

# Zastosowanie fotodiod i laserów w sensorach gazów

Jacek Wojtas<sup>1</sup>, Janusz Mikołajczyk<sup>1</sup>, Janusz Wawer<sup>2</sup>,  
Marek Piszczek<sup>1</sup>, Robert Mędrzycki<sup>1</sup>, Zbigniew Bielecki<sup>1</sup>,

1) Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

2) Wydział Elektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
zbielecki@wat.edu.pl

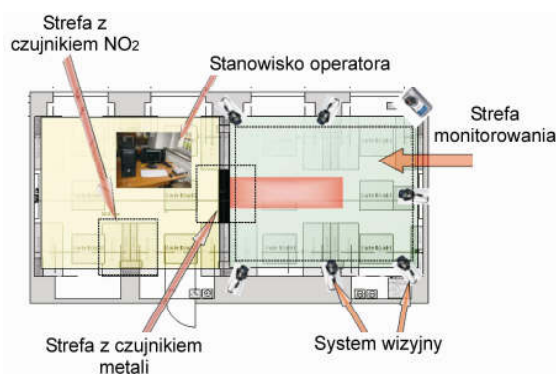
## STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę i badania opracowanego czujnika NO<sub>2</sub>, który zastosowano w zintegrowanym systemie do wykrywania improwizowanych urządzeń wybuchowych. System ten realizuje dwie zasadnicze funkcje: identyfikację wizyjną zagrożenia oraz wykrywanie materiałów wybuchowych. Umożliwia on nie tylko obserwację określonego obszaru w celu oszacowania zagrożeń, ale również automatyczny ich monitoring. W skład systemu wchodzi między innymi bramka wyposażona w czujnik wykrywający obecność ditlenku azotu, który może być markerem obecności materiałów wybuchowych. Działa on w oparciu o jedną z najczulszych metod spektroskopii laserowej nazywanej powszechnie spektroskopią strat we wnęce optycznej. W artykule przedstawiono opis i cechy charakterystyczne czujnika oraz wyniki badań wstępnych.

## 1. WSTĘP

Obecnie na świecie zauważalny jest dynamiczny rozwój systemów bezpieczeństwa. Rozwój ten jest kształtowany głównie przez wydarzenia związane z atakami terrorystycznymi nie tylko w obszarze działań wojennych (Irak, Afganistan), ale również na terenach „bezpiecznych” np. w USA, Rosji, Hiszpanii, Wielkiej Brytanii, czy też Białorusi [1]. Stosowane w tych atakach urządzenia wybuchowe (ang. *Improvised Explosive Devices - IED*) stają się coraz bardziej niebezpieczne. W praktyce okazuje się, że wiele przedmiotów można użyć do budowy *IED*. Stosuje się przy tym różne materiały, surowce oraz systemy detonacji. Mogą one zawierać zarówno wojskowe, jak i „domowej roboty” materiały wybuchowe [2]. Do tej pory powstało wiele metod, które są w stanie, z pewnym prawdopodobieństwem, zidentyfikować zagrożenie użycia *IED* [3-5]. W praktyce, trudno jest jednak opracować pojedynczy czujnik, który byłby w stanie wykrywać takie urządzenia. Dlatego też, coraz częściej opracowuje się kompleksowe systemy, w których wykorzystuje się kilka sensorów. Systemy te mają na celu zwiększenie prawdopodobieństwa wykrycia *IED*, oraz poszerzenie zakresu ich funkcjonalności.

W opracowanym w Wojskowej Akademii Technicznej systemie bezpieczeństwa można wyróżnić: strefę monitorowania, strefę z czujnikami metalu, oraz strefę z sensorem NO<sub>2</sub> (rys.1). W strefie monitorowania znajduje się system, który umożliwia nie tylko wizualizację danego obszaru, ale również określenie położenia podejrzanych obiektów i przedmiotów, jak również śledzenie ich ruchu. Po wykryciu podejrzanego przedmiotu, realizowana jest procedura wyszukiwania osoby, która pozostawiła ten przedmiot.



