

## Zbigniew BIELECKI<sup>1</sup>, Jacek WOJTAS<sup>1</sup>, Tadeusz STACEWICZ<sup>2</sup>, Janusz MIKOŁAJCZYK<sup>1</sup>, Beata RUTECKA<sup>1</sup>, Robert MĘDRZYCKI<sup>1</sup>, Artur PROKOPIUK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

<sup>2</sup>UNIwersytet Warszawski, WYDZIAŁ FIZYKI, ul. Hoża 69, 00-068 Warszawa

### Optoelektroniczne sensory gazów

#### Prof. dr hab. inż. Zbigniew BIELECKI

Kierownik Zespołu Detekcji Sygnałów Optycznych w IOE WAT. Ekspert w dziedzinie detekcji sygnałów optycznych, metrologii optoelektronicznej, oraz sensorów optoelektronicznych. Autor i współautor czterech monografi i oraz około 300 artykułów i opracowań konferencyjnych. Członek Polskiego Komitetu Optoelektroniki, Polskiego Towarzystwa Fotonicznego, Komitetu Metrologii Aparatury Pomiarowej PAN a także komitetów naukowych kilkunastu konferencji krajowych i międzynarodowych.

e-mail: [zbielecki@wat.edu.pl](mailto:zbielecki@wat.edu.pl)



#### Mgr inż. Beata RUTECKA

Jest absolwentką Wydziału Elektroniki WAT z 2008 roku. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskała w specjalności optoelektronika. Działalność naukową rozpoczęła w 2008 roku w Instytucie Optoelektroniki WAT. Zajmuje się tematyką związaną z optoelektronicznymi sensorami niebezpiecznych gazów i materiałów wybuchowych. Od października 2009 roku kontynuuje naukę na studiach III-go stopnia na Wydziale Nowych Technologii i Chemii.

e-mail: [brutecka@wat.edu.pl](mailto:brutecka@wat.edu.pl)



#### Mjr dr inż. Jacek WOJTAS

Jest specjalistą w dziedzinie detekcji sygnałów optycznych, metrologii optoelektronicznej, optoelektronicznych sensorów niebezpiecznych gazów i materiałów wybuchowych. Tytuł magistra inżyniera uzyskał na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2002 roku. Działalność naukową w Instytucie Optoelektroniki WAT rozpoczął w 2003 roku. W 2007 r. obronił rozprawę doktorską, która dotyczyła detekcji śladowych stężeń gazów metodami optoelektronicznymi.

e-mail: [jwojtas@wat.edu.pl](mailto:jwojtas@wat.edu.pl)



#### Mgr inż. Robert MĘDRZYCKI

Ukończył studia w Wojskowej Akademii Technicznej w 2008 roku. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał w specjalności optoelektronika na Wydziale Elektroniki. Od zakończenia studiów pracuje w Zespole Detekcji Sygnałów Optycznych w Instytucie Optoelektroniki. Zajmuje się tematyką związaną z optoelektronicznymi sensorami niebezpiecznych gazów i par materiałów wybuchowych.

e-mail: [rmedrzycki@wat.edu.pl](mailto:rmedrzycki@wat.edu.pl)



#### Prof. dr hab. Tadeusz STACEWICZ

Kierownik Zakładu Optyki IFD WF UW. Ekspert w dziedzinie absorpcyjnej spektroskopii laserowej, laserowej plazmy niskotemperaturowej i oddziaływania rezonansowego promieniowania laserowego z materią. Autor i współautor pięciu monografi i oraz około 250 artykułów i opracowań konferencyjnych. Członek Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

e-mail: [tadstac@fuw.edu.pl](mailto:tadstac@fuw.edu.pl)



#### Mjr mgr inż. Artur PROKOPIUK

W 1998 roku ukończył studia wyższe w specjalności urzędzenia optoelektroniczne na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Zajmuje się pracami dotyczącymi nanotechnologii, wykorzystaniem funkcjonalnych cienkich warstw dla potrzeb techniki i medycyny oraz hybrydowym osadzaniem powłok metodami laserowymi, rozpylania magnetyronowego oraz chemicznego osadzania z fazy gazowej.

