



**Materiały z I Konferencji Optoelektronicznej
pt. „Optoelektronika dla bezpieczeństwa
Państwa i Obywateli”**

Rawa Mazowiecka 7-8.10.2015 r.

SPIS TREŚCI

1.	Słowo wstępne	4
2.	Gospodarze konferencji	5
3.	Komitety konferencji	7
	- Komitet Honorowy	7
	- Komitet Naukowy	7
	- Komitet Organizacyjny	8
4.	Patroni i Sponsorzy konferencji	9
5.	Streszczenia	10
5.1.	Optoelektroniczne technologie podwójnego zastosowania w Programie Modernizacji Technicznej Sił Zbrojnych RP, gen. dyw. prof. dr hab. inż. Zygmunt Mierczyk, Wojskowa Akademia Techniczna	10
5.2.	Moduły detekcyjne do zastosowań wojskowych i w systemach bezpieczeństwa, Adam Piotrowski, Józef Piotrowski, Waldemar Gawron, Zbigniew Orman i Marcin Ratajczyk, VIGO System S.A.	11
6.	Referaty	12
6.1.	Wybrane technologie fotoniczne w zastosowaniach militarnych, dr Jacek Galas, dr Marek Daszkiewicz Instytut Optyki Stosowanej	12
6.2.	Założenia systemowego podejścia do procesu pozyskiwania sprzętu wojskowego w kontekście realizacji Polityki Zbrojeniowej MON, gen. bryg. Włodzimierz Nowak Departament Polityki Zbrojeniowej Ministerstwo Obrony Narodowej	17
6.3.	Metrologia noktowizyjna, prof. dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski, INFRAMET	21
6.4.	Zastosowanie termowizji w pracach naukowo-badawczych prowadzonych w WITU, dr hab. Inż. Waldemar Świdorski, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia	28



6.5.	Polimerowe ogniwa fotowoltaiczne zawierające nanocząstki srebra, dr hab. Agnieszka Iwan, Instytut Elektrotechniki	34
6.6.	Systemy obrazowania trójwymiarowego: dokumentacja, analiza i wizualizacja 3D miejsc zdarzeń, prof. dr. hab. Małgorzata Kujawińska, Robert Sitnik, Politechnika Warszawska	39
6.7.	System optyczny do nieinwazyjnego monitorowania zmian utlenowania kory mózgowej podczas treningu pilotów Sił Powietrznych RP w warunkach przeciążeń, dr hab. inż. Łukasz Dziuda, Wojskowy Instytut Medycyny Lotniczej	43
6.8.	Kwantowe lasery kaskadowe, prof. dr hab. Maciej Bugajski, Instytut Technologii Elektronowej	48
6.9.	Aparatura kontrolno-pomiarowa do badań kamer termowizyjnych, kamer VIS-NIR, kamer SWIR, dalmierzy laserowych oraz wielosensorowych systemów obserwacyjnych, prof. dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski, INFRAMET	53
6.10.	Światłowodowy System Pomiarowy w łączy transmisyjnym, Piotr Stępczak, Politechnika Poznańska	59
6.11.	Łączność optyczna jako technologia bezprzewodowej wymiany danych. Sposoby implementacji i ograniczenia, prof. E. Sędek, PIT-RADWAR S.A.	65
6.12.	Optyka dyfrakcyjna i detekcja UV.-Przykład zastosowania w analizatorze widma pożarów, prof. nzw. dr hab. inż. Lech Dobrzański, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych	71
7.	Podziękowanie	73
8.	Dane kontaktowe	74

1. SŁOWO WSTĘPNE

Szanowni Państwo,

Serdecznie zapraszam Państwa do uczestnictwa w I Konferencji Optoelektronicznej pod tytułem „Optoelektronika dla bezpieczeństwa państwa i obywateli”, która odbędzie się w dniach 7-8 października 2015 roku w Hotelu Ossa Congress & SPA w Rawie Mazowieckiej. I Konferencja Optoelektroniczna została objęta patronatem honorowym Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Wojskowej Akademii Technicznej.

I Konferencja Optoelektroniczna pod tytułem „Optoelektronika dla bezpieczeństwa państwa i obywateli” organizowana jest przez PCO S.A. przy współudziale Wojskowej Akademii Technicznej, Polskiej Platformy Technologicznej Fotoniki oraz Politechniki Warszawskiej.

Podstawowym celem przedsięwzięcia jest wymiana doświadczeń pomiędzy przedstawicielami przemysłu, nauki oraz wojska w zakresie optoelektroniki, a także zapoczątkowanie cyklicznej konferencji optoelektronicznej wpisującej się w Strategię Europa 2020, a co za tym idzie za inicjowanie współpracy naukowej, badawczej oraz wdrożeniowej pomiędzy uczelniami, jednostkami badawczo-rozwojowymi i przemysłem zbrojeniowym.

Wśród prelegentów znaleźli się przedstawiciele przedsiębiorstw działających w branży wojskowej, ośrodków badawczo-rozwojowych oraz uczelni wyższych.

Tematyka konferencji obejmuje między innymi takie zagadnienia jak: optoelektronika w systemach obronnych kraju i bezpieczeństwa obywateli, badania, rozwój, wdrożenie, eksploatacja-zasady wprowadzania urządzeń optoelektronicznych do służb bezpieczeństwa kraju, nowe materiały, technologie, podzespoły optoelektroniczne, a także aplikacje urządzeń i technologii optoelektronicznych.

Mam nadzieję, że organizowana konferencja przyczyni się do jeszcze lepszej współpracy pomiędzy wojskiem a światem przemysłu i nauki, a także będzie okazją do szerokiej dyskusji na temat możliwości polskiej optoelektroniki. Dyskusja ta będzie miała szansę być kontynuowana podczas kolejnych edycji konferencji.

Zapraszam Szanownych Uczestników do aktywnego udziału w konferencji oraz do zapoznania się z niniejszym opracowaniem zawierającym zbiór przedstawionych referatów.

dr inż. Ryszard Kardasz
Prezes Zarządu
PCO S.A.



2. GOSPODARZE KONFERENCJI



PCO S.A.

PCO S.A. jest spółką należącą do Polskiej Grupy Zbrojeniowej, a także centrum badawczo-produkcyjnym, w którym wszystkie powstające i sprzedawane wyroby są efektem prac własnego zaplecza badawczo-rozwojowego. Podstawową

działalnością PCO S.A. jest produkcja i sprzedaż wyrobów optoelektronicznych, przyrządów obserwacyjnych i celowniczych z zastosowaniem techniki laserowej, noktowizyjnej i termowizyjnej dla potrzeb wojska.



PPTF

Polska Platforma Technologiczna Fotoniki

Polska Platforma Technologiczna Fotoniki

Polska Platforma Technologiczna Fotoniki (w skrócie PPTF) powstała w dniu 27 lutego 2013 roku w siedzibie PCO S.A. Powstanie platformy było wspólnym przedsięwzięciem przedsiębiorstw, stowarzyszeń, wyższych uczelni oraz instytutów badawczych działających w Polsce w obszarze fotoniki, które wpisywało się w podejście Unii Europejskiej wobec najbardziej innowacyjnych obszarów gospodarki w Europie.

Inicjatywa UE w zakresie budowy europejskich platform technologicznych służy osiągnięciu znacznych efektów wzrostu gospodarczego poprzez inicjowanie i wdrażanie działań innowacyjnych w partnerstwie publiczno-prywatnym.

Stawiając czoło wyzwaniom naukowo-technicznym, nakreślonym w Strategii Europa 2020 i w polskich dokumentach strategicznych dotyczących rozwoju kraju, fotonika jest obecnie jedną z kluczowych technologii UE.

PPTF ma charakter otwarty, w każdej chwili mogą przystąpić do niej nowi członkowie. Członkami PPTF mogą być jednostki organizacyjne, które prowadzą działalność naukową, gospodarczą lub będące organizacjami rządowymi, samorządowymi lub pozarządowymi związanymi z fotoniką lub deklarującymi działalność na rzecz rozwoju fotoniki w Polsce.



Wojskowa Akademia Techniczna

Wojskowa Akademia Techniczna powołana ustawą z 1951 roku, jest publiczną uczelnią akademicką nadzorowaną przez ministra obrony narodowej. Jako otwarty uniwersytet techniczny służy Siłom Zbrojnym, nauce, gospodarce i społeczeństwu poprzez kształcenie podchorążych i studentów, rozwój kadry naukowo-dydaktycznej oraz prowadzenie badań naukowych i prac rozwojowych w obszarach nauk ścisłych, technicznych i społecznych, a w szczególności w zakresie techniki wojskowej i technologii bezpieczeństwa. Współpracuje

z uczelniami akademickimi w kraju i za granicą. W myśl nadrzędnej dewizy: Omnia pro Patria Akademia kontynuuje chlubne tradycje technicznych szkół wojskowych: Szkoły Rycerskiej, Szkoły Głównej Artylerii i Inżynierii oraz Wyższej Szkoły Inżynierii Wojskowej. Przygotowuje przyszłe kadry inżynierskie, przekazuje wiedzę, kształtuje umiejętności i doskonali kompetencje na najwyższym poziomie, ucząc jednocześnie patriotyzmu i odpowiedzialności za Ojczyznę.



Politechnika Warszawska

Politechnika Warszawska - tradycja Politechniki Warszawskiej - największej i najstarszej uczelni technicznej w Polsce - sięga początków XIX wieku. Za datę powstania szkolnictwa technicznego w Warszawie przyjmuje się rok 1826, w którym została otwarta Szkoła Przygotowawcza do studiów technicznych. Inicjatorem powstania szkoły i autorem programu nauczania był działający w Komisji Wyznań Religijnych i Oświecenia Publicznego Stanisław Staszic - wszech-

stronny uczony i działacz oświaty. Na Politechnice Warszawskiej zgromadzony jest największy w Polsce potencjał naukowo-badawczy w dziedzinie nauk technicznych. Tu powstaje największa liczba liczących się w kraju i za granicą opracowań naukowych. O randze Politechniki Warszawskiej świadczą liczne umowy o współpracy z innymi uczelniami, wymiana kadry i studentów oraz wspólne programy badawcze.

