

Janusz WAWER, Zbigniew BIELECKI, Janusz MIKOŁAJCZYK, Jacek WOJTAS, Robert MĘDRZYCKI, Mirosław NOWAKOWSKI
 WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,
 ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Bramka bezpieczeństwa z optoelektronicznym czujnikiem NO₂

Dr inż. Janusz WAWER

Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (1972). Od 1995 r. jest pracownikiem dydaktycznym Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy z zakresu plazmo-laserowych źródeł promieniowania rentgenowskiego oraz metrologii. Do ważniejszych zagadnień, którymi obecnie się zajmuje należą opracowania dotyczące integracji różnych technicznych systemów lokalnej ochrony antyterrorystycznej.

e-mail: jwawer@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 w zakresie detekcji śladowych stężeń gazów metodami optoelektronicznymi oraz zaawansowanych metod detekcji sygnałów optycznych.

e-mail: jwojtas@wat.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Zbigniew BIELECKI

Jest specjalistą z zakresu detekcji sygnałów optycznych, metrologii optoelektronicznej, niskoszumowych układów elektronicznych oraz sensorów optoelektronicznych. Prowadzi nieprzerwanie działalność naukową od 1983 roku w Wydziale Elektroniki i Instytucie Optoelektroniki (IOE) WAT, gdzie zdobywał kolejne stopnie naukowe w dyscyplinie elektronika: magistra (1980), doktora (1992), doktora habilitowanego (2002). Tytuł profesora otrzymał w 2008. Członek Polskiego Komitetu Optoelektroniki, Polskiego Towarzystwa Fotonicznego.

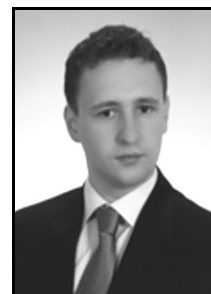
e-mail: zbielecki@wat.edu.pl



Mgr inż. Robert MĘDRZYCKI

Ukończył studia w Wojskowej Akademii Technicznej w 2009 roku. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał w specjalności inżyniera systemów bezpieczeństwa na Wydziale Elektroniki. Od 2010r. pracuje w Zespole Detekcji Sygnałów Optycznych w Instytucie Optoelektroniki WAT. Zajmuje się tematyką dotyczącą sensorów niebezpiecznych gazów i materiałów wybuchowych.

e-mail: rmedrzycki@wat.edu.pl



Płk dr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki WAT, specjalność urządzenia optoelektroniczne. Od 2003r. pracuje w Zakładzie Systemów Optoelektronicznych Instytutu Optoelektroniki WAT. Prowadzi prace naukowe z zakresu zaawansowanych metod detekcji sygnałów optycznych i ich zastosowania m.in. w ochronie obiektów, telekomunikacji, do wykrywania obiektów, detekcji materiałów wybuchowych i skażeń. 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



Płk dr inż. Mirosław NOWAKOWSKI

Jest absolwentem Wydziału Chemii i Fizyki technicznej WAT, specjalność optoelektronika. Działalność naukową rozpoczął w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w 1991 roku. Od 1992 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Jest specjalistą w dziedzinie detekcji sygnałów optycznych i metrologii optoelektronicznej. Ponadto zajmuje się badaniami związanymi z wykorzystaniem promieniowania laserowego w łączności optycznej oraz spektroskopii laserowej.

e-mail: mnowakowski@wat.edu.pl



Streszczenie

W pracy przedstawiono projekt bramki bezpieczeństwa umożliwiającej wykrywanie śladowych ilości par wybranych materiałów wybuchowych. W tym celu opracowano optoelektroniczny sensor ditlenku azotu. W sensorze tym zastosowano metodę spektroskopii strat we wnęce optycznej, zaliczanej do metod o najwyższej czułości. Prezentowany system może być stosowany do kontroli wejść w strategicznych obiektach państwowych i wojskowych oraz użyteczności publicznej, szczególnie o dużym nasileniu ruchu, takich jak lotniska, porty, dworce, stacje metra, itp.

Słowa kluczowe: czujnik optoelektroniczny, CEAS, detekcja NO₂, bramka bezpieczeństwa.