e-mail: [aprokopiuk@wat.edu.pl](mailto:aprokopiuk@wat.edu.pl)



#### Plk dr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki WAT. Od 2003r. pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Prowadzi prace naukowe z zakresu zaawansowanych metod detekcji sygnałów optycznych i ich zastosowania m.in. w ochronie obiektów, telekomunikacji, detekcji materiałów wybuchowych i skażeń, diagnostyce źródeł i detektorów promieniowania. Bierze aktywny udział w pracach zespołów zajmujących się problematyką C-IED działających w ramach struktur RTO NATO oraz EDA.

e-mail: [jmikolajczyk@wat.edu.pl](mailto:jmikolajczyk@wat.edu.pl)



### Optoelectronic gas sensors

#### Abstract

The paper presents an overview of a few optoelectronic technologies for gases detection. Two sensors of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) are also described. In the sensors the cavity enhanced absorption spectroscopy was applied. It is characterized by a very good sensitivity and selectivity of the detection process. The main aspect of its operation bases on absorption of the light by specific compounds. The identification of the matter is determined by spectral matching of the two spectra: optical radiation and absorption lines of species of interest. In contrast to the remote detection methods, the measurements are made at the place of sampling. Polish laser diodes and modern quantum cascade lasers were used there. Laser emission wavelengths were located in the visible (410 nm) and infrared range. The detection limit of ppb level was achieved. Due to that, they can be successfully applied to monitoring of atmospheric pollution, explosives detection and in diseases diagnosis. The preliminary studies using the developed sensors showed that it was possible to detect explosives such as TNT, PETN, RDX, HMX at the level of ng. Additionally, there is also discussed application of sensors to analysis of the exhaled air. This will be particularly useful for: the early detection of a disease, the monitoring of the therapy, the monitoring of the greenhouse exogenous (bacterial emissions or toxins), or the analysis of metabolic gases.

**Keywords:** gas sensors, cavity ring-down spectroscopy, explosives detection, breath analyses.

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono prace dotyczące optoelektronicznych sensorów gazów oraz osiągnięcia własne w zakresie wykrywania tlenków azotu (NO<sub>x</sub>). W sensorach do wykrywania NO<sub>x</sub> zastosowano polskie lasery emitujące promieniowanie o długości fali 410 nm oraz nowoczesne kwantowe lasery kaskadowe na zakres podczerwieni. Opracowane sensory charakteryzują się czułością graniczną na poziomie ppb i mogą być zastosowane do monitoringu zanieczyszczeń atmosfery, wykrywania materiałów wybuchowych oraz w diagnostyce chorób.

**Słowa kluczowe:** sensory gazów, spektroskopia strat we wnęce optycznej, wykrywanie materiałów wybuchowych, analiza wydychanego powietrza.

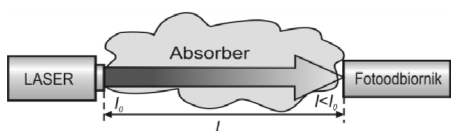
## 1. Wprowadzenie

Do niedawna do wykrywania gazów stosowano głównie sensory chemiczne. Idea pracy tych sensorów polegała na wykorzystaniu określonych reakcji chemicznych, których przebieg oraz powstałe produkty końcowe mogą świadczyć o obecności poszukiwanej substancji. Nowoczesne sensory tego typu są zazwyczaj bardzo drogimi oraz kłopotliwe w eksploatacji, szczególnie w warunkach terenowych. Umożliwiają one wykrywanie gazów o bardzo małym stężeniu, nawet poniżej 1 ppb (ang. *parts per billion*). Osiągnięcie zbliżonych wartości czułości, a niekiedy nawet wyższych, umożliwiają sensory optoelektroniczne wykorzystujące metody spektroskopowe. W sensorach tych własności badanej próbki określa się na podstawie zmierzonej charakterystyki widmowej promieniowania rozproszonego, emitowanego lub transmitowanego przez próbkę. Ich główną zaletą jest nie tylko duża czułość, ale także możliwość selektywnego pomiaru koncentracji wybranego gazu. Rosnąca popularność tych sensorów jest również wynikiem szybkiego rozwoju technologii źródeł i detektorów promieniowania optycznego. Sensory gazów, w których są stosowane kwantowe lasery kaskadowe oraz moduły detekcyjne z fotodiodami HgCdTe stają się konkurencyjne pod względem parametrów użytkowych i metrologicznych dla analizatorów wykorzystujących chemiluminescencję, chromatografię gazową czy spektrometrię ruchliwości jonów.