3. KOMITETY KONFERENCJI

Komitet Honorowy

1. Wojciech Dąbrowski (Prezes PGZ S.A.)
2. płk Piotr Gąstał (Dowódca Jednostki Wojskowej GROM)
3. Adam Janik (Prezes ZM Bumar-Łabędy S.A.)
4. dr inż. Ryszard Kardasz (Prezes PCO S.A.)
5. gen. dyw. Zygmunt Mierczyk (Rektor Komendant Wojskowej Akademii Technicznej)
6. gen. bryg. Stanisław Olszański (Szef Zarządu Wojsk Pancernych i Zmechanizowanych)
7. Waldemar Skowron (Prezes Zarządu Mesko S.A.)
8. Adam Struzik (Marszałek Województwa Mazowieckiego)
9. prof. dr hab. inż. Jan Szmidt (Rektor Politechniki Warszawskiej)
10. gen. broni Marek Tomaszewski (Dowódca Operacyjny Rodzajów Sił Zbrojnych)
11. gen. broni Anatol Wojtan (I z-ca Szefa Sztabu Generalnego WP)

Komitet Naukowy

1. prof. dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski (INFRAMET)
2. dr Marek Daszkiewicz (Instytut Optyki Stosowanej)
3. dr hab. inż. Łukasz Dziuda (Wojskowy Instytut Medycyny Lotniczej)
4. dr Jacek Galas - Profesor INOS (Dyrektor Instytutu Optyki Stosowanej)
5. prof. dr hab. inż. Andrzej Jeleński (Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych)
6. płk dr inż. Krzysztof Kopczyński (Dyrektor Instytutu Optoelektroniki WAT)

7. Mariusz Krawczak (PCO S.A.)
8. prof. dr hab. inż. Małgorzata Kujawińska (Politechnika Warszawska)
9. dr hab. inż. Henryk Madura – profesor WAT (Wojskowa Akademia Techniczna)
10. płk Marek Malawski (Inspektorat Implementacji Innowacyjnych Technologii Obronnych)
11. dr inż. Tomasz Mirosław (PCO S.A.) – Przewodniczący
12. dr Zygmunt Mogiła-Lisowski (PCO S.A.)
13. dr inż. Marcin Muszkowski (PCO S.A.)
14. Stanisław Natkański (Członek Zarządu, Dyrektor Techniczny PCO S.A.)
15. gen. bryg. Włodzimierz Nowak (Dyrektor Departamentu Polityki Zbrojeniowej MON)
16. Adam Piotrowski (Prezes Zarządu Vigo System S.A.)
17. prof. Ryszard Romaniuk (Stowarzyszenie Elektryków Polskich)
18. Karol Szyszkiewicz (PCO S.A.) – Sekretarz
19. dr inż. Stanisław Walicki (Dyrektor Departamentu Nauki i Szkolnictwa Wojskowego MON)
20. prof. dr hab. inż. Tomasz Woliński (Polskie Stowarzyszenie Fotoniczne)
21. Jerzy Wiśnioch (PCO S.A.)
22. płk Maciej Zając (Inspektorat Uzbrojenia)

Komitet Organizacyjny

Dział Komunikacji i PR PCO S.A.
Przewodniczący-Aleksandra Celer (PCO S.A.)



4. PATRONI I SPONSORZY KONFERENCJI

Patronat



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Wojskowa Akademia Techniczna



Wojsko i Technika



Zespół Badań i Analiz Militarnych

Sponsorzy



instytut lotnictwa
warszawa, rok założenia 1926

Instytut Lotnictwa



treston
ergona
MEBLE ESD

Treston Ergona



TELESYSTEM

CRW Telesystem-Mesko Sp. z o.o.

5. STRESZCZENIA

5.1 Optoelektroniczne technologie podwójnego zastosowania w Programie Modernizacji Technicznej Sił Zbrojnych RP.

gen. dyw. prof. dr hab. inż. Zygmunt Mierczyk, Wojskowa Akademia Techniczna

Realizacja Programu Modernizacji Technicznej Sił Zbrojnych RP generować powinna nowoczesne technologie, w tym technologie podwójnego zastosowania („Dual Use Science & Technology”). Rozwijane i wdrażane będą technologie uważane powszechnie za najbardziej innowacyjne, decydujące o rynkowej przewadze konkurencyjnej i rozwijające całą gospodarkę. Będą to m.in. technologie dotyczące systemów informacyjnych i telekomunikacyjnych, sensorów, efektywnych źródeł energii, zaawansowanych materiałów, nanotechnologii, mikro- i nano-elektroniki, fotoniki, biotechnologii i medycyny kwantowej. Będą to także badawcze, treningowe i wspomagające platformy modelowania i symulacji działań bojowych w wielowymiarowej przestrzeni. Szczególnie istotne będą technologie i rozwiązania wzmacniające czynnik ludzki w sytuacjach ekstremalnych. Dziedziny te wykorzystują najnowsze osiągnięcia nauk ścisłych i technicznych, stymulując jednocześnie rozwój tych dyscyplin naukowych. W wielu państwach NATO transfer technologii od zastosowań wojskowych do wykorzystania w sektorze cywilnym jest integralnie związany z technologiami podwójnego zastosowania. Komercjalizacja takich technologii odbywa się poprzez znalezienie dla nich właściwego zastosowania cywilnego. W tej sytuacji nakłady na technologie militarne należałoby traktować jako inwestycje, które charakteryzują się odpowiednio wysokim mnożnikiem inwestycyjnym oraz przynoszą tzw. efekty zewnętrzne w postaci rozprzestrzeniania się innowacji. Technologie podwójnego zastosowania umożliwiają obniżanie kosztów wprowadzania na rynek nowych wyrobów i rozwiązań. Odpowiednio koordynowane mogą przyczynić się do rozwoju całych sektorów gospodarki przy równoczesnym dofinansowaniu prac na

rzecz systemu obronnego państwa.

W referacie omówione zostaną wybrane urządzenia i systemy optoelektroniczne opracowane na potrzeby wybranych Programów Modernizacji Technicznej SZ RP oraz systemów monitorowania zagrożeń bezpieczeństwa, które zostały praktycznie zastosowane w różnych obszarach przemysłu, energetyce, transporcie, budownictwie, metrologii, ochronie środowiska i medycynie.

W referacie zaprezentowane zostaną przykłady opracowanych w Wojskowej Akademii Technicznej urządzeń i systemów optoelektronicznych przeznaczonych do monitorowania różnych zagrożeń. Na podstawie prowadzonych badań i analiz charakterystyk spektroskopowych: absorpcyjnych, emisyjnych, rozproszeniowych, polaryzacyjnych i fluorescencyjnych różnych ośrodków, struktur i obiektów oraz infrastruktury, opracowano przyrządy laserowej telemetrii, systemy monitorowania środowiska i zobrazowania przestrzennego oraz urządzenia do diagnostyki i terapii medycznej. Systemy te składają się z modułów funkcjonalnych, konfigurowanych na konkretne zapotrzebowanie. Mogą być rozbudowane o dodatkowe czujniki, funkcje pomiarowe, systemy transmisji i przetwarzania danych.

Zastosowanie nowoczesnych technologii militarnych w gospodarce jest w krajach wysoko rozwiniętych procesem powszechnym, gdyż umożliwia współfinansowanie prac badawczo-rozwojowych na rzecz systemu bezpieczeństwa, zarówno przez budżet państwa, jak i kapitał prywatny, który jest zainteresowany aplikacjami opracowanych nowoczesnych technologii.

5.2 Moduły detekcyjne do zastosowań wojskowych i w systemach bezpieczeństwa.

Adam Piotrowski, Józef Piotrowski, Waldemar Gawron, Zbigniew Orman i Marcin Ratajczyk, VIGO System S.A.

Detektory i moduły detekcyjne produkowane w VIGO System S.A. znajdują ważne zastosowania wojskowe i w systemach bezpieczeństwa; systemach ostrzegających, lidarach, dalmierzach, systemach detekcji niebezpiecznych materiałów w szczególności ładunków wybuchowych, toksyn, narkotyków itd. Zastosowania te wymagają niejednokrotnie detektorów i modułów dedykowanych. Na przykład do wykrywania materiałów niebezpiecznych, stosowane są optoelektroniczne systemy detekcji śladowych ilości gazów o najwyższej czułości (ppb i ppt). Wymagają one użycia modułów detekcyjnych wykrywających promieniowanie podczerwone o długościach fal odpowiadających pasmom absorpcji wykrywanych substancji, charakteryzujących się wysoką wykrywalnością, zbliżoną do fundamentalnych granic określonych szumem fotonów, nanosekundową szybkością działania, niezawodną i wygodną pracą. VIGO System S.A. współpracuje z największymi ośrodkami badawczymi na świecie w celu stworzenia nowych systemów sensorycznych. Wiele tych wspólnych opracowań

zostaje wdrożone do zastosowań specjalnych dla wojska, policji, straży granicznej czy służb ochrony.

Prace badawczo-wdrożeniowe nad detektorami podczerwieni z HgCdTe pracującymi bez chłodzenia kriogenicznego są polską specjalnością optoelektroniczną dobrze rozpoznawalną w świecie. Przedstawione w prezentacji rozwiązania modułów detekcyjnych są rozwinięciem wcześniejszych opracowań firmy VIGO System S.A., która od wielu lat rozwija, wdraża i produkuje detektory średniej i dalekiej podczerwieni pracujące bez chłodzenia kriogenicznego. Detektory te i moduły detekcyjne są eksportowane i stosowane w nowoczesnych systemach optoelektronicznych rozwijanych przez najbardziej zaawansowane technologicznie firmy na świecie. Znajdują one ważne zastosowania cywilne i wojskowe w Polsce i w wielu innych krajach na świecie. Nieustanne prace badawczo-rozwojowe prowadzą do powstania nowych typów o istotnie lepszych parametrach i niższych kosztach produkcji.

6. REFERATY

6.1. Wybrane technologie fotoniczne w zastosowaniach militarnych.

Jacek Galas, Marek Daszkiewicz, Instytut Optyki Stosowanej imienia prof. Maksymiliana Pluty

Streszczenie

Rozwój technologii fotonicznych umożliwił budowę systemów militarnych o nowych własnościach, które nie były możliwe do uzyskania przy wykorzystaniu klasycznych technologii elektronicznych. W ostatnich latach utworzone zostały technologiczne centra wytwórcze zaawansowanych układów optycznych. W artykule omówiono technologię Mikro-Optyki Scalonej w

„wolnej przestrzeni”, stan technologii Optyki Dyfrakcyjnej w mikro i makro skali, stan technologii Planarnych Fotonicznych Układów Scalonych, zastosowania technologii fotonicznych w układach radiolokacyjnych i technologii radarowej.

Słowa kluczowe: Fotonika, technologie fotoniczne, MOEMS, fotoniczne układy scalone

Wstęp

Referat przedstawia wybrane zaawansowane technologie fotoniczne, które umożliwiają budowę nowej generacji systemów militarnych. Technologie te są aktualnie rozwijane przez państwa o najwyższym poziomie rozwoju naukowego i technologicznego takie jak USA, Kanada, Japonia, Korea Płd., Niemcy, Francja, Wielka Brytania, Holandia, Belgia, Finlandia. W ostatnich latach utworzone zostały technologiczne centra wytwórcze zaawansowanych układów optycznych. Dostęp do nich umożliwia projektowanie i rozwój nowych rozwiązań w polskich instytutach badawczych i wyższych uczelniach, a następnie wykorzystanie ich przez polski przemysł do budowy nowych generacji systemów militarnych.

W referacie omówione zostały technologie 3D Mikro-Optyki Scalonej i hybrydowej, stan technologii Optyki Dyfrakcyjnej w mikro i makro skali, stan technologii Planarnych Fotonicznych Układów Scalonych, technologię układów fotonicznych wykorzystujących układy Akusto-Optyczne.

Przedstawione zostały wybrane aplikacje technologii fotonicznych w obszarze analizy sygnałów RF dające możliwość budowy wysoce szerokopasmowych systemów rozpoznania radiolokacyjnego oraz w budowie nowej generacji systemów radarowych. W układach tych znaczącą część układów mikrofalowych zastąpiono fotonicznymi układami scalonymi, co doprowadziło do zmniejszenia poziomu szumów w układach oraz umożliwiło budowę radarów na bardzo wysokie częstotliwości oraz radarów z fazowym sterowaniem odchylaniem wiązki radarowej. Technologie umożliwiają również miniaturyzację sprzętu radarowego oraz zapewniają większą jego odporność na zakłócenia elektroniczne.