Project of security portals for explosives detection using CEAS sensor

Abstract

This paper presents a security gateway that allows detection of trace amounts of selected explosives. Most explosives are nitro compounds containing the group-NO₂ (Fig. 1) which decompose emitting trace amounts of nitrogen oxides. The optoelectronic sensor designed to detect nitrogen dioxide operates on a basis of the Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy (CEAS) method. The CEAS technique is a modification of Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS) technique. It is based on off-axis arrangement of an optical cavity. The gas concentration in this method is determined by measuring the intensity of optical radiation reaching the detector (photomultiplier tube) caused by absorption of radiation $\lambda = 416$ nm, Fig. 2, of the gas filling the optical cavity. Fig. 3 shows the measuring

system. Preliminary measurement results are illustrated in Fig. 6 which shows the dependence of the decay time of optical radiation in the optical cavity on the concentration of NO₂ in the gas filling the cavity. The NO₂ detection limit is set at 1 ppb, with the uncertainty of 10%. The presented portal is likely to become a very effective tool for explosives detection. Therefore it could be used to control entries of important objects e.g. airports, government buildings, skyscrapers, military bases, and so on. (Project of the security portals for explosives detection using CEAS sensor).

Keywords: optoelectronic sensor, CEAS, NO₂ detection, security portal.

1. Wstęp

Wykrywanie materiałów wybuchowych (MW) jest bardzo ważnym aspektem w walce z terroryzmem szczególnie w ochronie obiektów użyteczności publicznej. W praktyce materiały wybuchowe mogą być wykrywane na podstawie detekcji par (ang. Sniffers) lub wykorzystując metody ze skanowaniem radiacyjnym (ang. bulk detection).

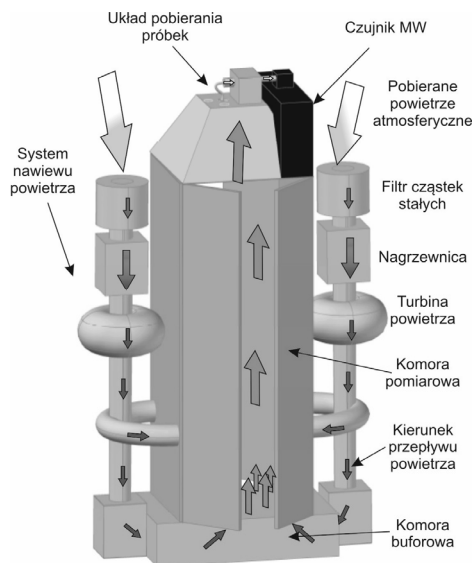
W przypadku bramek wykrywających śladowe ilości MW (ang. Trace Detection Portals) analizowany jest skład powietrza znajdującego się w bliskim otoczeniu kontrolowanej osoby. Materiał wybuchowy jest wykrywany na podstawie porównywania jego sygnatury chemicznej przy użyciu jednego lub kilku sensorów [1].

W bramkach wykorzystujących metody ze skanowaniem radiacyjnym materiały wybuchowe wykrywane są na podstawie analizy zniekształceń obszaru obserwacji. Wynik pomiaru jest prezentowany w głównej mierze wizualnie. Bramki te służą do wykrywa-

nia podejrzanych przedmiotów takich jak broń, paczki, kamizelki, które mogły mieć styczność lub zawierać materiały wybuchowe. W przypadku wizualizacji stosowane są obecnie bramki z kamerami zakresu promieniowania X, fal milimetrowych lub teraherowego. Jednak tego typu urządzenia nie są w stanie dokonać identyfikacji wykrytego MW lub innej substancji niebezpiecznej, np. narkotyków. Odpowiedzialność za identyfikację wykrytej substancji spoczywa na operaterze. Jej wiarygodność zależy od jego umiejętności i poziomu wykształcenia. W przeciwieństwie do bramek typu bulk sensory wykorzystujące detekcję par MW umożliwiają zarówno wykrycie występowania, jak również identyfikację danej substancji.