W artykule przedstawiono sensory, w których zastosowano metodę zw. spektroskopią strat we wnęcie optycznej (SWWO). Jest ona zaliczana do najczulszych metod absorpcyjnych, umożliwiających wykrywanie śladowych ilości materii. W metodzie tej, do wykrywania i do pomiaru koncentracji określonych cząsteczek stosuje się zjawisko absorpcji promieniowania optycznego o odpowiednio dobranej długości fali. W odróżnieniu od metod zdalnych, pomiary odbywają się w miejscu pobrania próbki, jednak charakteryzują się znacznie większymi czułościami.

## 2. Idea spektroskopii absorpcyjnej i SWWO

Ideę metody absorpcyjnej przedstawiono na rys. 1. W metodzie tej stosuje się laser, którego długość fali jest dopasowana do pasma absorpcji badanego gazu, oraz fotoodbiornik rejestrujący promieniowanie. Między źródłem a fotoodbiornikiem znajduje się badany biomarker.



Rys. 1. Idea metody absorpcyjnej  
Fig. 1. Idea of the absorption method

Natężenie promieniowania optycznego przechodzącego przez absorber można opisać prawem Lamberta-Beera

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\alpha(\nu)L), \quad (1)$$

gdzie  $I_0(\nu)$  jest natężeniem promieniowania emitowanym przez laser,  $\alpha$  jest współczynnikiem ekstynkcji,  $L$  jest długością drogi optycznej, jaką pokonuje światło w absorberze.

Współczynnik  $\alpha$  zależy od stężenia molekuł  $N$  badanego gazu, oraz od przekroju czynnego na absorpcję  $\sigma(\nu)$

$$\alpha(\nu) = \sigma(\nu)N. \quad (2)$$

Dla  $\alpha \ll 1$  można zapisać

$$\exp(-\alpha(\nu)L) \approx 1 - \alpha(\nu)L, \quad (3)$$

zatem

$$\alpha(\nu) = \frac{I_0(\nu) - I(\nu)}{I_0(\nu)L}. \quad (4)$$

Wyznaczone doświadczalnie wartości  $I_0(\nu)$  oraz  $I(\nu)$ , przy znanej długości  $L$ , umożliwiają wyznaczenie z zależności (2) stężenia molekuł badanego gazu.

$$N_{\min} = \frac{I_0(\nu) - I(\nu)}{I_0(\nu)L\sigma(\nu)} = \frac{\Delta I}{I_0(\nu)L\sigma(\nu)}. \quad (5)$$

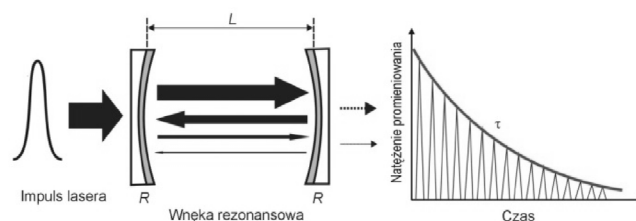
Ograniczeniem tej metody jest niepewność wyznaczenia zmiany  $\Delta I/I_0$  spowodowana ekstynkcją.

Żeby uzyskać dużą czułość takiego systemu, należy dokonać minimalizacji wpływu źródeł szumowych układu. Jednakże, pomimo tych zabiegów, w prostym układzie detekcyjnym, uzyskuje się zdolność detekcji  $\alpha$  rzędu  $10^{-2}$ - $10^{-4}$   $\text{cm}^{-1}$ . Jak wynika z równania (5), poprawę czułości można uzyskać poprzez wydłużenie drogi optycznej promieniowania  $L$ . W tym celu są stosowane komórki wieloprześciowe (Herriot'a i White'a). W komórkach tych dzięki wielokrotnym odbiciom wiązki światła między zwierciadłami uzyskuje się wydłużenie drogi optycznej 10-100 razy [1]. Zatem możliwy jest pomiar współczynnika absorpcji rzędu  $10^{-8}$   $\text{cm}^{-1}$ .