Rys. 1. Schemat ideowy systemu bezpieczeństwa

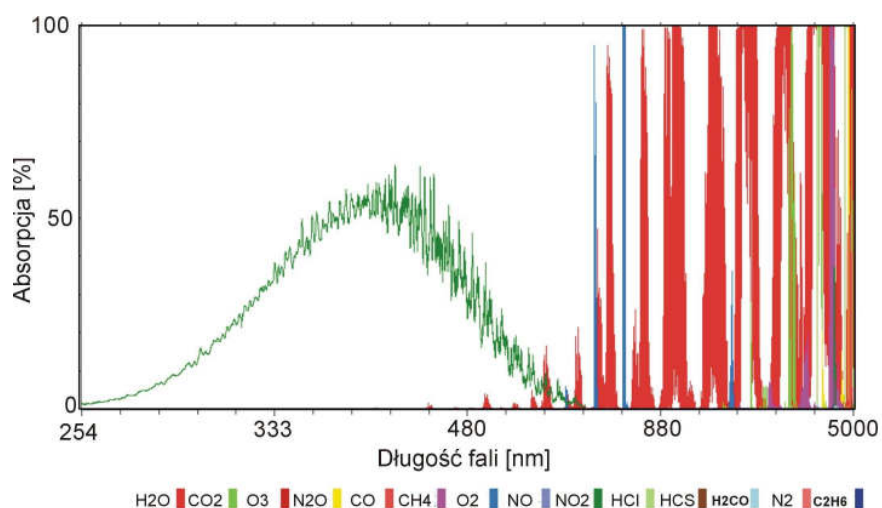
Do wykrywania niebezpiecznych przedmiotów metalowych i części składowych *IED* zastosowano bramkę z pętlą indukcyjną, która służy do wykrywania metali. Trzeci system wyposażono w sensor ditlenku azotu. Służy on do wykrywania śladowych ilości materiałów wybuchowych (MW). Informacje z poszczególnych czujników wraz z położeniem wskazanych osób są zobrazowane na panelu operatora.

## 2. BRAMKA Z CZUJNIKIEM NO<sub>2</sub>

Improwizowane urządzenia wybuchowe mogą być wykryte na podstawie analizy ich cech fizycznych (np. kształtu, czy właściwości elektrycznych), a także detekcji par lub cząsteczek emitowanych przez zastosowane materiały wybuchowe. Metody działania bramek można zatem podzielić na trzy zasadnicze grupy. Pierwszą grupę stanowią bramki umożliwiające wykrycie zniekształceń badanego obszaru spowodowanego przez *IED* (ang. *anomalous portals*), drugą - bramki wykrywające metale, natomiast trzecią - systemy wykrywające śladowe ilości par materiałów wybuchowych (ang. *trace portals*) [6,7]. W niniejszej pracy omówiony zostanie czujnik śladowych ilości par MW.

W praktyce, większość materiałów wybuchowych stanowią organiczne związki nitrowe. Termiczny rozkład w fazie gazowej tych związków, skutkuje uwolnieniem tlenków azotu. W przypadku nitrogliceryny oraz PETN otrzymuje się głównie NO<sub>2</sub>, dla TNT - NO<sub>2</sub> i NO, natomiast dla RDX oraz HMX są to NO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>O. Dlatego też, wykrycie materiałów wybuchowych może odbywać się pośrednio poprzez pomiar stężenia ditlenku azotu. Do wykrycia