2. Projekt bramki z czujnikiem MW

Podstawowym zadaniem bramki bezpieczeństwa jest dostarczenie próbek znajdujących się na badanym obiekcie do czujnika materiałów wybuchowych. Podstawowymi elementami bramki są: komora pomiarowa, system nawiewu powietrza, układ pobierania próbek oraz czujnik MW (rys. 1). System nawiewu składa się z dwóch symetrycznie usytuowanych względem komory pomiarowej pomp pobierających powietrze atmosferyczne i włączających je do wnętrza komory. Pobierane powietrze jest filtrowane a następnie ogrzewane przy użyciu nagrzewnic do temperatury regulowanej w zakresie 30-40°C w celu zwiększenia prężności par materiałów niebezpiecznych.

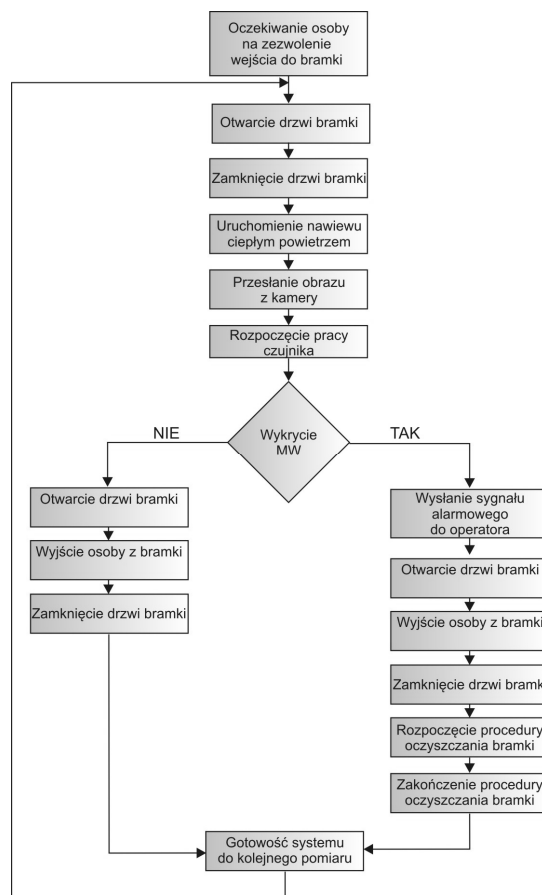


Rys. 1. Budowa bramki przeznaczony do wykrywania materiałów wybuchowych
Fig. 1. Construction of the security portal

W dolnej części bramki (w komorze buforowej) zainstalowano matę wykonaną z materiału filtracyjnego typu EU3. W systemie tym pełni ona dwójaką rolę. Podstawowym jej zadaniem jest działanie jako kolejny stopień filtracji cząstek stałych znajdujących się w powietrzu włączanym do bramki. Kolejną, również istotną funkcją, którą spełnia, jest eliminacja zawirowań strumieni powietrza wewnątrz komory pomiarowej. Ze względu na konstrukcję systemu oraz zastosowanie dwóch symetrycznych turbin, powietrze wpływające do kabiny ulega licznym zawirowaniom. Zastosowana mata filtracyjna stanowi dla przepływającego powietrza membranę o określonym oporze. Powoduje to powstawanie w komorze buforowej nadciśnienia o wartości zależnej m.in. od prędkości obrotowej pomp włączających powietrze. Powietrze z komory buforowej równomiernie przepływa przez filtr z prędkością zależną od różnicy ciśnień pomiędzy komorą buforową a komorą pomiarową. Prędkość ta wynosi od 0,2 do 0,3 m/s w zależności od prędkości obrotowej silników pomp powietrza.

Bardzo istotnym elementem budowy bramki bezpieczeństwa jest układ pobierania próbek. Służy on do transportowania próbek w postaci par materiałów wybuchowych do czujnika CEAS.

W układzie tym zastosowano filtr cząstek stałych większych niż 5µm. Zasadność jego użycia wynika z faktu, iż pobrane próbki dostarczane do czujnika powinny być wolne od zanieczyszczeń stałych mogących osadzić się na elementach zastosowanego czujnika MW. Ponadto system zawiera pompę powietrza służącą do pobierania próbek z komory pomiarowej oraz układ sterujący przepływem próbek.