Uzyskanie jeszcze większych czułości umożliwiają systemy TDLAS (ang. *Tunable diode laser absorption spectroscopy*), ICOS (ang. *Integrated Cavity Output Spectroscopy*), SWWO w tym CRDS (ang. *Cavity Ring-Down Spectroscopy*) oraz CEAS (ang. *Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy*). Metody te są opisane w wielu pracach, w tym w pracach autorów niniejszej publikacji [1].

W systemach TDLAS stosowane są lasery przestrajalne. Częstotliwość środkowa lasera jest dopasowana do pasma absorpcji mierzonego gazu. W wyniku cyklicznego przestrajania lasera, względem długości fali promieniowania, przy której występuje maksymalne pochłanianie, otrzymuje się zmienny sygnał napięciowy, na podstawie, którego można obliczyć koncentrację badanego gazu. W układach detekcyjnych zazwyczaj są stosowane układy *Lock-In*. Systemy TDLAS umożliwiają uzyskanie granicy detekcji rzędu  $10^{-4}$ - $10^{-6}$   $\text{cm}^{-1}$  [2].

W sensorach SWWO impuls promieniowania optycznego wprowadzony do wnęki przez jedno ze zwierciadeł, ulega w jej wnętrzu wielokrotnemu odbiciu. Po każdym odbiciu niewielka część promieniowania opuszcza rezonator i jest rejestrowana przez fotodetektor (rys. 2). Sygnał na wyjściu fotodetektora jest proporcjonalny do natężenia promieniowania propagującego się wewnątrz wnęki optycznej. Natężenie to zanika w czasie wskutek strat w rezonatorze.



Rys. 2. Idea metody SWWO  
Fig. 2. Idea of the CRDS

Gdy wnękę wypełnia absorber (gaz), wówczas jej dobroć zmniejsza się na skutek strat i następuje skrócenie czasu zaniku promieniowania. Możliwy jest zatem pomiar współczynnika absorpcji i koncentracji badanego gazu. Dzięki tej metodzie uzyskuje się czułości poniżej 1 ppb.

Jeżeli czas trwania impulsu laserowego jest bardzo krótki i wzbudzony zostaje tylko główny mod poprzeczny wnęki, wówczas obserwuje się wykładniczy zanik natężenia promieniowania

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (6)$$

Czas zaniku sygnału we wnęcie ( $\tau$ ) zależy od długości rezonatora  $L$ , współczynnika odbicia zwierciadeł  $R$ , współczynnika ekstynkcji  $\alpha$ , czyli rozpraszania i absorpcji promieniowania zachodzących w gazie wypełniającym wnękę

$$\tau = \frac{L}{c(1-R+\alpha L)}, \quad (7)$$

gdzie  $c$  oznacza prędkość światła.

Wyznaczenie koncentracji badanego gazu przebiega dwuetapowo. Najpierw wykonywany jest pomiar czasu zaniku sygnału  $\tau_0$  we wnęcie optycznej nie zawierającej badanego gazu, a następnie pomiar czasu zaniku sygnału  $\tau$  we wnęcie wypełnionej badanym gazem. Znając przekrój czynny na absorpcję  $\sigma$  badanego gazu, jego koncentrację można obliczyć ze wzoru

$$K = \frac{1}{c\sigma} \left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right), \quad (8)$$

w którym

$$\tau_0 = \frac{L}{c(1-R)}. \quad (9)$$

Na podstawie powyższych zależności można określić najmniejszą koncentrację cząsteczek badanego gazu, tzw. koncentracją graniczną  $K_{GR}$ , przy której widoczna jest absorpcja

$$K_{GR} = \frac{1}{c\sigma\tau_0} \delta\tau = \frac{(1-R)}{\sigma L} \delta\tau, \quad (10)$$

gdzie  $\delta\tau$  jest względną niepewnością pomiaru czasu zaniku sygnału we wnęcie.