tego gazu zastosowano jedną z najczulszych metod spektroskopii laserowej – spektroskopię strat we wnęcie optycznej typu CEAS [8]. Projektując tego typu sensor należy zwrócić szczególną uwagę na dobór odpowiedniej długości fali promieniowania optycznego, przy której bada się efekt absorpcji. Wybór ten powinien być podyktowany m.in. uzyskaniem dużego przekroju czynnego na absorpcję oraz małym udziałem innych interferentów. Ze względu na fakt, iż w zakresie podczerwieni występuje wiele widm absorpcyjnych różnych cząsteczek, trudno jest uniknąć interferencji z widmem ditlenku azotu. Powoduje to wzrost wymagań dla układu optycznego oraz samego elektronicznego sensora. Szczególnie niekorzystny wpływ wykazują widma absorpcyjne wody oraz metanu. Ich współczynniki absorpcji osiągają wartości znacznie większe od maksymalnych wartości współczynnika absorpcji dla ditlenku azotu. Znacznie korzystniejsza sytuacja występuje w zakresie widzialnym, w którym brak jest znaczącego wpływu widm absorpcyjnych innych cząsteczek (rys. 2).



Rys. 2. Widma absorpcyjne gazów występujących w atmosferze w zakresie od 250 nm do 5  $\mu$ m

Dlatego też opracowano sensor ditlenku azotu, w którym zastosowano zjawisko absorpcji promieniowania optycznego o długości fali 414 nm. Składa się on z następujących elementów:

- wnęki optycznej z kompletem zwierciadeł,
- półprzewodnikowego lasera impulsowego wraz z systemem sterowania,
- układu optycznego umożliwiającego wprowadzenie promieniowania laserowego do wnęki,
- modułu detekcyjnego rejestrującego promieniowanie na wyjściu wnęki optycznej,
- układu przetwarzania sygnałów i transmisji danych.

Wnęka jest tak skonstruowana, że zapewnia dużą odporność na działanie czynników zewnętrznych oraz szczelność. Parametry zwierciadeł dobrano pod kątem spełnienia kryterium stabilności oraz uzyskania dużej dobroci wnęki optycznej w wybranym zakresie długości fal. W tym celu zastosowano wklęsłe i wielowarstwowe zwierciadła dielektryczne o nominalnym współczynniku odbicia 99,995 %, średnicy 1” oraz promieniach krzywizn 1 m. Zwierciadła te

zamontowano w specjalnych uchwytych, które umożliwiają regulację kąta nachylenia w dwóch płaszczyznach. Wnęka jest także wyposażona w specjalne zawory do doprowadzenia i odprowadzenia badanego gazu.

Jako źródło promieniowania zastosowano, opracowaną w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN, półprzewodnikową diodę laserową z azotku galu. Główne parametry tej diody zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Główne parametry zastosowanej diody laserowej

Długość fali emitowanego promieniowania	Szerokość linii	Rozbieżność wiązki	Czas trwania Impulsu (dla $P_{max}$ )	Częstotliwość powtarzania impulsów	Moc szczytowa
414 nm	1,25 nm	3,5 mrad	50 ns	1 kHz	800 mW

Do ukształtowania wiązki promieniowania i osiągnięcia właściwego sprzężenia lasera z wnęką zastosowano układ optyczny składający się z siatki dyfrakcyjnej, diafragmy oraz zwierciadła płaskiego. Układ ten minimalizuje także niekorzystny wpływ szerokopasmowej fluorescencji i emisji spontanicznej diody laserowej.

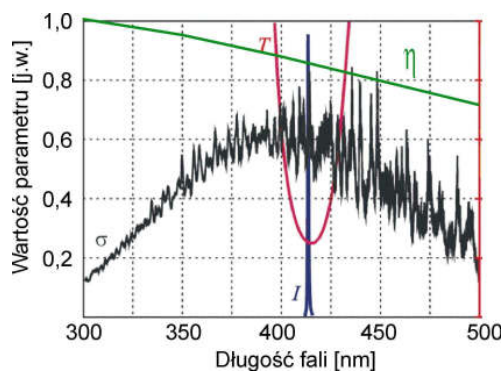
Do wykrywania sygnału otrzymanego z wnęki optycznej zastosowano fotopowielacz, typu R7518, firmy Hamamatsu. Razem z przetwornicą wysokiego napięcia umieszczono go w specjalnej obudowie oraz w ekranie wykonanym z permaloju. Główne parametry fotopowielacza zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Główne parametry fotopowielacza R7518