Rys. 2. Schemat blokowy procedury automatycznej kontroli osób przy użyciu bramki MW

Fig. 2. Block diagram of the security portal automatic detection

Proces kontroli osób w tym urządzeniu jest wykonywany w oparciu o w pełni zautomatyzowaną procedurę (rys. 2). Procedura ta jest realizowana m.in. przez system elektronicznie sterowanych drzwi oraz przez specjalnie zaprojektowany monitoring wizyjny przestrzeni wewnątrz bramki przy użyciu kamery typu smart (National Instruments).

3. Przegląd sensorów do detekcji materiałów wybuchowych

Sensory MW powinny się charakteryzować głównie wysoką niezawodnością aby móc przeprowadzić wiele analiz w ciągu określonego czasu z zachowaniem odpowiedniej czułości [3]. Obecnie dostępne bramki wyposażone są w złożone systemy analiz, które umożliwiają wykrycie szerokiej gamy materiałów. Do najpowszechniej stosowanych urządzeń można zaliczyć sensory wykorzystujące spektroskopię masową (MS), spektroskopię ruchliwości jonów, chromatografię gazową, spektroskopię optyczną, czujniki chemiczne oraz inne [2].

Spośród dostępnych metod stosowanych w tego typu systemach, najwyższą czułością charakteryzuje się spektroskopia masowa (MS). Główną wadą tej metody jest złożoność konstrukcji i jej wysoki koszt. W ciągu ostatnich kilku lat, cena urządzeń MS znacznie się obniżyła i mogą być one teraz stosowane w rutynowych i zautomatyzowanych procedurach kontrolnych. Technika MS jest szeroko stosowana w kryminalistyce. Mimo to dopiero od

niedawna jest wykorzystywana w systemach kontroli bezpieczeństwa związanych z wykrywaniem MW. Istnieje wiele firm, które oferują ww. systemy np. Hitachi, Syagen, Mass Spec Analytical i Griffin Analytical [4, 5].

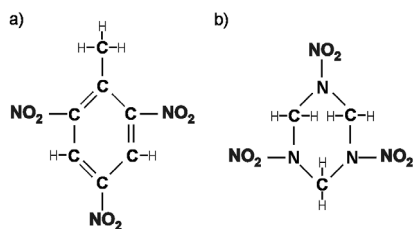
Spektroskopia ruchliwości jonów (IMS) jest koncepcyjnie podobna do techniki MS. Główną jej zaletą jest to, że nie korzysta ona z układu próżniowego, co znacznie zmniejsza rozmiary, koszt i złożoność systemu w stosunku do MS. Jednakże dokładność pomiaru jest znacznie mniejsza. Jest to szczególnie widoczne w przypadku bardziej złożonych substancji lub gdy badanie dotyczy wielu związków jednocześnie. Do najważniejszych producentów tych systemów należą: GE/Ion Track i Smiths Detection. Powyższe metody detekcji mogą być stosowane również w chromatografii gazowej (GC). Metoda ta zapewnia wysoką rozdzielczość (separację) związków, wykrywanych przez różne techniki detekcji. W przypadku zastosowań bramek typu Trace, stosuje się tańsze czujniki np. wychwyty elektronów (ECD), chemiluminescencyjne (dla grupy NO₂) lub IMS'y. Przykładowo, detektory stosujące powyższą technologię są produkowane przez firmę Scintrex.

Bardzo dynamicznie rozwijającymi się metodami detekcji MW są techniki oparte o spektroskopię optyczną szczególnie z zakresu promieniowania widzialnego (VIS), podczerwieni (IR) lub spektroskopii Ramanowskiej. W wielu przypadkach można ją zastosować do identyfikacji niebezpiecznych substancji. Jednak nie jest ona skuteczna w przypadku złożonych mieszanin lub wykrywania związków o bardzo niskim stężeniu. Równocześnie rozwijana jest technologia tzw. spektroskopii fal milimetrowych ponieważ daje możliwość bardzo wysokiej separacji materiałów wybuchowych. Jednak czułość tej metody nie jest duża ze względu na mały przekrój czynny na absorpcję materiałów wybuchowych w tym zakresie długości fal.