Pomiędzy względną niepewnością  $\delta\tau$  oraz czasem zaniku  $\tau_0$  zachodzi następująca zależność

$$\delta\tau = \frac{\tau_0 - \tau_{GR}}{\tau_0} \cdot 100, \quad (11)$$

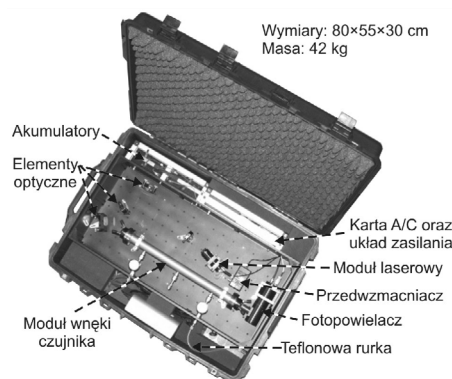
w której  $\tau_{GR}$  oznacza czas zaniku sygnału we wnęcie dla koncentracji granicznej.

Granica detekcji  $K_{GR}$  jest funkcją dwóch zmiennych: czasu zaniku dla wnęki pustej  $\tau_0$  oraz niepewności pomiaru czasu zaniku  $\delta\tau$ . Czas zaniku  $\tau_0$ , zgodnie ze wzorem (9), zależy od długości rezonatora i współczynnika odbicia zwierciadeł. Im dłuższy jest ten czas, czyli im dłuższa efektywna droga absorpcji, tym większa jest czułość i mniejsze stężenia absorbera mogą być mierzone.

### 3. Wykrywanie materiałów wybuchowych i analiza wydychanego powietrza

W ramach prac rozwojowych prowadzonych w IOE WAT we współpracy z Uniwersytetem Warszawskim oraz z firmami TopGaN i Vigo System S.A., opracowano szereg sensorów pracujących w zakresie promieniowania widzialnego i podczerwonego.

Na rysunku 3 przedstawiono fotografię optoelektronicznego sensora opracowanego do pomiaru śladowych stężeń ditlenku azotu. Głównymi elementami sensora są: wnęka optyczna o dużej dobroci, fotoodbiornik o dużej czułości oraz półprzewodnikowy laser impulsowy. Parametry tych elementów zostały dopasowane do maksymalnego przekroju czynnego na absorpcję ditlenku azotu ( $\text{NO}_2$ ). Należy podkreślić, że w sensorze tym zastosowano polski niebieski laser firmy TopGaN [2].



Rys. 3. Przenośny sensor ditlenku azotu  
Fig. 3. The portable nitrogen dioxide sensor

W sensorach pracujących w zakresie podczerwieni (np. do wykrywania tlenku azotu) zastosowano jednomodowe lasery kaskadowe (QCL). Charakteryzują się one dużą mocą oraz dużą stabilnością długości fali emitowanego promieniowania. Długość fali może być przestrajana przez regulację natężenia prądu zasilającego laser lub przez zmianę jego temperatury pracy. Z tego względu wymagana jest duża dokładność regulacji punktu pracy lasera (napięcia i prądu zasilania oraz temperatury pracy). Do tej pory stosowano lasery produkowane w szwajcarskiej firmie Alps Lasers SA. Aktualnie prowadzone są prace w zakresie zastosowania laserów, które są opracowywane w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie w zespole prof. M. Bugajskiego [3].

Do detekcji promieniowania optycznego w zakresie podczerwieni zastosowano moduły detekcyjne firmy VIGO System S.A. Składają się one z fotodiod  $\text{HgCdTe}$  oraz niskoszumowych przedwzmacniaczy transimpedancyjnych. W celu uzyskania wykrywalności bliskiej BLIP (ang. *Background Limited Infrared Photodetector*) fotodiody te są chłodzone za pomocą chłodziarek termoelektrycznych.