Czułość dla $\lambda=414$ nm	Czas narastania	Wymiary powierzchni fotoczułej	Prąd ciemny	Napięcie zasilania
$\sim 10^6$ A/W	2,2 ns	(24 x 8) mm	$\sim 0,2$ nA	1000 V

Sygnał z fotopowielacza podano na wejście niskoszumowego przedwzmacniacza pracującego w układzie przetwornika prąd-napięcie.

Zatem dużą czułość sensora uzyskano poprzez: zastosowanie długości fali promieniowania laserowego odpowiadającej maksymalnej wartości przekroju czynnego na absorpcję dla  $\text{NO}_2$ , zwierciadeł charakteryzujących się możliwie największym współczynnikiem odbicia dla tej długości fali oraz wysokoczułego fotopowielacza (rys. 3).



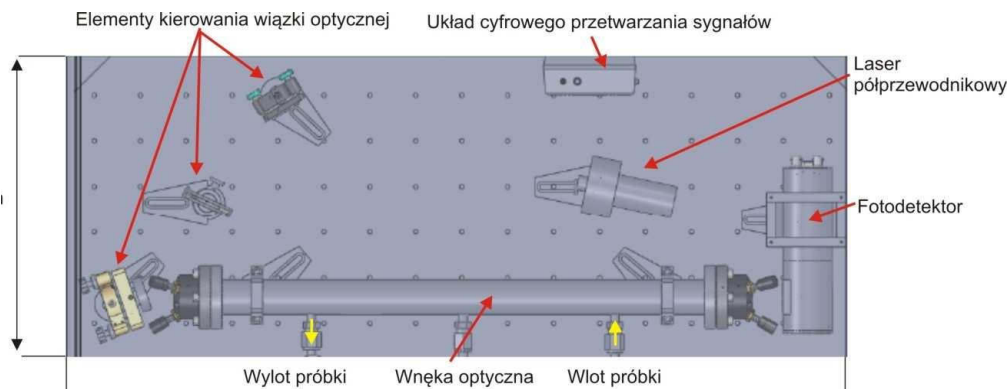
Rys. 3. Charakterystyki widmowe, gdzie:  $\sigma$  – przekrój czynny na absorpcję dla  $\text{NO}_2$ ,  $I$  – linia emisji lasera,  $T$  – współczynnik transmisji zwierciadeł,  $\eta$  – wydajność kwantowa fotopowielacza

Do przetwarzania analogowo-cyfrowego sygnału otrzymanego z przedwzmacniacza zastosowano kartę oscyloskopową z interfejsem USB typu CS328 firmy Cleverscope. Karta ta umożliwia 14-to bitowe przetwarzanie sygnału z częstotliwością próbkowania 100 MS/s. Sterowanie parametrami przetwarzania, kalibracją sensora i obliczenie koncentracji przeprowadza się za pomocą specjalistycznego oprogramowania, które opracowane zostało w środowisku LabVIEW. Procedura pomiaru koncentracji polega na dwukrotnym pomiarze czasu zaniku sygnału tzn. we wnęce bez ditlenku azotu ( $\tau_0$ ), a następnie we wnęce wypełnionej badanym powietrzem ( $\tau$ ). Koncentrację ditlenku azotu oblicza się z zależności

$$K = \frac{1}{K_0 \cdot c \cdot \sigma} \left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \cdot 10^9 [\text{ppb}], \quad (1)$$

gdzie:  $K_0$  - liczba Loschmidta,  $c$  – prędkość światła,  $\sigma$  - przekrój czynny na absorpcję ditlenku azotu.