Wstępne badania wykazały, że istnieje możliwość zastosowania optoelektronicznego sensora NO₂ do wykrywania wybranych MW w bramce bezpieczeństwa.

4. Optoelektroniczny sensor NO₂

Większość materiałów wybuchowych to związki nitrowe (tzn. zawierające grupę nitrową NO₂), które rozkładając się (chemicznie lub biochemicznie) emitują śladowe ilości tlenków azotu (m. in. NO₂). Na rysunku 3 przedstawiono wzory strukturalne najczęściej wykorzystywanych materiałów wybuchowych.

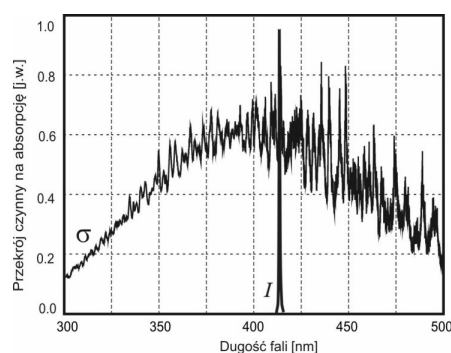


Rys. 3. Wzór strukturalny: TNT (a), RDX (b)
 Fig. 3. Chemical compositions: TNT (a), RDX (b)

W prezentowanym systemie, obecność materiałów wybuchowych wykrywana jest na podstawie pomiaru stężenia NO₂. W tym celu zastosowano optoelektroniczny czujnik NO₂. Działa on w oparciu o jedną z najczulszych optoelektronicznych metod spektroskopowych – spektroskopię w wnęcie optycznej CEAS (ang. *Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy*). W metodzie tej do wnęki optycznej zostaje wprowadzony impuls promieniowania laserowego o długości fali dopasowanej do widma absorpcyjnego wykrywanego gazu. Dzięki temu, że promieniowanie to jest wprowadzane do wnęki optycznej pod małym kątem, eliminowane jest sprzężenie zwrotne z laserem. Dodatkowo szerokie widmo lasera obejmuje wiele modów wnęki i układ charakteryzuje się małą wrażliwością na fluktuacje częstotliwości własnych wnęki i lasera [6]. Impuls lasera wprowadzony do wnęki przez

jedno ze zwierciadeł ulega wewnątrz wielokrotnemu odbiciu. Dzięki temu droga optyczna osiąga wartość do kilkunastu kilometrów [7]. Po każdym odbiciu część promieniowania zależna od współczynnika transmisji zwierciadeł, opuszcza wnękę [8]. Sygnał optyczny transmitowany przez jedno ze zwierciadeł jest rejestrowany przez fotodetektor. Sensory wykorzystujące metodę CEAS osiągają limit detekcji rzędu 10⁻⁹cm⁻¹ [9].

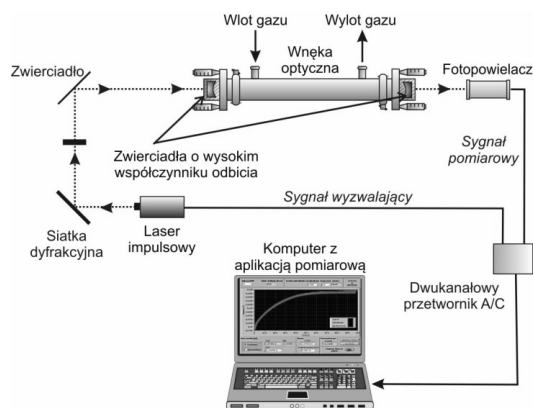
W metodzie tej stężenie gazu wyznaczone jest na podstawie pomiaru zmiany natężenia promieniowania optycznego docierającego do detektora spowodowanej procesem absorpcji promieniowania w gazie. Z tego względu bardzo istotne jest dopasowanie widma promieniowania emitowanego przez laser do przekroju czynnego na absorpcję wykrywanego gazu.