Omówione zostały również prace w tym zakresie prowadzone w Instytucie Optyki Stosowanej im. prof. Maksymiliana Pluty.

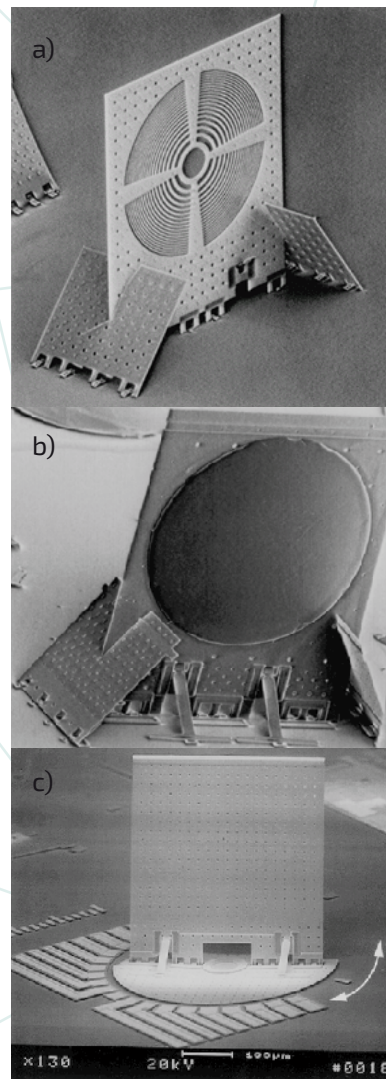
Technologia optycznych układów scalonych typu MOEMS

Historia scalonych układów optycznych typu MOEMS sięga lat 90-tych, kiedy to zademonstrowano opracowaną przez Rockwell Science Center i University of California (UCLA) technologię tworzenia scalonych układów optycznych w wolnej przestrzeni [1-3] („free-space micro-optical bench systems”, „Integrated 3D Optics”). Oparta jest ona o powierzchniową technologię mikroobróbki materiałów półprzewodnikowych, przede wszystkim krzemu, wykorzystującą technologię fotolitografii. Technologia umożliwia tworzenie mikro-optycznych łań z zespołami elementów umożliwiającymi precyzyjne pozycjonowanie wieloskładnikowych systemów, złożonych z pasywnych elementów optycznych (soczewek, siatek dyfrakcyjnych, dzielników wiązki świetlnej, filtrów), mikro-pozycjonerów (stoliki przesuwne i obrotowe) oraz aktywnych komponentów fotonicznych (układy fotodetektorów, laserów, diod LED). Technologia była rozwijana również przez inne grupy badawcze [4,5]. Przykłady elementów optycznych wykonanych w technologii MOEMS przedstawia Rys.1¹.

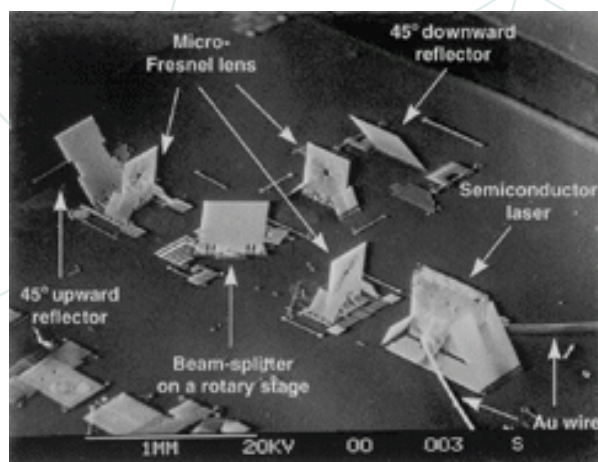
Fotoniczny układ scalony o dużym poziomie integracji, zawierający układ lasera, system zwierciadeł, układ soczewek dyfrakcyjnych, dzielnik wiązki oraz fotodetektor przedstawia Rys.2².

Nie wszystkie komponenty optyczne można wykonać w technologii fotolitograficznej. Opisana technologia nie nadaje się do integrowania ze sobą podzespołów takich jak soczewki szklane, płytki fazowe, elementy akusto-optyczne. Technologia tworzenia optycznych układów scalonych została rozwinięta w kierunku umożliwiającym tworzenie układów hybrydowych, w których większe elementy optyczne mogą być integrowane ze sobą za pomocą mikro-montażu [6].

Opracowano standaryzowane, dyskretne mikro-elementy opto-mechaniczne takie jak mikro-zwierciadła, mikro-otwory oraz uchwyty elementów optycznych, które mocowane są do wytrawionych na powierzchni wafera mini łań optycznych. Elementy te wykonywane są metodą fotolitograficzną w płytkach krzemowych, dzięki czemu uzyskuje się duże dokładności i powtarzalność wykonania. Rys.3³ przedstawia przykładowe elementy przeznaczone do mikro-montażu, oraz fragment zmontowanego układu optycznego.



Rys. 1. Przykłady elementów MOEMS, a) soczewka dyfrakcyjna, b) soczewka refrakcyjna, c) przestrzajalny mikro-filtr Fabry-Perrot zintegrowany ze stolikiem obrotowym.

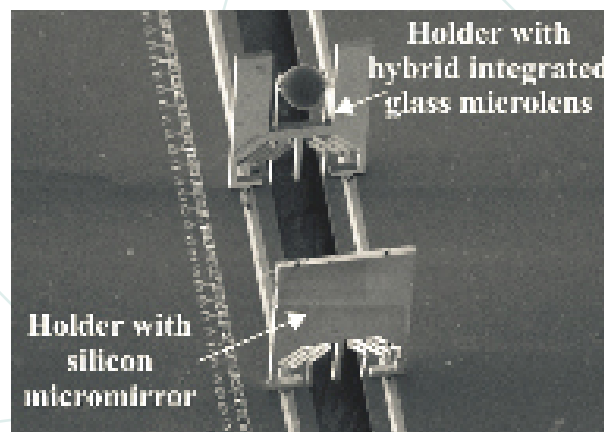
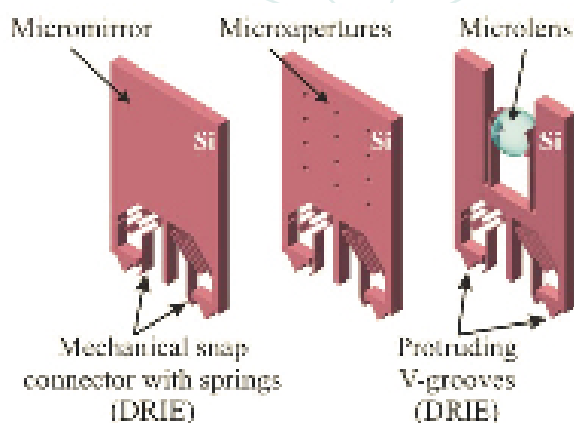


Rys.2. Fotoniczny układ scalony o wysokim poziomie integracji.

¹ Fotografia z artykułu [4]

² Fotografia z artykułu [4]

³ Fotografia z artykułu [6]

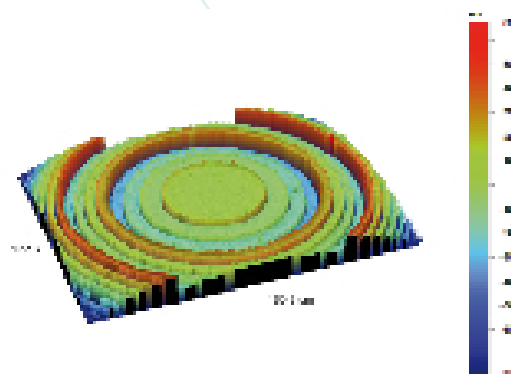


Rys.3. Przykładowe komponenty oraz fragment mini układu optycznego.

Technologia Optyki Dyfrakcyjnej

Propagacja światła w układach optyki dyfrakcyjnej podlega prawom optyki falowej. Przegląd rozwiązań oraz technologii optycznych zamieszczono w [7]. Dostępną w Polsce technologię wykonywania elementów dyfrakcyjnych przedstawiono w [8]. Dokonania opisane w publikacjach [8-10] powstały w wyniku prac badawczych prowadzonych w konsorcjach z udziałem INOS. Jeden element **DEO** jest w stanie zastąpić kilka elementów optycznych wykonanych w technologii klasycznej.

Obecnie **DEO**, w zależności od zakresu λ dla którego są projektowane, wykonywane są z takich materiałów jak: CaF_2 , Fused Silica, Kwart krystaliczny, Display Glasses, Pyrex, SF57 High Index Glass, Plastics, Cleartran, GaAs, GaP, Si, ZnSe, ZnS, Ge i Szafir.



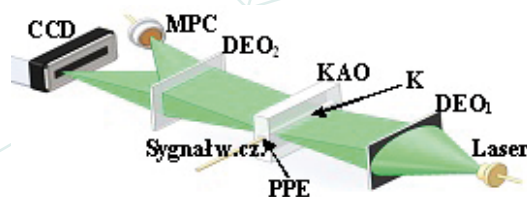
Rys.4. Obraz 3D soczewki wykonanej w technologii optyki dyfrakcyjnej.

Obraz 3D soczewki dyfrakcyjnej wykonanej w ITME uzyskany przy pomocy mikroskopowego profilometru optycznego (interferometru światła białego) przedstawia Rys.4.

Technologia Optyki Dyfrakcyjnej w zastosowaniach Radiolokacyjnych

Wykorzystując technologię optyki dyfrakcyjnej INOS wykonał we współpracy z PIT, PW i ITME prototyp fotonicznego szerokopasmowego układu do detekcji, analizy i rozpoznania sygnałów radarowych jako element szerokopasmowej stacji rozpoznania radiolokacyjnego typu ELINT [11]. Rys.5 przedstawia schemat szerokopasmowego analizatora sygnałów wysokiej częstotliwości.

W układzie powyższym analizowany sygnał w.cz. doprowadzony jest do przetwornika piezoelektrycznego **PPE**, który wytwarza w kryształce akustooptycznej **KAO** falę „akustyczną” o częstotliwości równej częstotliwości sygnału w.cz. rozchodzącej się w obszarze kanału **K**. Światło laserowe ogniskowane jest przez **DEO**₁



Rys.5. Fotoniczny szerokopasmowy system analizy sygnałów w. cz. zaprojektowany w technice optyki dyfrakcyjnej.

ogniskuje wiązkę laserową w kanale fali akustycznej. Światło ugięte na fali akustycznej zbierane jest przez drugi element **DEO**₂ i ogniskowane na fotolinijce **CCD**. Część ugiętego światła kierowana jest do miernika parametrów czasowych im-

pulsu w.cz. **MPC**. Sygnał z **CCD** opisuje rozkład spektralny (częstotliwościowy) sygnału w.cz. Układ charakteryzuje się pasmem analizy **0,5 GHz** i rozdzielczością **1 MHz**. Układ wykorzystano w pracach badawczych z dziedziny radioastronomii.