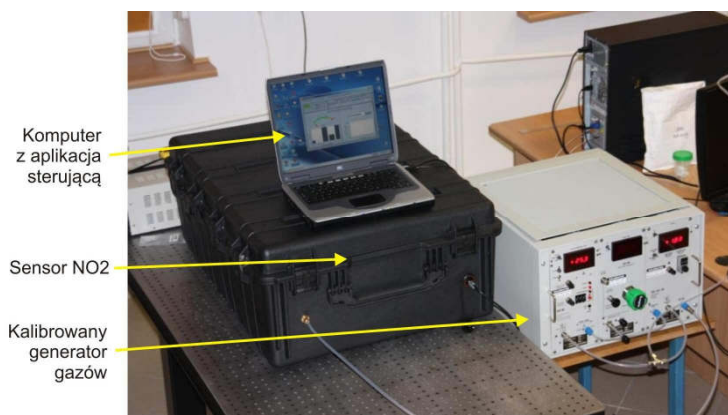
Wszystkie elementy zostały umieszczone na wspólnej platformie (rys. 4). Opracowany system umożliwia także przesłanie danych do Centrum Analizy Danych Pomiarowych.



Rys. 4. Widok rozmieszczenia elementów czujnika

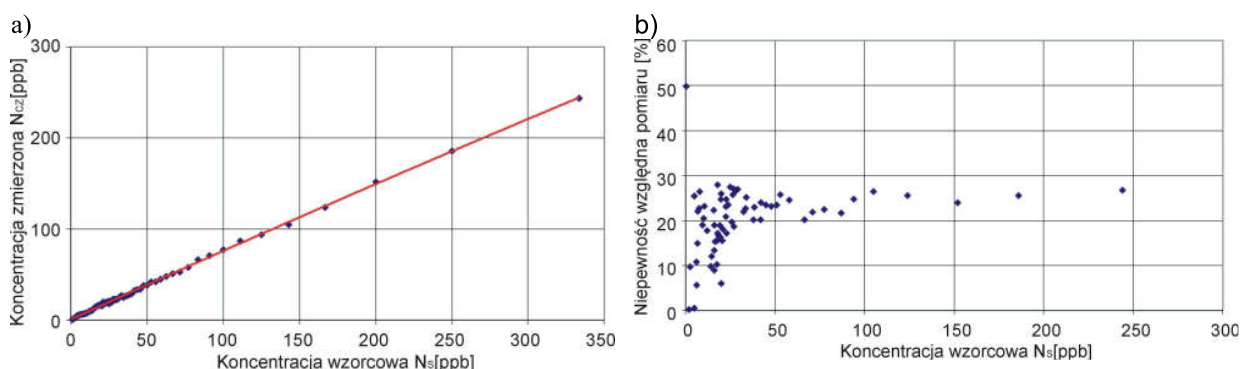
### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W pierwszym etapie badań przeprowadzono kalibrację czujnika za pomocą wzorcowego generatora gazów firmy KinTek (rys. 5). Miały one na celu wyznaczenie dokładności pomiaru koncentracji  $\text{NO}_2$ .



Rys. 5. Widok stanowiska pomiarowego

Na rysunku 6 przedstawiono zależność zmierzonej wartości koncentracji oraz jej niepewność pomiaru, od wartości koncentracji próbki referencyjnej (wzorcowej) przed kalibracją sensora.



Rys. 6. Zależność zmierzonej wartości koncentracji  $\text{NO}_2$  ( $N_{CZ}$ ) oraz niepewność jej pomiaru od koncentracji próbki wzorcowej ( $N_S$ ) przed procesem kalibracji sensora  $\text{NO}_2$

Uwzględniając zależność pomiędzy zmierzona wartością koncentracji a wzorcową wyznaczono charakterystykę kalibracyjną sensora. Ma ona postać

$$N_{KAL} = k N_{CZ} + N_k, \quad (2)$$

gdzie:  $k$ ,  $N_k$  są to przyjęte współczynniki kalibracji.