Rys. 4. Widmo przekroju czynnego na absorpcję NO₂ oraz promieniowania lasera
 Fig. 4. Absorption cross-section of nitrogen dioxide and matched laser spectral line

W przypadku NO₂, największe wartości przekroju czynnego na absorpcję występują w przedziale 350-450nm (rys. 4). W tym zakresie długości fal wartość przekroju czynnego na absorpcję zmienia się od 3,4·10⁻¹⁹ do 6·10⁻¹⁹cm² [10]. Ponadto nie są obserwowane interferencje z widmami absorpcyjnymi innych gazów występującymi naturalnie w atmosferze. Natomiast rozpraszanie promieniowania optycznego na cząstkach aerozoli można zminimalizować stosując odpowiednią filtrację próbek.

Opracowany sensor składa się z impulsowego źródła promieniowania optycznego, siatki dyfrakcyjnej, zwierciadła, wnęki optycznej, fotopowielcza (PMT), przetwornika analogowo-cyfrowego (A/C) oraz z komputera sterującego z dedykowaną aplikacją kontrolno-pomiarową (rys. 5).



Rys. 5. Schemat blokowy sensora NO₂
 Fig. 5. Block diagram of NO₂ sensor

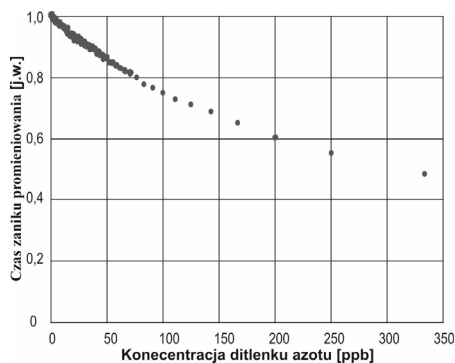
Jako źródło promieniowania optycznego zastosowano półprzewodnikowy laser impulsowy (TopGaN) emitujący promieniowanie o długości fali 416nm. Laser generuje impulsy światła o czasie trwania 50ns oraz częstotliwości 1kHz. Wiązka promieniowania jest kierowana do wnęki optycznej przy użyciu siatki dyfrakcyjnej oraz zwierciadła. Zastosowanie siatki dyfrakcyjnej oraz diafragmy eliminuje fluorescencję diody laserowej, powodującej zakłócenia

sygnału użytecznego propagującego się wewnątrz wnęki. Wnęka optyczna zbudowana jest z dwóch zwierciadeł których współczynnik odbicia dla promieniowania optycznego o długości fali 416nm wynosi 0,99995. Zwierciadła umieszczone są w odległości 60cm względem siebie. Promieniowanie optyczne wydostające się z wnęki optycznej na skutek szczątkowej transmisji zastosowanych zwierciadeł rejestrowane jest przy użyciu fotopowielacza (R7518 firmy Hamamatsu). Następnie sygnał analogowy z fotodetektora zostaje poddany konwersji do postaci cyfrowej przy użyciu 14-bitowej karty oscyloskopowej (CS328 firmy Cleverscope). Dane cyfrowe są transmitowane z karty pomiarowej do komputera za pomocą interfejsu USB. Stężenie NO_2 wyznaczane jest na podstawie zależności

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

gdzie: σ – przekrój czynny na absorpcję, c – prędkość światła, τ_0 – czas zaniku promieniowania we wnęcie, zmierzony dla wnęki niezawierającej NO_2 , τ – czas zaniku promieniowania we wnęcie wypełnionej di tlenkiem azotu [11].

Na rys. 6 przedstawiono charakterystykę czasu zaniku promieniowania optycznego we wnęcie w zależności od koncentracji di tlenku azotu wypełniającego wnękę, zmierzoną przy użyciu wykonanego sensora. W badaniach zastosowano kalibrowany generator gazów Kintek 491 z wykorzystaniem modułów 491M oraz 491SD oraz z zaimplementowanym wkładem gazowym typ EL-SRT2 zawierającym di tlenek azotu emitowany z wydatkim masowym $E = 551\text{ng/min}$.



