysypiskach śmieci, a także do wykrywania wycieków węglowodorów z rurociągów oraz do kontroli obszarów trudno dostępnych (linie przesyłowe i sieci dystrybucyjne gazu ziemnego, kopalnie).



Fot. 1. Przenośny system DIAL do zdalnego pomiaru stężenia metanu



Fot. 2. Zdalny pomiar stężenia metanu w terenie

3. Hybrydowe systemy wieloczuJNIKowe

Wzrastające zapotrzebowanie na proste w budowie, niezawodne oraz niedrogie urządzenia do automatycznego wykrywania, a także ciągłego monitoringu zanieczyszczeń i skażeń powietrza przyczyniło się do opracowania i wejścia na rynek nowej generacji przyrządów — analizatorów sensorowych. Element detekcyjny tych przyrządów stanowią czujniki, np. optyczne, chemiczne, grawimetryczne, elektrochemiczne, półprzewodnikowe, biochemiczne, które reagują na obecność i zmiany stężenia substancji w ich otoczeniu. Problematyka hybrydowych systemów wieloczuJNIKowych jest obecnie silnie rozwijana. Sensorowe analizatory skażeń i zanieczyszczeń mają bowiem szansę stać się podstawowymi przyrządami systemów wykrywania skażeń i zanieczyszczeń środowiska oraz monitoringu atmosfery.

Mechanizmy decydujące o reakcji czujnika (sensora) na obecność i zmiany stężenia substancji chemicznych w jego otoczeniu mogą mieć charakter chemiczny bądź fizyczny. Niekiedy trudno jest zakwalifikować sensor do jednej z wymienionych grup; dzieje się tak m.in. w przypadku czujników adsorpcyjnych. W zależności od zasady działania sensora, czyli rodzaju procesu fizycznego lub chemicznego zachodzącego w warstwie przypowierzchniowej materiału czułego chemicznie i w warstwie fazy badanej przylegającej do sensora, można je podzielić na następujące zasadnicze grupy: elektrochemiczne, elektryczne, grawimetryczne, termometryczne, magnetyczne, biochemiczne i optyczne.

Sensory elektrochemiczne stanowią przeważającą część wykorzystywanych praktycznie sensorów chemicznych. Zasada ich działania polega na elektrochemicznych przemianach analizowanej substancji w miniaturowych naczynkach specjalnej konstrukcji. W trakcie tych przemian generowany jest sygnał analityczny. Sensorami elektrochemicznymi są różnego typu elektrody, konstrukcyjnie przysto-

sowane do oznaczania wybranych substancji chemicznych w ściśle określonych układach pomiarowych. Wykorzystywane są elektrody różnych typów: inercyjne, aktywne chemicznie i modyfikowane. W zależności od sposobu pomiaru efektów reakcji elektrochemicznej, sensory elektrochemiczne dzielimy na potencjometryczne, woltamperometryczne, kulometryczne i konduktometryczne.

W sensorach elektrycznych wykorzystuje się zmiany elektrycznych parametrów ciał stałych — przewodnictwa, potencjału, ładunku — zachodzące w rezultacie oddziaływań substancji chemicznych obecnych w fazie ciekłej lub gazowej z powierzchnią ciała stałego. Reakcję czujnika poprzedza adsorpcja substancji oznaczanej na aktywnej powierzchni sensora. W sensorach elektrycznych nie zachodzą reakcje elektrochemiczne, jednakże formalnie niektóre z nich można potraktować jako elektrody z elektrolitem stałym, np. czujniki typu MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) i przewodnościowe — bazujące na półprzewodnikowych tlenkach metali.

Sensory grawimetryczne są detektorami czułymi na minimalne zmiany masy czujnika. Zmiany masy układu detekcyjnego są przetwarzane w sygnał elektryczny. Najefektywniejszymi przetwornikami tego typu są materiały piezoelektryczne. Adsorpcja oznaczanej substancji chemicznej na powierzchni piezoelektryka zmienia jego masę, co wywołuje proporcjonalną zmianę częstotliwości drgań własnych kryształu lub zmianę prędkości rozchodzenia się fal akustycznych na jego powierzchni. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z detektorami typu mikrowagi z objętościową falą sprężystą (QMB — Quartz Crystal Microbalance), w drugim — z detektorami z powierzchniową falą akustyczną (SAW — Surface Acoustic Wave).