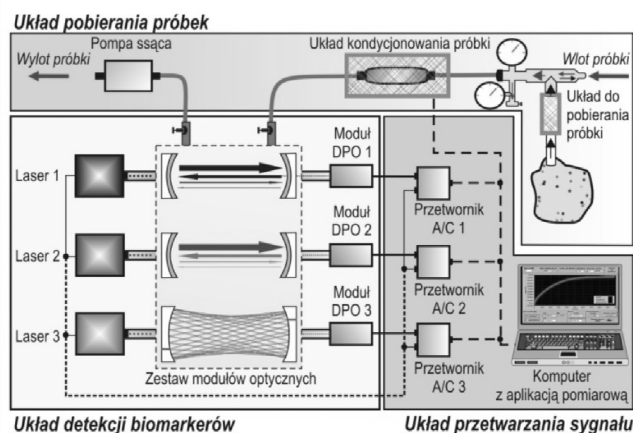
We wszystkich opracowanych sensorach, sygnał analogowy otrzymany z modułu detekcyjnego jest próbkowany w przetworniku analogowo-cyfrowym (A/C). Próbkę cyfrową są następnie transmitowane za pośrednictwem interfejsu USB do komputera. W zespole autorów została opracowana specjalna aplikacja, która umożliwia analizę danych, oraz wyznaczenie koncentracji badanego gazu zgodnie z zależnością 8.

Aktualnie trwają prace nad opracowaniem zintegrowanego systemu sensorów przeznaczonego do analizy ludzkiego oddechu.

Do opracowania tego systemu powołano konsorcjum w składzie: Wojskowa Akademia Techniczna (lider), Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Uniwersytet Warszawski i Vigo System S.A. Schemat blokowy takiego systemu przedstawiono na rys. 4. Będzie on umożliwiał jednoczesne wykrywanie trzech markerów. Badania tego systemu planuje się przeprowadzić w dwóch etapach: w pierwszym etapie będą wykonane badania testowe z wykorzystaniem wzorcowych próbek gazu, natomiast drugi etap będzie obejmował badania próbek markerów chorobowych.

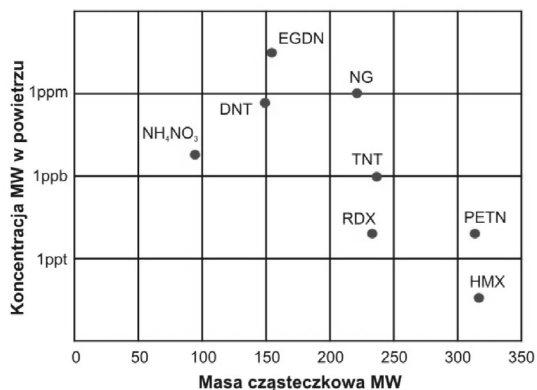
Bardzo ważną zaletą opracowanych sensorów jest możliwość ich zastosowania do wykrywania materiałów wybuchowych (MW). Większość popularnych MW to związki nitrowe (tzn. zawierające grupę nitrową  $\text{NO}_2$ ), które rozkładając się (chemicznie lub biochemicznie) emitują śladowe ilości tlenków azotu:  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ . Wstępne badania z użyciem opracowanych sensorów wykazały, że możliwe jest wykrywanie takich MW jak nitroceluloza, nitrogliceryna, TNT. W celu wykrywania MW o niższej prężności par nasyconych (rys. 5) podjęto prace nad opracowaniem układu wzbogacania umożliwiającego zwiększenie koncentracji tlenków azotu w badanej próbce. Opracowano układy charakteryzujące się różnymi parametrami eksploatacyjnymi. Zastosowano ideę polegającą na zateżaniu par emitowanych przez MW, które następnie podlegają termicznej dekompozycji.

W wyniku tego procesu uzyskuje się tlenki azotu o wyższej koncentracji w stosunku do ich koncentracji emitowanych przez MW. Badania sensora  $\text{NO}_2$  z użyciem układu wzbogacania z grzejnikiem indukcyjnym potwierdziły zalety takiego rozwiązania [5]. Przykładowo po umieszczeniu w koncentratorze 0,5 ng TNT i przeprowadzeniu procesu dekompozycji, nastąpiło zwiększenie koncentracji ditlenku azotu zawartego w badanych parach  $|\approx$  ok. 20 ppb do 200 ppb. Sensor  $\text{NO}_2$  przeszedł również pozytywnie testy na głębokości ponad 1000 m w jednej z polskich kopalni, gdzie stosowany był do identyfikacji ludzi i przedmiotów mających styczność z MW. Opracowanie sensorów tlenu azotu ( $\text{NO}$ ) i tlenu diazotu ( $\text{N}_2\text{O}$ ) umożliwiło wykrycie jednego nanogramu takich MW jak TNT, PETN, RDX, HMX. Tego typu sensory można również zastosować do analizy wydychanego powietrza. Będzie to szczególnie przydatne w badaniach przesiewowych do wczesnego wykrywania zmian chorobotwórczych, w monitorowaniu terapii, monitorowaniu gazów egzogennych (emisji bakteryjnych lub trucizn), czy analizie gazów metabolicznych.