Rys. 6. Wykres czasu zaniku promieniowania optycznego we wnęcie w zależności od koncentracji di tlenku azotu wypełniającego wnękę

Fig. 6. Time decay of optical radiation in the cavity as a function of NO_2 concentration inside the cavity

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych opracowanego sensora można stwierdzić, że jego limit detekcji osiąga wartość 1ppb, natomiast niepewność pomiaru wynosi 10% dla stężeń gazu większych od 10ppb. Parametry sensora zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Parametry optoelektronicznego czujnika NO_2
Tab. 1. Parameters of the NO_2 optoelectronic sensor

L.P.	Parametr	Wartość
1.	Czułość (NO_2)	1 ppb
2.	Rozdzielczość	0.2 ppb
3.	Niepewność pomiaru ($N \geq 10\text{ppb}$)	10 %
4.	Czas pomiaru	$\leq 60\text{s}$
5.	Interfejs	USB 2.0
6.	Wymiary (bez komputera)	80x55x30cm
7.	Waga (bez komputera)	30 kg

5. Wnioski

W pracy przedstawiono projekt oraz procedurę działania bramki umożliwiającej wykrywanie wybranych materiałów wybuchowych na podstawie pomiaru koncentracji ditlenku azotu.

W systemie zastosowano optoelektroniczny czujnik NO_2 działający w oparciu o metodę CEAS. Dzięki optymalizacji fotoodbiornika oraz układu przetwarzania sygnału, uzyskano limit detekcji sensora na poziomie 1ppb. Czujnik umożliwia pomiar stężenia NO_2 z rozdzielczością 0,2 ppb i niepewnością 10%. Doprowadzenie analizowanego powietrza z komory pomiarowej bramki do sensora realizuje specjalnie zaprojektowany system nawiewu. Dzięki niemu, sensor umożliwia automatyczny monitoring koncentracji ditlenku azotu wewnątrz bramki. Cały proces jest realizowany przez cyfrowy system przetwarzania sygnału.

Opracowany system może mieć bardzo duże znaczenie dla obronności Państwa. Prezentowana bramka bezpieczeństwa może być zastosowana do kontroli osób w ważnych obiektach i pomieszczeniach wojskowych oraz użyteczności publicznej takich jak lotniska, porty, dworce, stacje metra, itp.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 (OR00002807, O N515 115836, OR00011109).

6. Literatura

- [1] Settles G. S., McGanna W. J.: Potential for portal detection of human chemical and biological contamination, SPIE Aerosense, Vol. 4378, 2001.
- [2] http://www.justnet.org/Lists/JUSTNET%20Resources/Attachments/2129/00-portal%20Primer_web.pdf
- [3] Woodfin R. L.: Trace Chemical Sensing of Explosives, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [4] <http://www.syagen.com/guardian-explosives-trace-portal-p-1-pc-1.html>
- [5] <http://www.msaltid.co.uk/Detection-Equipment/Scintinel.aspx>
- [6] Engeln R., Berden G., Peeters R., Meijer G.: Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy, Review Of Scientific Instruments, Vol. 69, No. 11, pp. 3763 – 3769, November, 1998.
- [7] Wojtas J., Czyzewski A., Stacewicz T. & Bielecki Z.: Sensitive detection of NO_2 with Cavity Enhanced Spectroscopy, Optica Applicata, Vol. 36, No. 4, pp. 461-467, 2006.
- [8] Nowakowski M., Wojtas J., Bielecki Z. & Mikołajczyk J.: Cavity enhanced absorption spectroscopy sensor, Acta Phys. Pol. A, 116, 363–367, 2009.
- [9] Wojtas J., Czyzewski A., Stacewicz T., Bielecki Z., Mikołajczyk J.: Cavity enhanced spectroscopy for NO_2 detection, Proceedings of the SPIE, Volume 5954, pp. 174-178, 2005.
- [10] Bielecki Z., Leszczyński M., Holz K., Marona L., Mikołajczyk J., Nowakowski M., Perlin P., Rutecka B., Stacewicz T., Wojtas J.: Sub-ppb NO_x Detection by a cavity enhanced absorption spectroscopy system with blue and infrared diode laser. Rozdział w Computational Methods and Experimental Measurements. WIT Press, Vol. 48, pp. 203-215 (2009).
- [11] Wojtas J., Bielecki Z.: Signal processing system in the cavity enhanced spectroscopy, Opto-Electron. Rev. 16(4), pp. 44-51, 2008.

otrzymano / received: 26.10.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.02.2012

artykuł recenzowany / revised paper