Chemiczne sensory termometryczne działają na zasadzie pomiaru ilości ciepła wydzielanego (pochłanianego) podczas chemicznych reakcji substancji oznaczanej z materiałem warstwy aktywnej sensora lub efektów cieplnych absorpcji światła przez roztwór zawierający wykrywany związek chemiczny. W zależności od zastosowanej techniki pomiarowej, rozróżnia się sensory kalorymetryczne i przewodnościowe.

W chemicznych sensorach magnetycznych wykorzystuje się pomiar wielkości paramagnetycznych analizowanej mieszaniny gazów. Sensory te stosowane są przede wszystkim w analizatorach stężenia tlenu w różnych środowiskach gazowych.

Wspólną cechą biosensorów, wyróżniającą je spośród innych rodzajów sensorów chemicznych jest wykorzystywanie do generacji sygnału analitycznego materiałów (substancji) biologicznie i biochemicznie aktywnych. Funkcjonalnie biosensory można przyrównać do bioreceptorów żywego organizmu, które, mają zdolność przekształcania różnego rodzaju sygnałów fizycznych i chemicznych w sygnał elektryczny. Elementem aktywnym biosensora są bardzo różnorodne materiały biologiczne: białka, enzymy, antyciała i antygeny, hormony, kwasy nukle-

inowe, mikroorganizmy, fragmenty tkanek, pojedyncze komórki, organelle komórkowe itp. Ogólna konstrukcja biosensora jest zbliżona do budowy sensora chemicznego — chemicznie czuły element biologiczny (biochemiczny) jest sprzężony z przetwornikiem sygnału analitycznego w elektryczny, który jest dalej analizowany i obrabiany w bloku elektronicznym.

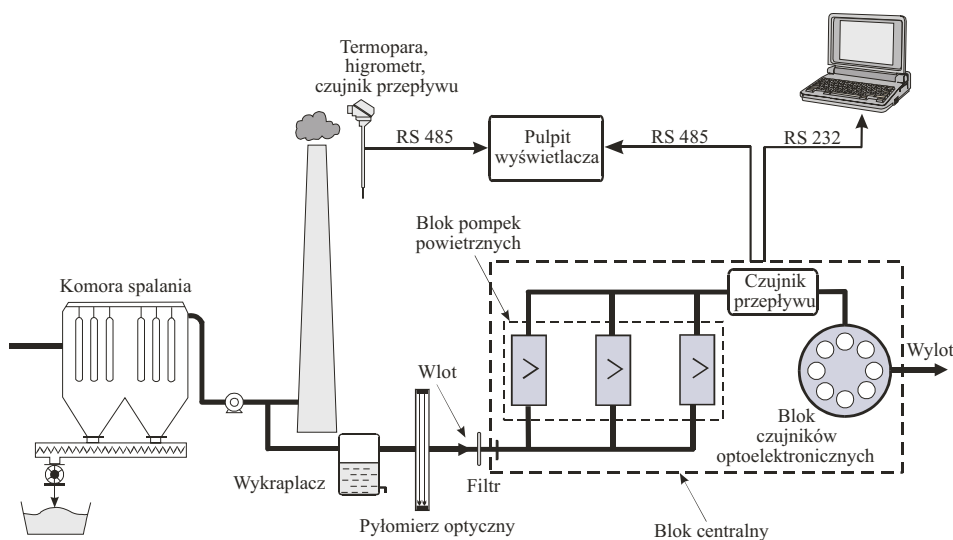
Zasada działania sensorów optycznych polega na pomiarach zmian parametrów strumienia świetlnego, wywołanych obecnością substancji chemicznej. Elementem detekcyjnym jest warstwa aktywnego optycznie związku chemicznego, zmieniającego swoje właściwości optyczne w wyniku oddziaływań z oznaczaną substancją. W zależności od charakteru i przyczyn zmian parametrów strumienia świetlnego, rozróżnia się sensory spektrofotometryczne, luminescencyjne i opto-termiczne.