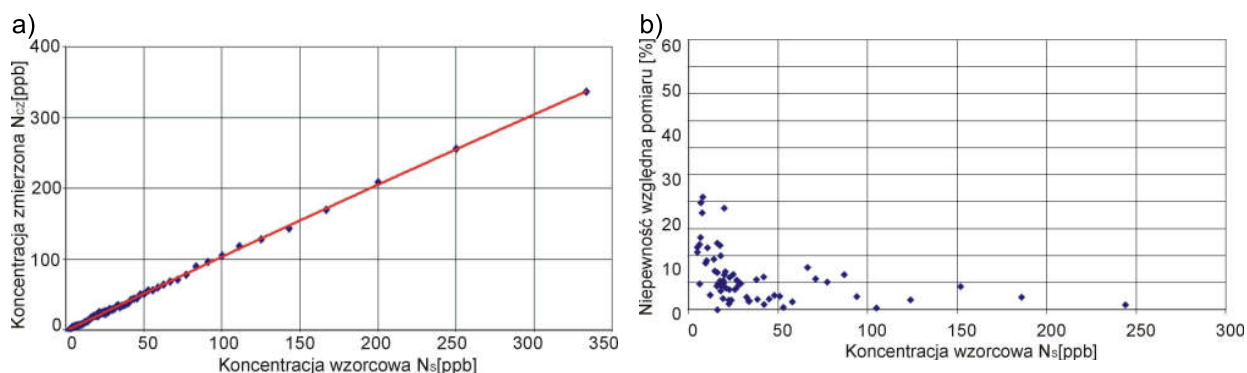
Prosta kalibracyjna wyznaczona na podstawie zmierzonej wartości koncentracji jest opisana wzorem

$$N_{CZ} = 0,72 N_S + 2,5 \quad (3)$$

W idealnym przypadku wartości  $N_{CZ}$  powinny być równe koncentracji gazu uzyskanego z generatora ( $N_S$ ). Uwzględniając zależność (2) oraz (3) zostały wyznaczone współczynniki kalibracji:  $k = 1,39$  oraz  $N_k = 3,5 \text{ ppb}$ . Po uwzględnieniu tych współczynników wyznaczono



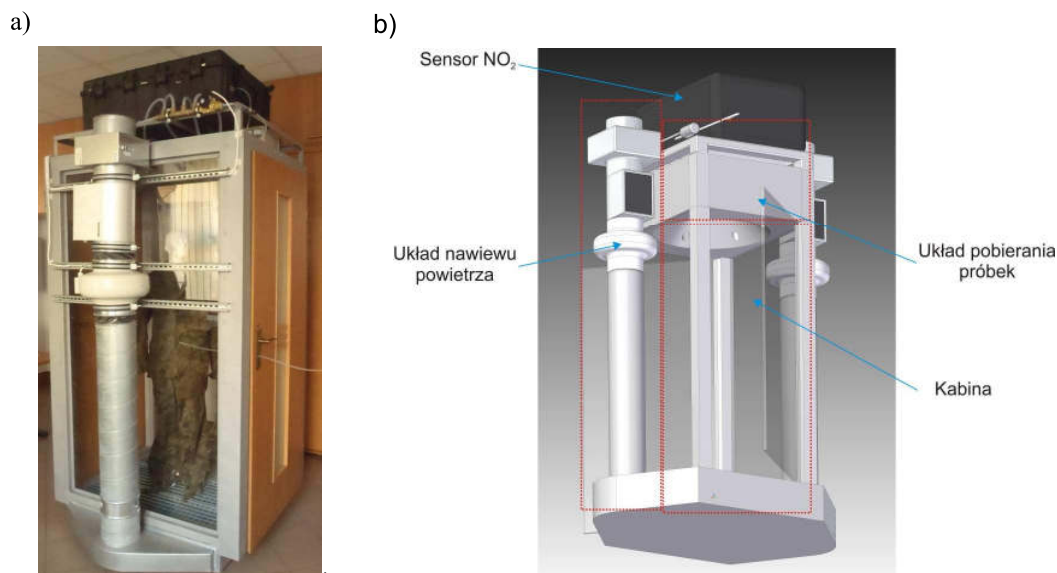
zależność pomiędzy koncentracją ditlenku azotu zmierzoną za pomocą sensora a wartościami referencyjnymi, tzn. koncentracją próbek wzorcowych wytworzonych w generatorze (rys. 7).