Rys. 4. Zintegrowany system sensorów do analizy wydychanego powietrza  
Fig. 4. The integrated sensor for breath analyzes

Do głównych zalet takich sensorów będzie można zaliczyć: nieinwazyjność (brak konieczności przeprowadzania punkcji, wprowadzania instrumentów kontrolno-pomiarowych do organizmu, używania kontrastów, itp.), prostota użytkowania (brak konieczności przechowywania i transportu próbki oraz przygotowania ich do analizy), możliwość wielokrotnego użycia, pomiar w czasie rzeczywistym, brak dodatkowych uciążliwości dla pacjentów, możliwość wykrycia zmian chorobotwórczych na poziomie molekularnym oraz prosta obsługa tego rodzaju urządzeń w porównaniu do innych metod stosowanych powszechnie w medycynie.



Rys. 5. Koncentracja par materiałów wybuchowych w warunkach nasycenia dla temperatury 25°C  
Fig. 5. Concentration of explosives saturated vapors at 25°C

Zastosowanie spektroskopii laserowej do analizy wydychanego powietrza jest ograniczone głównie do małych cząstek. Wykorzystuje się w nich rotacyjno-wibracyjne linie absorpcyjne, które można opisywać profilem Voigt'a. Widma absorpcyjne większych cząsteczek i bardziej złożonych są szersze. Mogą się one częściowo pokrywać, co utrudnia bądź uniemożliwia ich identyfikację przy stosowaniu tylko absorpcyjnej spektroskopii laserowej. O przydatności metody pomiarowej w głównej mierze będzie decydowała jej czułość.

W powietrzu wydychanym przez człowieka zidentyfikowano ponad 1000 różnych składników. Zawiera ono molekuly będące w powietrzu atmosferycznym, jak również szereg innych składników. W powietrzu tym zawarte są również związki chemiczne, których występowanie w wydychanym powietrzu spowodowane jest obecnością źródeł fizjologicznych np. utlenianiem kwasów tłuszczowych, katabolizmem białek amoniaku i aminokwasów, metabolizmem czy peroksydacją lipidów. Istnieje zatem możliwość rozpoznania stanu zdrowia badanego człowieka.

Rozpoznanie choroby jest możliwe na podstawie pomiaru zmian stężenia poszczególnych składników w wydychanym powietrzu lub pojawienia się związków nietypowych (niespotykanych u zdrowego człowieka), tzw. znaczników lub biomarkerów. Obecność i stężenie danego biomarkera w wydychanym powietrzu jest uzależnione od indywidualnych cech danej osoby. Może być także symptomem określonej dolegliwości (tab. 1).

Tab. 1. Przykładowe biomarkery niektórych schorzeń [5]  
Tab. 1. Examples of some diseases biomarkers [5]

Lp.	Biomarker	Choroba
1	Tlenek azotu	Astma
2	Tlenosiarczek węgla - OCS	Rak płuc, niewydolność wątroby, odrzucenie przeszczepu płuc
3	Formaldehyd, pentan	Rak piersi, rak płuc
4	Aceton	Cukrzyca
5	Amoniak, dwutlenek węgla	Choroba wrzodowa żołądka i dwunastnicy, niewydolność nerek.
6	Tlenek węgla	Angina, astma, infekcje dróg oddechowych.
7	Siarczek karbonylowy, amoniak	Choroby wątroby
8	Dwusiarczek węgla	Schizofrenia
9	Siarczek karbonylowy	Odrzucenie przeszczepu
10	Cyjanowodor	Mukowiscydoza

W wydychanym powietrzu zdrowego człowieka zawarte są związki o względnie wysokim stężeniu np.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , wiele składników, takich jak np. aceton, izopren, propanol o stężeniu rzędu ppb (ang. *part per billion*) i sub-ppb, oraz wiele innych składników, których stężenie jest zawarte w przedziale ppb-ppt (ang. *part per trillion*) [4].