W opracowanych w Wojskowej Akademii Technicznej hybrydowych systemach ciągłego monitoringu powietrza stosowane są standardowo czujniki optyczne (detekcja O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , CO_2 , HCl , HF , C_nH_m , CH_4), czujniki półprzewodnikowe (detekcja NO_2 , NO , H_2S , CO , NH_3), czujniki elektrochemiczne (detekcja O_2 , O_3 , SO_2 , NO , CO , CO_2 , HCl , HF) oraz czujniki fotoakustyczne (detekcja CO_2 , CO , SO_2 , H_2S , C_nH_m , C_6H_5-R). Systemy skonstruowane są z modułów funkcjonalnych, konfigurowanych zgodnie z analitycznym zapotrzebowaniem. Mogą być rozbudowane o dodatkowe czujniki wybranych gazów, dodatkowe funkcje pomiarowe oraz systemy transmisji i przetwarzania danych.

Jednym z praktycznych zastosowań opracowanych systemów jest monitoring emisji zanieczyszczeń w Zakładzie Termicznej Utylizacji Odpadów Medycznych w Bydgoszczy. Urządzenie zapewnia analizę gazów wylotowych oraz pomiar koncentracji pyłów emitowanych przez komin spalarni. Pomiary dokonywane są w sposób ciągły, a opracowane oprogramowanie zapewnia akwizycję i prezentację danych pomiarowych, tworzenie baz danych, a także raportowanie zgodnie z wymaganiami służb ochrony środowiska. Schemat ideowy systemu prezentuje rysunek 4, natomiast fotografia 3 przedstawia opracowany analizator spalin z blokiem czujników optoelektronicznych.

Analizator wyposażony jest w blok czujników optoelektronicznych, składający się z siedmiu par optoelektronicznych, tzw. optopar. Optopara zbudowana jest z zespolonego detektora i źródła światła w trwałej obudowie, stanowiącej przepływową komorę pomiarową. W zależności od wielkości stężeń i współczynników absorpcji analizowanych gazów budowane są komory pomiarowe o różnej długości drogi optycznej. W opracowanym analizatorze spalin, ze względu na konieczność oznaczania stosunkowo niskich stężeń analizowanych gazów, zastosowano komorę pomiarową o długości 50 cm.

Zasadę działania optopary wyjaśnia rysunek 5. Promieniowanie emitowane przez źródło światła (np. diodę elektroluminescencyjną LED lub promiennik podczerwieni) przechodzi przez komorę pomiarową z analizowanym gazem, dzielono-