Rys. 7. Wykres zależności zmierzonej wartości koncentracji  $NO_2$  ( $N_{cz}$ ) oraz niepewności jej pomiaru od koncentracji próbki wzorcowej po kalibracji sensora  $NO_2$

Z powyższego wykresu wynika, że po kalibracji wartość maksymalna niepewności pomiaru koncentracji  $NO_2$ , uległa zmniejszeniu z 25 % do 10 %.

Główny etap badań dotyczył sprawdzenia skuteczności działania czujnika zintegrowanego z bramką (rys. 8). Badania przeprowadzono umieszczając w bramce manekina ubranego w mundur, który znajdował się w pomieszczeniu razem z materiałami wybuchowymi. Następnie przeprowadzono pomiar czasu od momentu włączenia systemu detekcyjnego bramki, a reakcją sensora polegającą na zmianie wskazań koncentracji  $NO_2$ . Zarejestrowano, że po 30 s pracy nastąpił wzrost koncentracji  $NO_2$  o 6 ppb.



Rys. 8. Bramka z czujnikiem  $NO_2$ : widok (a) i konstrukcja (b)

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono system, który umożliwia wykrywanie par materiałów wybuchowych. Jego zastosowanie w bramce kontrolnej jest rozwiązaniem unikalnym. Zazwyczaj są w tych urządzeniach stosowane sensory MS lub IMS. Uzyskany poziom czułości oraz wyniki badań wstępnych bramki wskazują, że może ona stanowić istotne narzędzie w walce z zagrożeniami użycia *IED*. Dodatkowo, sensor NO<sub>2</sub> daje możliwość nie tylko wykrycia materiałów wybuchowych, ale również elementów i osób, które miały z nimi styczność.

## PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 w ramach projektów OR00000312 i OR00011109.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] [http://www.nctc.gov/witsbanner/docs/2010\\_report\\_on\\_terrorism.pdf](http://www.nctc.gov/witsbanner/docs/2010_report_on_terrorism.pdf)
- [2] [https://www.jieddo.dod.mil/content/docs/20120116\\_JIEDDOC-IEDStrategicPlan\\_MEDprint.pdf](https://www.jieddo.dod.mil/content/docs/20120116_JIEDDOC-IEDStrategicPlan_MEDprint.pdf)
- [3] Moore D.S., Recent Advances in Trace Explosives Detection Instrumentation, Sensing and Imaging, vol. 8, 2007, s. 9-38
- [4] Kuznetsov A.V., Osetrov O.I., Detection of improvised explosives (IE) and explosive devices (IED), NATO Security through Science Series, Detection and Disposal of Improvised Explosives, 2006, s. 7-25
- [5] Bielecki Z., Janucki J., Kawalec A., Mikołajczyk J., Pałka N., Pasternak M., Pustelny T., Wojtas J., Sensors and Systems for the Detection of Explosive Devices. Invited Paper in Metrology And Measurement Systems, vol. XIX, 2012, s. 3-28
- [6] Yinon J., Counterterrorist Detection Techniques of Explosives, Elsevier, 2007
- [7] People Screening Portals: Technologies & Global Markets – 2012-2016, HSRC 2012
- [8] Wojtas J., Mikołajczyk J., Nowakowski M., Rutecka B., Medrzycki R., Bielecki Z., Applying CEAS method to UV, VIS, and IR spectroscopy sensors, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 59, 2011, s. 1-10