Technologia Planarnych Fotonicznych Układów Scalonych

Technologia stosunkowo tanich fotonicznych układów scalonych stała się dostępna na rynku w 2011 r. W technologii tej opracowano standaryzowane elementy fotoniczne, które łączone w różnych konfiguracjach pozwalają na budowę skomplikowanych fotonicznych układów scalonych. Stan technologii Planarnych Fotonicznych Układów Scalonych wraz z przykładowymi rozwiązaniami opisano w [12-14]. Przegląd ciekawych układów scalonych wykonanych w technologii umożliwiającej szybkie i stosunkowo tanie prototypowanie oraz ich przemysłowe powielanie opisano w [15].

W technologii tej wykonywane są: światłowody, łączniki i dzielniki wiązki, multiplexery i demultiplexery, modulatory fazy i amplitudy światła, przełączniki wiązek świetlnych, lasery impulsowe i pracy ciągłej, lasery generujące na wielu długościach fal, konwertery długości fali, ultraszybkie przełączniki światła, konwertery polaryzacji, linie opóźniające.

Opracowanie powtarzalnych elementów fotonicznych, integrowanych w jednym układzie scalonym, umożliwiło dopracowanie ich parametrów optycznych i częstotliwościowych. Komponenty mogą pracować z częstotliwościami dochodzącymi do 40 GHz. Zakres częstotliwości pracy elementów fotonicznych umożliwia zastosowanie ich w systemach militarnych oraz podwójnego zastosowania. Technologia umożliwia wykonywanie elementów fotonicznych z różnych materiałów takich jak Si, InP, GaAs, LiNbO₃.

W technologii tej INOS we współpracy z PW opracował układ do wyznaczania różnicy faz

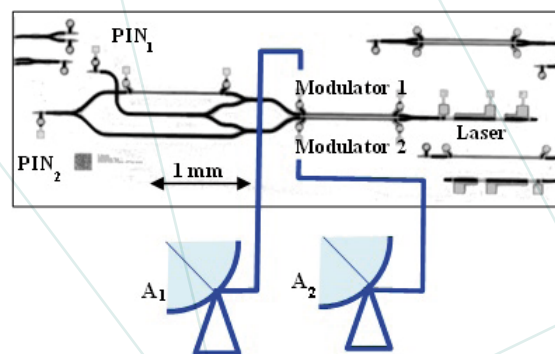
Wnioski

Szybki rozwój technologii fotonicznych umożliwia budowę nowej generacji systemów militarnych. Postęp ten umożliwia opracowanie układów radiowych, radiolokacyjnych i radarowych o parametrach trudnych lub niemożliwych do osiągnięcia w tradycyjnych technologiach elektronicznych.

Obecnie technologie fotoniczne umożliwiają budowę wysoce szerokopasmowych układów analizy sygnałów w.cz., w których stosuje się wielokanałowe komórki akustooptyczne. Układy takie pozwalają analizować sygnały w pasmie kilku GHz [11].

dwóch sygnałów w.cz., którego fotografię przedstawia Rys.6. Układ składa się z lasera, 2 modulatorów i 2 fotodiod PIN i jest w stanie analizować sygnały o częstotliwości kilku GHz.

Technologie fotoniczne umożliwiają budowę nowej generacji systemów komunikacji bezprze-



Rys. 6. Fotografia fotonicznego układu scalonego do pomiaru różnicy faz sygnałów w.cz.

wodowej oraz radarów fotonicznych, w których elektroniczne układy sterowania zastąpione są układami fotonicznymi [16,17]. Umożliwiają one opracowanie sterowanego softwarowo cyfrowego radia oraz nowej architektury systemów radarowych (software defined radio and radar architecture) opartych o układy fotoniczne. Nowe rozwiązania cechować się będą softwarową rekonfigurowalnością, wysoką stabilnością sygnału, umożliwią generację sygnałów o bardzo wysokich częstotliwościach (>60 GHz), dogodnym przełączaniem częstotliwości (frequency hopping), jednoczesną generacją wielu częstotliwości oraz budową systemów całkowicie cyfrowych, bez konieczności stosowania konwersji up/down.

Miniaturyzacja klasycznych układów optycznych w połączeniu ze zminiaturyzowanymi elementami mechanicznymi i elektronicznymi umożliwia budowę w technologii MOEMS (Micro-Opto-Electronic-Mechanical_Systems) zminiaturyzowanych systemów pomiarowych. Przykładem jest wprowadzony na rynek przez firmę

Hamamatsu zminiaturyzowany spektrometr Fourierowski FTIR.

Postęp w dziedzinie układów akusto-optycznych, optyki dyfrakcyjnej i detektorów macierzowych CCD umożliwia budowę wysoce szerokopasmowych układów do spektralnej analizy sygnałów w.cz. o podwyższonej w stosunku do wykonywanych obecnie przez INOS i PIT dynamii

ce oraz zdecydowanie szerszym pasmie analizy (1 GHz ÷ 16 GHz).

Rozwój powyższych technologii w Polsce jest niezbędny, jeśli chcemy rozwijać w naszym kraju produkcję sprzętu wojskowego nowych generacji a nie być tylko importerem myśli technologicznej powstałej poza Polską.

Literatura

- [1] M. E. Motamedi, *Merging Micro-optics with Micromechanics: Micro-Opto-Electro-Mechanical (MOEM) devices*, Critical Reviews of Optical Science and Technology, V. CR49, SPIE Annual Meeting, "Proceeding of Diffractive and Miniaturized Optics", 1993, July, 302-328,
- [2] Lin L.Y. et al., *Micro-machined three-dimensional micro-optics for integrated free-space optical system*, IEEE Photon. Techn. Lett., 1994, 6, 1445-1447.
- [3] Pister K. S. J. et al., *Microfabricated hinges*, "Sensors and Actuators A", 1992, 33, 249-256.
- [4] Ming C. Wu et al., *Integrated devices make an optical bench on a chip*, "Laser Focus World", 1996, Feb, 64-68.
- [5] Solgaard O. et al., *Optical MEMS From Micro-mirrors To Complex Systems*, "IEEE Photon. Technol. Lett.", 1995, 7, 41-43.
- [6] Bargiel S. et al. *MOEMS-based optical instrumentation on-chip*, „Micromanipulation for Micro and Nano Systems, FEMTO-ST, Besançon, 2012.
- [7] O'Shea D. C. at al., *Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Tests* SPIE Tutorial texts, Bellingham, 2003, <http://ebooks.spiedigitallibrary.org/book.aspx?bookid=157>
- [8] Kowalik A. at al., *Multi-step electron beam technology for the fabrication of high performance diffractive optical elements*, "Micro-electronic Engineering", 2005, 77 347-357.
- [9] Jaroszewicz Z. at al., *Generalized zone plates focusing light into arbitrary line segments*, "J. Mod. Opt.", 1993, 40, 601-612.
- [10] Kolodziejczyk A. at al., *Focusing properties of the elliptical zone plate designed for the non-paraxial zone of diffraction* – experimental verifications, European Optical Society Topical Meeting on Diffractive Optics, EOS, Warsaw, Poland, 2005.
- [11] Galas J. at al., *Szerokopasmowe wielokanałowe fotoniczne systemy rozpoznania i walki radioelektronicznej*, X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej KNTWE, Paprotnia, 2014, Materiały konferencyjne.
- [12] Janz S., at al., *Silicon-based integrated optics: Waveguide technology to microphotronics*, Materials Research Society fall meeting, MRS, Boston, 2004. paper F1.1.
- [13] Bogaerts W. at al., *Basic structures for photonic integrated circuits in silicon-on-insulator*, Optics Express, 2004, 12, 1583-1591.
- [14] Scherer A., *Silicon Photonics – last 15 years*, <http://www.madebooks.net/file/W8k/a-scherer-silicon-photonics-last-15-years.html>
- [15] Ławniczuk K., *Multiwavelength Transmitters in Generic Photonic Integration Technologies*, rozprawa doktorska, Eindhoven University, Politechnika Warszawska, Eindhoven-Warszawa, 2013.
- [16] Ghelfi, P at al., *Photonic generation and independent steering of multiple RF signals for software defined radars*, "Optics Express", 2013, Vol.21, No.19, 22905-22910.
- [17] Ghelfi, P at al., *A fully photonics-based coherent radar system*, "Nature", 20 March 2014, Vol. 507, 341-345.

6.2. Założenia systemowego podejścia do procesu pozyskiwania sprzętu wojskowego w kontekście realizacji Polityki Zbrojeniowej MON.

gen. bryg. Włodzimierz Nowak, Departament Polityki Zbrojeniowej, Ministerstwo Obrony Narodowej

Polityka Zbrojeniowa MON powinna być istotnym instrumentem Polityki Zbrojeniowej Państwa służącym zabezpieczeniu interesów narodowych w dziedzinie bezpieczeństwa, wynikających z art. 5 Konstytucji RP ukierunkowanym na osiągnięcie celów strategicznych określonych w Strategii Bezpieczeństwa Narodowego RP oraz w Strategii Rozwoju Systemu Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej 2022. Wywiera ona istotny wpływ na zapewnienie suwerenności i bezpieczeństwa państwa tworząc jednocześnie prestiż i znaczenie kraju na arenie międzynarodowej. Wykładnią polityki zbrojeniowej jest potencjał obronny rozumiany jako zdolność do przeciwdziałania zagrożeniom naruszenia suwerenności, integralności i bezpieczeństwa państwa, uwarunkowana zdolnościami operacyjnymi sił zbrojnych państwa, stanem aktywów infrastruktury obronnej państwa i możliwościami zaplecza przemysłowo-naukowego realizującego zadania na rzecz sił zbrojnych państwa. Zadaniem kierowanego przeze mnie DPZ jest m. in. opracowanie dokumentu pn. „Założenia Polityki Zbrojeniowej MON na lata 2014–22”.

Środowisko polityki zbrojeniowej to zespół czynników i uwarunkowań w wymiarze globalnym, europejskim, regionalnym i krajowym mających wpływ na proces kształtowania się Polityki Zbrojeniowej MON, tak w odniesieniu do systemu pozyskiwania określonych zdolności operacyjnych Sił Zbrojnych RP, jak i ustanawiania oraz rozwoju określonych zdolności naukowo-przemysłowych.

Analiza współczesnego środowiska polityki zbrojeniowej wskazuje, że w perspektywie najbliższych lat główne wyzwania i zagrożenia mające wpływ na politykę zbrojeniową będą związane

z dynamiką wzrostu i zmianą charakteru zagrożeń zewnętrznych, wymuszających potrzebę dokonywania rewizji niektórych programów operacyjnych i uzbrojenia pod kątem dostosowania ich do zwalczania nowego rodzaju zagrożeń, realizacją celów związanych z rozwojem zdolności obronnych NATO i UE, postępującą globalizacją produkcji uzbrojenia i sprzętu wojskowego i kumulacją kapitału zaangażowanego w tego rodzaju działalność, zacierającą niekiedy obraz bezpiecznego łańcucha dostaw, utrzymaniem stabilnych warunków finansowania modernizacji technicznej Sił Zbrojnych RP, bez względu na zmieniające się uwarunkowania ekonomiczne.