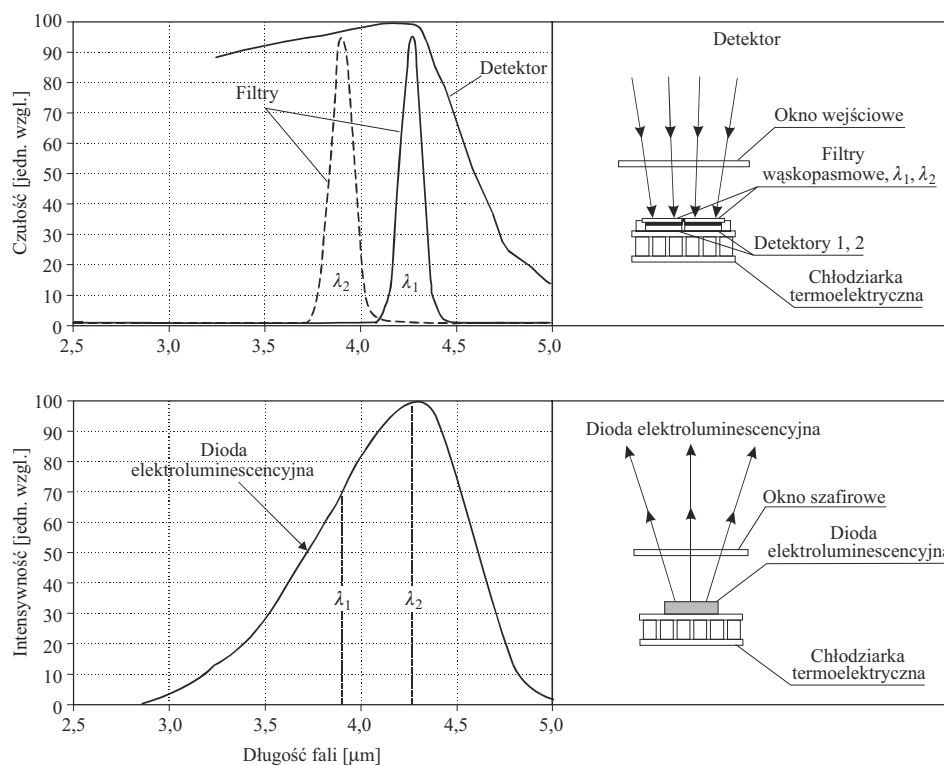


Rys. 4. Schemat ideowy systemu monitoringu emisji zanieczyszczeń zastosowany w Zakładzie Termicznej Utylizacji Odpadów Medycznych w Bydgoszczy



Fot. 3. Analizator spalin z blokiem czujników optoelektronicznych do oznaczania stężenia SO_2 , NO_x , CO , CO_2 , HCl , HF , C_nH_m

ne jest na dwie wiązki i analizowane przez detektory w zakresie pasma pochłaniania (λ_1) i poza tym pasmem w kanale referencyjnym (λ_2). Przed czułymi elementami detektorów wbudowane są odpowiednie wąskopasmowe filtry interferencyjne. W układzie mikroprocesora następuje wyznaczenie amplitud sygnałów z toru pomiarowego i referencyjnego i obliczenie stężenia gazu.



Rys. 5. Zasada działania optopary. Porównanie charakterystyk spektroskopowych źródła promieniowania i układu detekcji dla czujnika CO₂

Opracowany system zapewnia pomiar stężenia następujących gazów:

Rodzaj gazu	Zakres pomiarowy (emisja stała)	Dokładność	Długość fali toru pomiarowego (λ_1)
NO _x	0-200 mg/m ³	5%	5,3 μm
CO	0-1000 mg/m ³	5%	4,7 μm
SO ₂	0-100 mg/m ³	5%	7,3 μm
HCl	0-100 mg/m ³	5%	3,6 μm
HF	0-30 mg/m ³	5%	1,3 μm
C _n H _m	0-20 mg/m ³	5%	3,4 μm
CO ₂	0,03-5%	5%	4,2 μm
O ₂	0-25%	2%	(czujnik elektrochemiczny)

5. Podsumowanie

Stosowane powszechnie klasyczne metody monitoringu skażeń i zanieczyszczeń, w tym preferowane obowiązującymi przepisami metody chemii mokrej, chromatografii i analizy płomieniowej, okazują się pod wieloma względami mało konkurencyjne w stosunku do metod wykorzystujących sensory elektrooptyczne. Nowoczesne metody i technologie optoelektroniczne wykorzystujące układy generacji, wzmacniania, modulacji, detekcji, rejestracji i przetwarzania światła, opierają się na wykorzystaniu takich zjawisk fizycznych, jak absorpcja, fluorescencja, dyfrakcja i rozpraszanie. Umożliwia to zarówno zlokalizowanie zagrożenia (chemicznego, biologicznego) i dokonanie jego identyfikacji, jak również określenie koncentracji w czasie rzeczywistym. Ponadto możliwa jest zdalna detekcja zanieczyszczeń oraz pełna automatyzacja pomiarów poprzez zintegrowanie różnych systemów elektrooptycznych w procesie akwizycji, przetwarzania i transmisji danych. Połączenie różnych technik pomiarowych oraz czujników (np. optopary UV-VIS-IR, spektrometry ruchliwości jonów, detektory półprzewodnikowe i elektrochemiczne, układy akustooptyczne, światłowodowe itp.) znacznie rozszerza możliwości pomiarowe optoelektronicznych systemów monitoringu środowiska, zapewniając selektywność i wysoką dokładność wyników pomiarów.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2005 r.