#### 4. Podsumowanie

Opracowane sensory charakteryzują się czułościami na poziomie ppb i dzięki temu mogą one znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach, np. do monitorowania zanieczyszczeń atmosfery, wykrywania materiałów wybuchowych oraz w medycynie do wczesnego wykrywania chorób.

Jak wcześniej wspomniano, metabolizm osób chorych jest odmienny niż zdrowych, co powoduje, że w powietrzu wydychanym przez osoby chore pojawiają się pewne związki – markery chorobowe. Ich wykrycie dzięki zastosowaniu bardzo czułych i selektywnych metod detekcji umożliwia wczesne wykrycie i diagnozę stanów chorobowych.

Dzięki temu minimalizuje się niekorzystny wpływ na pomiary innych związków chemicznych, które mogłyby zakłócić ich wynik. Zatem, znacznie poprawia się wiarygodność otrzymywanych wyników i zmniejsza się ich niepewność pomiaru. Ma to istotne znaczenie w zastosowaniach medycznych, w których trafność decyzji podejmowanych przez personel ma bezpośredni wpływ na zdrowie i życie pacjentów. Inną zaletą zastosowania tego typu sensorów w medycynie, np. do analizy wydychanego powietrza przez ludzi, jest nieinwazyjny charakter badania oraz krótki czas pomiaru (nawet kilka s, zależnie od zakresu pomiarowego). Dzięki temu, za pomocą tych sensorów, możliwy jest ciągły monitoring stanu zdrowia pacjenta, nawet podczas jego snu.

*Podziękowania. Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2013.*

## 5. Literatura

[1] Bielecki Z., Janucki J., Kawalec A., Mikołajczyk J., Pałka N., Pasternak M., Pustelny T., Stacewicz T., Wojtas J.: Sensor and systems for

the detection of explosive devices - an overview, *Metrolog. & Meas. Syst.* Vol. XIX, No. 1, pp. 3-28. (2012).

- [2] Optoelektroniczny sensor ditlenku azotu – analiza i wymagania konstrukcyjne. Praca zbiorowa pod red. Z. Bieleckiego i T. Stacewicza Warszawa, WAT, 2011.
- [3] Kosiel K., Bugajski M., i in.: 177 K operation of AlGaAs/GaAs quantum cascade laser at 9 μm, *Photonics Letters of Poland*, vol. 1 (1), 16-18, 2009.
- [4] Wojtas J., Bielecki Z., Stacewicz T., Mikołajczyk J., Nowakowski M.: Ultrasensitive laser spectroscopy for breath analysis, *Invited Paper in Opto-Electron. Rev.* 20, no. 1, pp. 77-90 (2012).
- [5] Wojtas J., Mędrzycki R., Rutecka B., Mikołajczyk J., Nowakowski M., Szabra D., Gutowska M., Stacewicz T., Bielecki Z.: NO & N2O detection employing cavity enhanced technique. *Proc. of SPIE*, Vol. 8374, 837414, pp. 1-8 (2012).
- [6] Wang C., Sahay P.: Breath analysis using laser spectroscopic techniques: breath biomarkers, special fingerprints, and detection limit. *Sensors*, 2009, 9, 8230-8262.

*otrzymano / received: 18.01.2013*

*przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013*

*artykuł recenzowany / revised paper*

## INFORMACJE

# Regionalne Seminare / Szkolenia dla Służb Utrzymania Ruchu

*www.energoelektronika.pl*  
WORTAL BRANŻOWY




**28.03.2013 - Stalowa Wola**  
**18.04.2013 - Wałbrzych**  
**23.05.2013 - Rzeszów**  
**20.06.2013 - Trójmiasto**  
**10.10.2013 - Bydgoszcz**  
**04.12.2013 - Warszawa**

Jeżeli jesteś zainteresowany uczestnictwem w Seminarium, zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania napisz do nas: [marketing@energoelektronika.pl](mailto:marketing@energoelektronika.pl)  
 Energoelektronika.pl tel. (+48) 22 70 35 291

Partnerzy:










Ilość miejsc ograniczona