Przygotowaniu merytorycznemu i formalnemu realizacji programów operacyjnych i wynikających z nich programów uzbrojenia, które związane są z dostawami sprzętu wojskowego (SpW) towarzyszyć powinno określenie poziomu ambicji narodowych w zakresie udziału krajowego potencjału naukowo-przemysłowego w pozyskiwaniu SpW przez Siły Zbrojne RP. Określenie ambicji narodowych ma na celu wskazanie poziomu oczekiwań MON w zakresie pozyskania przez podmioty przemysłu obronnego, instytuty badawcze i ośrodki naukowo – badawcze technologii niezbędnych do serwisowania, montażu i produkcji pozyskiwanego SpW, który powinien zagwarantować samodzielność w zakresie zabezpieczenia jego całego cyklu życia. Poziom ambicji narodowych jest to zatem pożądaný, oczekiwany do osiągnięcia, przez podmioty krajowego naukowo-przemysłowego potencjału obronnego, zakres wykonania lub produkcji elementów oraz podsystemów pozyskiwanego SpW. Określenie poziomu ambicji narodowych w zakresie zaangażowania krajowego potencjału naukowo-przemysłowego w dostar-

czaniu do Sił Zbrojnych RP sprzętu wojskowego powinno wyznaczyć kierunki działania, w wyniku których w przyszłości osiągnięta zostanie zdolność do samodzielnej produkcji nowoczesnego SpW, a dojście do tej zdolności osiągnięte zostanie poprzez wykorzystanie już istniejących zdolności krajowych (prace własne) lub kreowanie nowych krajowych zdolności - realizację projektów krajowych (projekty rozwojowe realizowane w NCBR, prace rozwojowe, prace własne), albo krajowe podmioty naukowo-przemysłowe wspólnie z partnerem zagranicznym uczestniczyć będą w procesie dostarczania do Sił Zbrojnych RP sprzętu wojskowego (udział w wytwarzaniu wybranych elementów/podsystemów), m.in. poprzez udział w programach międzynarodowych, pracach badawczo-rozwojowych, programach/ projektach NATO i EDA, w tym także w pracach standaryzacyjnych oraz offset lub pozyskanie licencji.

Doświadczenia pokazują, że prace nad nowym uzbrojeniem powinny być realizowane w oparciu o wielopodmiotowe konsorcja naukowo-przemysłowe, co znacząco zmniejsza ryzyko niepowodzenia projektu oraz zapobiega dublowaniu wysiłków (wydatków) na pokrewne przedsięwzięcia realizowane przez różne podmioty. Z tego też względu Pion Uzbrojenia i Modernizacji wystąpił z inicjatywą oraz przyjął rolę mentora w zakresie łączenia się (niezależnie od stanu konsolidacji) podmiotów Przemysłowego Potencjału Obronnego do realizacji poszczególnych Programów Uzbrojenia. Potwierdzeniem tych intencji jest prowadzona przez MON polityka informacyjna w zakresie otwartej, możliwie szczegółowej prezentacji priorytetów modernizacyjnych SZ RP, w szczególności wymagań, jakie powinny spełniać zamawiane wyroby, a także terminów ich pozyskania. Pierwsze efekty tych działań są już widoczne w postaci konsorcjów, deklarujących swoją gotowość do realizacji wybranych projektów. W świetle przedstawionych działań jest oczywiste, że MON jest zainteresowane rozwojem krajowego potencjału naukowo-przemysłowego. W tym celu wykorzystuje dostępne instrumenty, pozwalające na wspieranie polskich podmiotów na płaszczyźnie politycznej (dyplomatycznej), organizacyjnej, a przede wszystkim ekonomicznej. Jestem przekonany, że ścisła współpraca środowiska wojskowego, naukowego i przemysłowego zaowocuje wprowadzeniem na wyposażenie SZ RP sprzętu wojskowego, wykorzystującego wiele nowatorskich rozwiązań technicznych (technologicznych). Potencjał polskiej myśli naukowej i dotychczasowe osiągnięcia przemysłu stwarzają takie możliwości.

Niestety z pełnym przekonaniem muszę powiedzieć, że niemożliwe jest oparcie modernizacji technicznej SZ RP jedynie na polskich firmach. Polska jest jednym z niewielu krajów nie tylko w NATO ale w ogóle na świecie, które w ostatnim czasie zwiększa swe nakłady na wojsko. Jest to nie tylko bardzo duże wyzwanie ale i wielka odpowiedzialność aby pieniądze te wydać rozsądnie i efektywnie z punktu widzenia wymagań operacyjnych jakim sprzęt powinien sprostać, z punktu widzenia bezpieczeństwa dostaw jak również zabezpieczenia całego „cyklu życia” sprzętu (czasem i 30 lat). Nieuprawnionym jest stwierdzenie, że można to jedynie albo przede wszystkim osiągnąć poprzez lokowanie zamówień w polskim przemyśle. Jako członek UE musimy respektować prawo zamówień publicznych, a argument ekonomiczny czy też społeczny jest niewystarczający, aby opierać się wyłącznie na polskim przemyśle. Poza tym nie zawsze dysponujemy odpowiednimi możliwościami, technologią czy „know how” aby sprostać temu wyzwaniu. Nieraz determinantem przy pozyskaniu sprzętu jest czas dostawy a tego często brakuje polskim firmom na badania rozwojowe, bo możliwości są. Dlatego też część zamówień musi być lokowana za granicą. Jednakże i w tym przypadku widzimy duże możliwości udziału polskich firm poprzez realizację umów offsetowych. Jest to szansa na pozyskanie nowych technologii, „know how” czy też polonizację uzbrojenia zakupionego u zagranicznych kontrahentów. Poprzez takie działania na pewno zwiększy się oferta polskiej „zbrojeniówki”, a także konkurencyjność naszych firm na rynku międzynarodowym. Jestem także pewien, że poprzez stworzenie po stronie polskiej dużego, silnego i przede wszystkim jednolitego podmiotu, jakim jest PGZ, mogącego być realnym konkurentem/partnerem dla dużych koncernów światowych rola i znaczenie polskiego przemysłu zbrojeniowego w świecie będzie rosta.

Mając na uwadze powyższe aspekty Resort Obrony Narodowej dysponuje usystematyzowanym systemem pozyskiwania sprzętu wojskowego. Zgodnie z Decyzją Nr 72/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 25 marca 2013 r. w sprawie pozyskiwania sprzętu wojskowego i usług dla Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej, system pozyskiwania, eksploatacji i wycofywania sprzętu wojskowego (SpW) jest zbiorem współdziałających ze sobą komórek i jednostek organizacyjnych resortu obrony narodowej realizujących przedsięwzięcia zapewniające pozyskiwanie, eksploatację i wycofywanie uzbrojenia i sprzętu wojskowego SZ RP oraz ich wzajemnych relacji. Jest on podzielony na kilka etapów.

W pierwszym etapie następuje identyfikacja potrzeb dla nowych lub istniejących zdolności operacyjnych SZ RP w oparciu o ustanowione koncepcje i strategię (w tym NATO i UE), scenariusze użycia SZ RP, analizę przewidywanego środowiska bezpieczeństwa oraz operacyjnego, a także wnioski z eksploatacji SpW. W wyniku prac określone zostają wymagania operacyjne niezbędne dla osiągnięcia zakładanych zdolności SZ RP. W kolejnym etapie realizowana jest procedura wariantowania sposobu zabezpieczenia wymagań i dokonywany jest wybór wariantu (wariantów) zapewniających optymalny sposób postępowania rekomendowany w Studium Wykonalności (SW). Wyniki wariantowania sposobu realizacji dla określonych Wstępnych Założeń Taktyczno Technicznych (WZTT) mogą skutkować koniecznością, w przypadku braku na rynku gotowych opracowań lub zidentyfikowaną celowością rozwinięcia narodowych rozwiązań, w tym poprzez przeprowadzenie prac rozwojowych, udziału w programach międzynarodowych w tym także umów międzynarodowych G-G, lub w innych przypadkach bezpośredniego przejścia do etapu realizacji poprzez zakupy z ewentualnym niezbędnym dostosowaniem oferowanych na rynku rozwiązań technicznych po uprzednim przeprowadzeniu wymaganych sprawdzeń i badań SpW i pozytywnych ich wynikach. Pozyskany SpW uznawany jest za gotowy do eksploatacji w SZ RP i wdrażane są rozwiązania organizacyjne i techniczne związane z zabezpieczeniem jego użytkowania w zakładanym okresie eksploatacji. W etapie eksploatacji, w ustalonych oraz doraźnych terminach, prowadzone są cykliczne oceny oraz wypracowywane decyzje dotyczące sposobów dalszego przebiegu wykorzystania SpW, w tym identyfikowana jest konieczność przeprowadzenia jego modernizacji (modyfikacji) lub wcześniejszego zbycia. Wyniki analiz wykorzystywane są w kolejnym cyklu identyfikacji potrzeb operacyjnych. Podjęcie decyzji o wycofaniu i wycofanie z eksploatacji w SZ RP SpW skutkuje określeniem dalszego sposobu optymalnego, pod względem technicznym i ekonomicznym, jego zagospodarowania np. poprzez odtworzenie sprawności i odsprzedaż za granicę.

Na pewno ważnym elementem tego systemu jest Polski Przemysł Obronny (PPO). Resort Obrony Narodowej wspiera polski przemysł organizując stoiska promocyjne MON podczas wielu różnego rodzaju targów, wystaw jak np.: Międzynarodowej Wystawy Przemysłu Obronnego IDEB w Bratysławie, Międzynarodowych Targów Obronności i Technik Ochrony IDET w Brnie, Międzynarodowych Targów Przemysłu Obronnego IDEF w Stambule, Targów Przemysłu Obronnego EUROSATORY

w Paryżu i innych zagranicznych, czy wreszcie organizowanych w naszym kraju: Międzynarodowego Salonu Przemysłu Obronnego MSPO w Kielcach lub Międzynarodowych Targów Morskich BALTEXPO w Gdańsku. Organizowane są również bilateralne fora przemysłu obronnego. Niech za przykład posłuży tu forum polsko – amerykańskie czy też polsko – francuskie lub polsko – tureckie, a przykładem tego, że nie ograniczamy się tylko do „dużych graczy” na arenie międzynarodowej, niech będzie przykład forum polsko – armeńskiego. Innym przykładem jest utworzenie polsko – hiszpańskiej Technicznej Grupy Roboczej, której pierwsze spotkanie odbyło się w lutym tego roku w Madrycie czy też polsko – szwedzkiego Komitetu Sterującego. Przykłady takiej dwustronnej współpracy można by mnożyć. Chciałbym jeszcze podkreślić dużą aktywność w tym zakresie Departamentu Wojskowych Spraw Zagranicznych MON, które poprzez ataszaty rozlokowane na całym świecie intensywnie promuje polski przemysł zbrojeniowy.