LITERATURA

- [1] Jane's NBC Protection Equipment 2001-2002, Jane's Defence Data, 2001.
- [2] A. C. SAMUELS, F. C. DELUCIA, K. L. MCNESBY, A. W. MIZIOLEK, *Laser-induced breakdown spectroscopy of bacterial spores, molds, pollens and protein: initial studies of discrimination potential*, Applied Optics, vol. 42, no. 30, 2003, pp. 6205-6209.
- [3] A. BEIL, R. DAUM, T. JOHNSON, *Detection of chemical agents in the atmosphere by passive IR remote sensing*, in Internal Standardization and Calibration Architectures for Chemical Sensors, Proceedings of SPIE, vol. 3856, 2000, pp. 44-56.
- [4] R. HARIG, G. MATZ, *Toxic Cloud imaging by Infrared Spectrometry: A Scanning FTIR System for Identification and Visualization*, Field Analytical Chemistry and Technology, 5 (1-2), 2001, pp. 75-90.
- [5] G. LAUFER, *Passive stand-off detection of chemical vapors using differential absorption radiometry*, Fifth Joint Conference on Standoff Detection for Chemical and Biological Defense, vol. 72, 2001, pp. 107-116.
- [6] Y. S. CHENG, E. B. BARR, B. J. FAN, P. J. HARGIS, D. J. RADER, T. J. O'HERN, J. R. TORCZYNSKI, G. C. TISONE, B. L. PREPARNAU, S. A. YOUNG, R. J. RADLOFF, *Detection of Bioaerosols Using Multiwavelength UV Fluorescence Spectroscopy*, Aerosol Science and Technology 30, 1999, pp. 186-201.

- [7] M. KWAŚNY, Z. MIERCZYK, *Laser fluorescence spectrometers for medical diagnosis*, Proc. SPIE, vol. 4238, 2000, pp. 69-79.
- [8] A. NADEZHINSKII, A. BEREZIN, S. CHERNIN, O. ERSHOV, *High sensitivity methane analyzer based on tuned near infrared diode laser*, Spectrochimica acta, Part A 55, 1999, 2083-2089.
- [9] T. ISEKI, H. TAI, K. KIMURA, *A portable remote methane sensor using a tunable diode laser*, Meas. Sci. Technol., 11, 2000, 594-602.
- [10] M. KOPICA, Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, K. KOPCZYŃSKI, M. STRZELEC, *Simple Laser System for detection of hydrocarbons*, Proc. SPIE — Conference on Standoff Detection for Chemical and Biological Defence, D. vol. 72, 2001, pp. 1-3.
- [11] M. STRZELEC, K. KOPCZYŃSKI, M. KOPICA, M. KWAŚNY, Z. MIERCZYK, *Zdalna detekcja uchożeń metanu metodą absorpcji promieniowania słonecznego w zakresie bliskiej podczerwieni*, Biul. WAT, 51, 2002, 65-90.
- [12] M. KWAŚNY, Z. MIERCZYK, K. KOPCZYŃSKI, A. GIETKA, A. GAWLIKOWSKI, M. ZYGMUNT, A. MŁODZIANKO, *Przenośny czujnik do zdalnej detekcji metanu*, Materiały konferencji Optoelektronika 2004, Poznań, 14-15.06.2004, 2004, 100-102.

A. GIETKA, Z. MIERCZYK, M. MUZAL

Optoelectronic systems for remote detection of contaminations and atmosphere pollution

Abstract. The paper presents two types of remote monitoring systems: “remote” and “stand-off” ones. “Stand-off” systems can be used for detection of pollution (gas, aerosol, smoke, dust) from a long distance without the contact with a polluted area. These are active laser systems (lidars) or passive thermovision systems with narrow filters matched with the bands of gases absorption and imaging the changes of transmission of the radiation absorbed at the path of gas presence. Single station of “stand-off” type can cover a significant area, the size of which depends on sampling radiation range, field of view, and scanning velocity. “Remote” type systems employ various point sensors and the data from these sensors are sent to alarm centers through wire or wireless connections. It should be pointed out that in this case the contact of a sensor with an analyzed area is indispensable and remote detection is performed due to the systems of measuring data transmission. The paper presents also design, principle and basic analytical characteristics of the chosen “stand-off” and “remote” measuring systems devoted to continuous monitoring of contamination and atmosphere pollution developed at the Military University of Technology.

Keywords: optoelectronic sensors, optoelectronic devices, atmosphere pollution — detection, contamination — detection

Universal Decimal Classification: 621.38:535.8