Innym przykładem działań MON w celu wsparcia PPO jest opracowanie programu Regional Support (ReSAP) czyli Programu Wsparcia Bezpieczeństwa Regionu 2022, który jest programem wykonawczym do Strategii Rozwoju Systemów Bezpieczeństwa Narodowego RP 2022. Przyjęte w dokumencie cele i działania zgodne są właśnie z tą Strategią i stanowią instrument ich realizacji w powiązaniu ze Strategią Innowacyjności

i Efektywności Gospodarki „Dynamiczna Polska 2020”. Wskazane w Programie ReSAP instrumenty dotyczące budowania relacji politycznych z sąsiadami i pomoc w zwiększaniu ich potencjału obronnego w powiązaniu z interesem ekonomiczno-przemysłowym Polski zwiększy bezpieczeństwo w regionie. Celem głównym tego Rządowego Programu, jak już wspominałem, jest pogłębienie relacji polityczno-wojskowych i przemysłowych z państwami V4 (Węgry, Czechy, Słowacja) i bałtyckimi (Litwa, Łotwa, Estonia). Celami szczegółowymi są zwiększenie efektywności wykorzystania mechanizmów finansowych wsparcia eksportu wytwarzanego w Polsce SpW, wzmacnianie zdolności przemysłowego potencjału obronnego do wspierania obronności w państwach V4+, wzmocnienie działań w obszarze promocji obronności, zwiększenie aktywności w obszarze międzynarodowej wojskowej współpracy dydaktycznej i szkoleniowej. Jeżeli zaś chodzi o inicjatywy w zakresie legislacyjnym to niech przykładem będą tutaj chociażby, oprócz wspomnianego właśnie programu ReSAP,

prace nad Ustawą o Agencji Mienia Wojskowego, która, między innymi, ma zastąpić ustawę o gospodarowaniu niektórymi składnikami mienia Skarbu Państwa oraz AMW. Powyższe wprowadzono w związku z zakładaną realizacją przez AMW zadań w ramach zadań własnych na rzecz przedsiębiorców wykonujących zadania w dziedzinie obronności i bezpieczeństwa państwa.

Analizując szanse polskiego przemysłu obronnego musimy zdać sobie sprawę, w którym miejscu się znajdujemy, i jak chcemy być postrzegani w przyszłości. W ocenie resortu obrony narodowej, polski przemysł dysponuje, na dzień dzisiejszy, potencjałem, który stale rozwijany może stać się prawdziwą wizytówką możliwości krajowych wytwórców. Mam tu na myśli te systemy uzbrojenia, które z powodzeniem mogą konkurować z wyrobami oferowanymi przez światowych liderów produkujących sprzęt specjalnego przeznaczenia, i które są konkurencyjne na rynku pod względem finansowym. Dostrzegamy również potencjał kadry naukowej, która pomimo ograniczonych środków jest w stanie prezentować rozwiązania innowacyjne na skalę światową, zdobywające uznanie, nie tylko przez naszych sojuszników. Widzimy konieczność utrzymania tego dorobku i kierunku rozwoju. Nie można jednak zapominać, że chcąc zmieścić się ze swoją ofertą, polskie rozwiązania muszą zapewniać dostęp do nowoczesnych rozwiązań i jednocześnie zapewniać relatywnie niskie koszty zakupu. Wiele państw pomimo deklaracji o zwiększeniu wydatków na obronność, skupia się głównie na rozwiązaniach

nie rujnujących ich budżetów narodowych.

Kolejnym ważnym elementem budowania pozycji polskiego przemysłu jest zapewnienie odbiorcom sprzętu możliwości utrzymania dostarczonego uzbrojenia w pełnej sprawności technicznej. Formuła jedynie kupno-sprzedaż przestała obowiązywać, a najlepszym sposobem na utrzymanie kontrahenta jest danie mu możliwości modernizacji zakupionego sprzętu, jego remontowanie oraz serwisowanie w oparciu o bazę producenta.

Podsumowując, należy podkreślić, że silne, dobrze wyposażone siły zbrojne to gwarancja bezpieczeństwa państwa. A na tym powinno zależeć wszystkim. Dowodem na to jest obowiązująca od 22 sierpnia 2015 r. ustawa z 10 lipca 2015 r. o nowelizacji ustawy o przebudowie i modernizacji technicznej oraz finansowaniu Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej oraz ustawy o finansach publicznych (Dz. U. z 7 sierpnia 2015 r., poz. 1117). Przewiduje ona, że na finansowanie potrzeb obronnych Rzeczypospolitej Polskiej przeznaczają się corocznie wydatki z budżetu państwa w wysokości nie niższej niż 2% Produktu Krajowego Brutto z roku poprzedniego. Celem nowelizacji ustawy jest zapewnienie warunków do stopniowego osiągnięcia przez Siły Zbrojne pełnej interoperacyjności w ramach Organizacji Traktatu Północnoatlantyckiego, oraz standardów pozostałych państw członków tej organizacji w zakresie uzbrojenia, wyposażenia, mobilności i możliwości prowadzenia działań wojskowych w każdych warunkach.

6.3. Metrologia noktowizyjna.

prof. dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski, INFRAMET

Streszczenie

Technika noktowizyjna to najstarsza technika zobrazowania pola walki z wykorzystaniem urządzeń optoelektronicznych rozwijana od czasów drugiej wojny światowej. Pomimo stosunkowo długiego okresu czasu technika ta wciąż znajduje się na etapie szybkiego rozwoju, a przyrządy noktowizyjne są masowo wykorzystywane w zastosowaniach wojskowych. Doświadczenia szeregu konfliktów zbrojnych potwierdziły ogromną wagę jakości przyrządów noktowizyjnych dla efektywności prowadzonych działań bojowych. Jednocześnie dokład-

ny pomiar szeregu parametrów określających jakość przyrządów noktowizyjnych jest trudny. Taka sytuacja stworzyła nowe wyzwania w zakresie aparatury kontrolno-pomiarowej do prowadzenia prac rozwojowych, kontroli jakości, przeglądów okresowych oraz napraw przyrządów noktowizyjnych. W tym referacie zaprezentowano aparaturę kontrolno-pomiarową do realizacji wyżej wymienionych zadań metrologicznych.

Słowa kluczowe: noktowizja, metrologia

Wstęp

Noktowizor to pozornie bardzo prosty przyrząd elektro-optyczny składający się z trzech głównych bloków (obiektyw, wzmacniacz obrazu oraz okular) umożliwiający widzenie w warunkach nocnych. Przyrządy noktowizyjne są wykorzystywane w zastosowaniach wojskowych od czasów II wojny światowej. Wbrew wielokrotnym prognozom o bliskim zmierzchu technika noktowizyjna znajduje się wciąż w fazie rozwoju, a przyrządy noktowizyjne w różnych postaciach (gogle, monokulary, celowniki, lornetki) są wykorzystywane w masowych ilościach przez wszystkie nowoczesne armie świata [1].

Doświadczenia szeregu konfliktów zbrojnych potwierdziły ogromną wagę jakości używanych przyrządów noktowizyjnych dla efektywności prowadzonych działań bojowych. Przyrządy noktowizyjne to oczy żołnierza w warunkach nocnych. Lepszy wzrok zapewnia zarówno wyższą

celność ognia celowniczych jak i niższą wypadkowość pojazdów mechanicznych i śmigłowców kierowanych przez kierowców czy pilotów wyposażonych w gogle noktowizyjne.

Jakość przyrządów noktowizyjnych jest pozornie łatwa do wyznaczenia poprzez ocenę obrazu obserwowanej sceny przez bezpośredniego obserwatora. W praktyce jednak taka subiektywna ocena jest mało wiarygodna i jakość przyrządów noktowizyjnych jest opisywana przez szereg parametrów mierzonych z wykorzystaniem profesjonalnej aparatury kontrolno-pomiarowej. Aparatura ta jest wykorzystywana do prowadzenia prac rozwojowych, kontroli jakości, przeglądów okresowych oraz napraw przyrządów noktowizyjnych. Znaczenie aparatury kontrolno-pomiarowej do badań przyrządów noktowizyjnych dodatkowo wzmacniają realia rynkowe. Po pierwsze, na skutek różnic w metodologii pomiarów porównywanie przyrządów różnych producentów na pod-

stawie ich kart katalogowych jest utrudnione. Po drugie, parametry wzmacniaczy obrazu (główny blok przyrządów noktowizyjnych) ulegają degradacji w czasie. Po trzecie, technologia produkcji wzmacniaczy obrazu jest mało powtarzalna i parametry produkowanych wzmacniaczy obrazu charakteryzują się znacznym rozrzutem nawet u najlepszych producentów.

Badania przyrządów noktowizyjnych i wzmacniaczy obrazu są zwykle prowadzone z wyko-

rzystaniem metodologii badań zaprezentowanej w serii amerykańskich norm wojskowych serii MIL [2-7]. Normy te prezentują definicje oraz metody pomiaru około 40 parametrów używanych do opisu jakości przyrządów noktowizyjnych oraz wzmacniaczy obrazu.

W tym referacie zaprezentowano aparaturę kontrolno-pomiarową do realizacji wyżej wymienionych zadań metrologicznych.

Koncepcja badań

Rynek aparatury kontrolno-pomiarowej do badań przyrządów noktowizyjnych jest zdominowany przez amerykańską firmę Hoffman Engineering [8]. Firma ta specjalizuje się w małych przenośnych stacjach kontrolno-pomiarowych typu walizkowego. Flagowy produkt tej firmy to stacja ANV 126A umożliwiająca pomiar wszystkich najważniejszych parametrów gogli/monokularów noktowizyjnych [8]. Podobne przenośne przyrządy kontrolno-pomiarowe oferuje również izraelska firma New Noga Light (przejęta niedawno przez Meprolight) – jej główny produkt to stacja MTB 9.

Stacje kontrolno-pomiarowe do badań przyrządów noktowizyjnych produkowane przez polską firmę Inframet znacznie się różnią od ww. stacji typu ANV 126A czy MTB firm konkurencyjnych ze względu na drastycznie różne założenia konstrukcyjne.

Stacje typu ANV 126A czy MTB były zaprojektowane jako przenośny sprzęt spełniający surowe wymagania klimatyczne norm wojskowych, który może być stosowany jako sprzęt mobilny do testowania przyrządów noktowizyjnych prawie w warunkach pola walki. Aby uzyskać tę mobilność konstruktorzy poświęcili nieco zakres mierzonych parametrów, dokładność oraz uniwersalność. W efekcie końcowym ww. stacje to bardzo dobre przyrządy kontrolno-pomiarowe skalibrowane pod konkretny typ gogli noktowizyjnych czy monokularów noktowizyjnych. Ograniczono jednak maksymalne wymiary optyki badanych przyrządów noktowizyjnych. Nie wykorzystano możliwości współczesnej techniki komputerowej w procesie badań.

Oznacza to poważne wady metrologiczne ww. stacji kontrolno-pomiarowych:

- Dokładny pomiar parametrów fotometrycznych jest możliwy tylko w przypadku badań gogli/monokularów noktowizyjnych wykorzy-

stujących wzmacniacz obrazu identyczny jak wzmacniacz obrazu w referencyjnym noktowizorze stosowanym w trakcie kalibracji.

- Kalibracja stacji jest możliwa tylko przez jej producenta lub serwis (kosztowna usługa).
- Brak możliwości dokładnych badań przyrządów o dużej aperturze optyki (znaczna część celowników oraz lornetek noktowizyjnych).
- Brak możliwości automatycznej analizy obrazu oraz komputeryzacji procesu pomiarów.

Stacje kontrolno-pomiarowe do badań przyrządów noktowizyjnych produkowane przez Inframet bazują na koncepcji wyeliminowania ww. wad stacji konkurencyjnych kosztem ograniczenia mobilności [10]. To znaczy, przyjęto następujące założenia:

- Stacja jest wykorzystywana w warunkach stacjonarnych (warsztaty lub laboratorium),
- Dokładny pomiar parametrów fotometrycznych jest możliwy dla przyrządów noktowizyjnych wykorzystujących wzmacniacze obrazu dowolnego typu,
- Rekalibracja stacji jest możliwa do przeprowadzenia przez dobrze wyposażone laboratorium fotometryczne,
- Stacje umożliwiają badania przyrządów noktowizyjnych o aperturze optyki do 150 mm,
- Zaawansowane typy stacji powinny być skomputeryzowane.

Wyżej wymienione różnice w założeniach konstrukcyjnych spowodowały, że stacje kontrolno-pomiarowe firm konkurencyjnych są stosowane w masowych ilościach jako mobilny sprzęt do stosowania w warunkach polowych, a stacje kontrolno-pomiarowe produkowane przez Inframet (NVT, NVS, NV14, NIMAX) znalazły zastosowanie w grupie odbiorców o podwyższonych wymaganiach w zakresie możliwości metrologicznych prowadzących badania w laboratoriach lub w pomieszczeniach fabrycznych, czy warsztatowych.

Sytuacja na rynku aparatury do badań wzmacniaczy obrazu jest nieco podobna do sytuacji na rynku aparatury do badań przyrządów noktowizyjnych.

Firma Hoffman Engineering miała praktyczny monopol na rynku aparatury do badań wzmacniaczy obrazu aż do 2005 roku. Monopol oraz strategia rynkowa spowodowały, że ww. firma oferowała serię stosunkowo prostych, nie skomputeryzowanych, ale drogich stacji pomiarowych dostosowanych do pomiaru jednego lub dwóch parametrów.

Wprowadzenie przez Inframet w 2005 roku skomputeryzowanej stacji kontrolno-pomiarowej typu ITS-I umożliwiającej pomiar dziesię-

ciu najważniejszych parametrów wzmacniaczy przez pojedynczą stację rozpoczęło rewolucję na tym rynku. Obecnie Inframet oferuje serię stacji typu ITS zoptymalizowanych dla użytkowników wzmacniaczy obrazu, oraz stacje typu IRAD czy IPAS zoptymalizowane dla producentów lub warsztatów naprawiających wzmacniacze obrazu.

Pod względem technicznym Inframet może być uznany za lidera na rynku aparatury do badań wzmacniaczy obrazu, który wyznacza trendy na tym rynku. Pozycja komercyjna Inframetu jest również znacząca: co najmniej jedna trzecia światowych producentów wzmacniaczy obrazu używa sprzętu firmy Inframet.

Aparatura do badań noktowizyjnych

Aparatura kontrolno-pomiarowa oferowana przez Inframet do badań przyrządów noktowizyjnych może być podzielona na dwie główne grupy:

1. Nie-skomputeryzowane stacje kontrolno-pomiarowe (NVT, NVS, NV14, N2D),

2. Skomputeryzowane stacje kontrolno-pomiarowe (NICOM, NIMAX).

Fotografie ww. stacji zostały przedstawione na rys. 1-6.



Rys. 1. Fotografia stacji NVT



Rys. 2. Fotografia stacji NV14



Rys. 3. Fotografia stacji NVS



Rys. 4. Fotografia stacji N2D

NVT oraz NV14 to kompaktowe stacje kontrolno-pomiarowe typu „stand alone” przystosowane do pracy w konfiguracji pionowej (badany noktowizor jest kładziony na stacji), które mogą być bezpośrednio postawione na podłodze. NVT umożliwia prowadzenie badań gogli i monokularów noktowizyjnych; NV14 – dodatkowo prowadzenie badań celowników i lornetek o optyce wejściowej do ok 70mm.

NVS to modułowy zestaw przystosowany do pracy w konfiguracji horyzontalnej (wymaga dodatkowego stołu do pracy), który jest zoptymalizowany do prowadzenia badań głównie celowników i lornetek noktowizyjnych, ale może być opcjonalnie wykorzystany również do prowadzenia badań gogli i monokularów.

N2D to kompaktowa stacja kontrolno-pomiarowa zoptymalizowana do prowadzenia podstawowych sprawdzeń peryskopowych gogli noktowizyjnych.

Trzy główne stacje (NVT, NVS, NV14) oferują przeprowadzenie pomiarów wszystkich najważniejszych parametrów przyrządów noktowizyjnych: rozdzielczość (centralna, peryferyjna, wysokiego poziomu), jakość ekranu (szare punkty), wzmocnienie jaskrawości, pole widzenia, MRC (minimalny rozróżnialny kontrast), błędy kolimacji, nierówność wzmocnienia, dystorsja. N2D oferuje zaś prowadzenie uproszczonych sprawdzeń peryskopowych gogli noktowizyjnych: pomiar rozdzielczości oraz błędów kolimacji.

Inframet oferuje dwie skomputeryzowane stacje kontrolno-pomiarowe: NICOM and NIMAX.

Stacja NICOM jest zoptymalizowana do prowadzenia badań gogli, monokularów oraz celowników wykorzystujących obiektywy o aperturze do 70mm. W przypadku stacji NIMAX ta granica została przesunięta do 120 mm co umożliwia prowadzenie badań co najmniej 99,9% wszystkich noktowizorów oferowanych na rynku.



Rys. 5. Fotografia stacji NICOM



Rys. 6. Fotografia stacji NIMAX

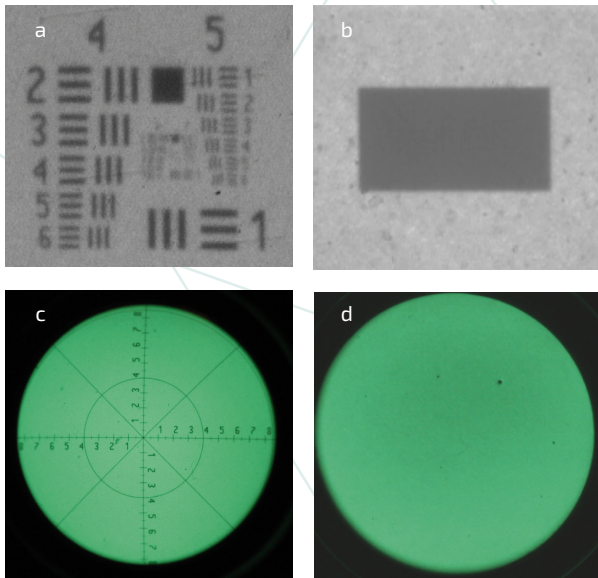
Liczba parametrów mierzonych przez stacje NICOM oraz NIMAX jest prawie taka sama jak liczba parametrów mierzonych przez stacje nieskomputeryzowane typu NVT, NV14 oraz NVS. Połepszona dokładność, zwiększona szybkość, wygoda pomiarów oraz możliwość komputerowej archiwizacji wyników pomiarów to ogromne zalety stacji skomputeryzowanych, które sprawiają że cieszą się one coraz większą popularnością.

Aparatura do badań wzmacniaczy obrazu

Aparatura kontrolno-pomiarowa oferowana przez Inframet do badań wzmacniaczy obrazu może być podzielona na dwie główne grupy:

1. Stacje kontrolno-pomiarowe do końcowych badań wzmacniaczy obrazu (stacje ITS-I, ITS-P, ITS-R, ITS-IP),
2. Stacje kontrolno-pomiarowe do wsparcia prac badawczo-rozwojowych, produkcji oraz napraw wzmacniaczy obrazu (stacje IRAD, IPAS).

Przykładowe obrazy generowane przez badane wzmacniacze obrazu z wykorzystaniem stacji ITS-I zostały zaprezentowane poniżej.



Rys. 12. Obrazy testów generowane przez badany wzmacniacz obrazu:
a) test USAF1951; b) test ostrzowy;
c) test FOV; d) test jednorodny.

Stacja ITS-I umożliwia pomiar następujących parametrów obrazowych wzmacniaczy obrazu: rozdzielczość (centralna, peryferyjna, wysokiego poziomu), MTF (funkcja przenoszenia modulacji), SNR (stosunek sygnał szum), halo, nie-centralność obrazu (image non-alignment), dystorsja, odwrócenie obrazu, powiększenie, szare punkty, jasne punkty, niejednorodność obrazu, szum MMPN, szum MBPN, dystorsja czasowa.

Stacja ITS-P umożliwia pomiar następujących parametrów fotometrycznych wzmacniaczy obrazu: wzmocnienia luminancji, poziom nasycenia, ekwiwalentna intensywność tła EBI, czułość świetlna fotokatody, czułość radiometryczna fotokatody, stabilność czasowa. Stacja może być również opcjonalnie użyta do pomiaru parametrów czasowych: czas narastania, czas opadania, bezwładność fosforu.



Rys. 7. Fotografia stacji ITS-P



Rys. 7. Fotografia stacji ITS-I (lub ITS-IP)



Rys. 9. Fotografia stacji ITS-R

Stacja ITS-R umożliwia pomiar parametrów niezawodnościowych typu: wypalanie (burn-ins), ochrona przez jasnym punktem (bright spot protection), niezawodność standardowa, niezawodność przyspieszona.

Z kolei stacja ITS-IP to połączenie możliwości stacji ITS-I oraz stacji ITS-P. Stacja ta umożliwia pomiar zarówno parametrów obrazowych jak i fotometrycznych.

Stacja IRAD to specjalna wersja stacji ITS-P do badań parametrów fotometrycznych wyposażona w przestrajalne widmowo źródło promieniowania oraz zoptymalizowana do badań tzw. gołych wzmacniaczy obrazu (bare tubes) przed podłączeniem sterownika wysokiego napięcia.

Z kolei stacja IPAS umożliwia prowadzenie badań oraz optymalizację miniaturowych sterowników wysokiego napięcia używanych do sterowania wewnętrznych przetworników wzmacniaczy obrazu. Stacja jest użytecznym narzędziem zarówno na końcowym etapie produkcji oraz w trakcie naprawy wzmacniaczy obrazu.



Rys. 10. Fotografia stacji IRAD



Rys. 11. Fotografia stacji IPAS

Wnioski

Normy wojskowe serii MIL zalecają pomiar ponad 40 parametrów dla pełnej charakterystyki przyrządów noktowizyjnych i wzmacniaczy obrazu. Znajomość przynajmniej grupy kilkunastu najważniejszych parametrów jest niezbędna do prawidłowej oceny jakości, optymalizacji produkcji oraz dla wsparcia naprawy noktowizorów oraz wzmacniaczy obrazu. Prowadzenie badań gogli noktowizyjnych ma również krytyczne znaczenie dla obniżenia wypadkowości w czasie lotów śmigłowców oraz podczas jazdy pojazdów mechanicznych kierowanych przez pi-

lotów/kierowców wyposażonych w gogle noktowizyjne.

Inframet oferuje serię stacji kontrolno-pomiarowych do badań noktowizorów oraz wzmacniaczy obrazu. Oferowane stacje kontrolno-pomiarowe umożliwiają prowadzenie badań wszystkich typów przyrządów noktowizyjnych oraz wzmacniaczy obrazu o najwyższych parametrach oferowanych na międzynarodowym rynku. Firma jest jednym ze światowych liderów na rynku metrologii noktowizyjnej.

Literatura

- [1] Chrzanowski K., *Review of night vision technology*, *Optoelectronics Review*, Vol. 21, No. 2, pp 153-181, 2013
- [2] MIL-G-49313CR, *Goggles -, night vision AN/PVS-7B*, 1989
- [3] MIL-A-49425(CR), *Aviator's night vision imaging system AN/AVS-6*, 1989
- [4] MIL-PRF-49082E, *Performance Specification Viewer, Driver's, Night Vision, AN/VVS-2(V)*, 1999
- [5] MIL-PRF-49063E, *Night Vision Sight, Individual Served Weapon An/Pvs-4*, 1999
- [6] MIL-PRF-49052G *"Image intensifier assembly, 18 millimeter microchannel wafer, MX-9916/UV*, 1999
- [7] MIL-PRF-49428 *"Image intensifier assembly, 18 millimeter microchannel wafer, MX-10160/AVS-6*, 1995
- [8] www.hoffmanengineering.com
- [9] *Main Test Station for night vision goggles (NVG – Operator Manual, Document no TM3069C, New Noga Light*, 2008.
- [10] http://www.inframet.com/night_vision_devices.htm
- [11] Chrzanowski K., *Review of night vision metrology*, *Optoelectronics Review*, Vol. 23, No. 2, 149–164 , 2015
- [12] Chrzanowski K., *Computerized Station For Semi-Automated Testing Image Intensifier Tubes , Metrology and Measurement Systems*, Vol. 22, No 3, 2015
- [13] K. Chrzanowski, *A computerized station for testing night vision devices*, *6th International Symposium on Optronics in Defence and Security*, Paris, 2014

6.4. Zastosowanie termowizji w pracach naukowo-badawczych prowadzonych w WITU.

dr hab. inż. Waldemar Świdorski, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

Streszczenie

Pomiary termowizyjne umożliwiają wizualizację niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty w postaci obrazów (termogramów). Są one odwzorowaniem rozkładu pola temperatury na powierzchni badanego obiektu. Dzięki bezkontaktowemu charakterowi pomiarów termowizyjnych oraz szerokiemu zakresowi możliwości pomiaru temperatury, technika ta posiada szeroki zakres zastosowań. Stosowana jest do badań naukowych, jak również jest wykorzystywana w przemyśle, energetyce, budownictwie, medycy-

nie, w przemyśle raketowym, lotniczym, zbrojeniowym i wielu innych dziedzinach. W artykule przedstawiono wybrane przykłady najważniejszych prac z zastosowaniem termowizji prowadzonych w WITU w ostatnich latach dotyczących aplikacji militarnych.

Słowa kluczowe: termowizja, termografia w podczerwieni, materiały kompozytowe, miny, IED, paliwa raketowe.

Wstęp

Rzeczony techniki termowizyjnej był stymulowany głównie jej zastosowaniami militarnymi. Pierwsza kamera termowizyjna dla celów wojskowych została opracowana w 1952 r. [1]. Komercyjne kamery pojawiły się w połowie lat 60-tych ubiegłego wieku. Pierwszymi kamerami termowizyjnymi eksploatowanymi w Polsce, głównie w celach naukowych, były kamery szwedzkiej firmy AGA.

Zastosowanie w badaniach kamery termowizyjnej polega na zdalnej i bezkontaktowej ocenie rozkładu pola temperatury na powierzchni badanego obiektu. Na podstawie pomiaru przez kamerę termowizyjną promieniowania podczerwonego, które jako pierwszy w 1800 roku opisał William Herschel [2], powstaje obraz rozkładu temperatury zwany termogramem.

W WITU prace naukowo-badawcze z wykorzystaniem kamer termowizyjnych prowadzone

są od ponad 20 lat. Pierwszymi kamerami były kamery firmy AGEMA (wcześniej AGA) krótkofalowa 900 SW i długofalowa 900 LW. Obecnie na wyposażeniu WITU jest 6 termowizyjnych kamer pomiarowych o różnych parametrach umożliwiających prowadzenie w szerokim zakresie prac naukowo-badawczych.

Do tych prac realizowanych w ostatnich latach należą:

- badania nieniszczące materiałów kompozytowych stosowanych w lekkich ostonach balistycznych i aplikacjach lotniczych;
- wykrywanie ukrytych pod powierzchnią gruntu obiektów typu miny i IED;
- nowa metoda pomiaru zmian pola temperatury spalania paliw raketowych;
- detekcja w podczerwieni punktu trafienia pociskami małokalibrowymi w dynamicznych ćwiczeniach z użyciem broni bojowej w systemie Śnieżnik.

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych stosowanych w lekkich osłonach balistycznych i aplikacjach lotniczych

Materiały kompozytowe są obecnie najszybciej rozwijanymi i szczególnie atrakcyjnymi materiałami konstrukcyjnymi w urządzeniach specjalnego przeznaczenia (m.in. militarnymi) stosowanymi zarówno w powietrzu, na lądzie, wodzie i w kosmosie. Składniki kompozytu oraz technologie ich połączeń dobierane są pod kątem uzyskania wymaganych cech użytkowych danej konstrukcji. Dzięki zastosowaniu tych materiałów uzyskiwana może być np. niższa masa, bardziej wytrzymałe połączenie, wyższa odporność na udary i rozpraszanie energii niż w przypadku zastosowania metali.

Wraz z rozwojem technologii wytwarzania materiałów kompozytowych rosną wymagania dotyczące oceny ich jakości. Konieczny jest zatem rozwój metod, technik i wyposażenia do badań diagnostycznych oraz procesów monitorowania wytwarzania materiałów, produktów oraz półproduktów. Upowszechnianie stosowania metod badań nieniszczących jest coraz popularniejsze, a informacja uzyskiwana w ich wyniku coraz bogatsza.

Klasyczne metody diagnostyczne, takie jak rentgenograficzna czy ultradźwiękowa, często zawodzą w przypadku materiałów kompozytowych, zaś metody termograficzne są najbardziej efektywne w przypadku tych materiałów.

W przypadku materiałów kompozytowych metoda diagnostyki termowizyjnej jest skuteczna ze względu na ich dwie cechy. Po pierwsze, materiały kompozytowe charakteryzują się małą przewodnością cieplną. W konsekwencji przepływ ciepła w materiale jest stosunkowo wolny, a zaburzenia jego przepływu powodują wystąpienie znacznych różnic temperatury. Oznacza to, że na powierzchni materiału powstające niejednorodności w rozkładzie temperatury mogą być rejestrowane za pomocą kamer termowizyjnych. W przypadku metali, ze względu na ich dobrą przewodność cieplną, różnice te są mniejsze i trudniej jest wykrywać defekty. Po drugie, materiały kompozytowe charakteryzują się dużą emisyjnością (w przeciwieństwie do metali, których emisyjność jest mniejsza). Oznacza to, że moc promieniowania cieplnego emitowanego przez materiały kompozytowe jest znacznie większa od mocy promieniowania emitowanego przez metale o tej samej temperaturze. Ponadto, promieniowanie odbite od badanego materiału, będące zakłóceniem pomiaru, jest zdecydowanie niższe

w przypadku materiałów kompozytowych. Powyższe cechy materiałów kompozytowych świadczą o tym, że materiały te są bardzo dobrym obiektem do badań nieniszczących z zastosowaniem kamer termowizyjnych.

Metody badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na pasywne i aktywne [4]. W metodach pasywnych ocena obiektu badań przeprowadza się na podstawie jego charakterystycznego pola temperatury powstałego podczas funkcjonowania obiektu. Dlatego procedury pasywne stosowane są głównie do badania urządzeń lub ich elementów w trakcie funkcjonowania lub krótko po jego zakończeniu, kiedy na podstawie temperatury na ich powierzchni można sądzić o ich wadliwości. W wyniku obciążeń mechanicznych lub cieplnych, występujących w trakcie funkcjonowania obiektu badań, defekty wypromieniowują lub pochłaniają energię cieplną w większym stopniu niż pozostałe obszary materiału, dlatego można je identyfikować metodami pasywnymi.

W metodach aktywnych wykorzystuje się dodatkowe źródło cieplnej stymulacji (nagrzewania lub chłodzenia) obiektu. Materiał obiektu mający przed rozpoczęciem badania jednakową temperaturę z defektem, równą temperaturze otoczenia, nie generuje „użytecznych” sygnałów temperaturowych i wymaga nagrzewania lub ochładzania całego obiektu lub jego części. W trakcie badania powstaje zmienne pole temperatury, a wyniki badania są funkcją czasu obserwacji. W metodach aktywnych zazwyczaj stosowane są specjalne procedury przetwarzania danych.

W Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, rozpoczęto prace nad zastosowaniem termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących w drugiej połowie lat 90-tych ubiegłego wieku. Wówczas w kraju badania metodami termograficznymi wykonywano sporadycznie. W Polsce badania materiałów kompozytowych, stosowanych w aplikacjach militarnych, rozpoczęto w WITU i po raz pierwszy w kraju zastosowano metodę termografii optycznej lock-in w badaniach kompozytów jak również zastosowania termografii w podczerwieni do oceny jakości takich elementów jak: lekkie osłony balistyczne, paliwa rakietowe oraz elementy pocisków i rakiet. Obecnie w WITU można prowadzić badania z użyciem wszystkich metod termografii w podczerwieni stosowanych na świecie. Dysponujemy odpowiednimi źródła-

mi pobudzania cieplnego badanych materiałów, sprzętem pomiarowym, oprogramowaniem do numerycznego rozwiązywania zagadnień wymia-

ny ciepła i programami do przetwarzania danych w badaniach nieniszczących.

Wykrywanie ukrytych pod powierzchnią gruntu obiektów typu miny i IED

Prace w zakresie wykrywania ukrytych w gruncie min rozpoczęto w WITU w 1996 r. pracą finansowaną z działalności statutowej nt.: *„Wpływ warunków środowiskowych na wykrywanie pod warstwą gleby obiektów metodą termograficzną”*. Badanie efektywności stosowania termografii w podczerwieni do wykrywania podziemnych min była wówczas w kraju problematyką nową zastosowaną po raz pierwszy w WITU.

Kontynuacją ww. pracy był projekt badawczy pt.: *„Adaptacja przemysłowych metod dynamicznej, aktywnej termografii dla potrzeb wykrywania niejednorodności struktur podziemnych, a zwłaszcza pól minowych, w warunkach naturalnych wymuszeń przepływów ciepła”*. Praca finansowana była przez Komitet Badań Naukowych, a realizowana w latach 1997-99 r.

Projekt ten polegał na wykonaniu szeregu prac teoretycznych oraz eksperymentalnych w celu pogłębienia rozpoznania specyfiki ewolucji sygnałów termicznych min i innych zaburzeń podpowierzchniowych w funkcji czasu, typu gruntu i jego poszycia, w różnych warunkach wilgotnościowych i pogodowych. Program prac był ukie-
runkowany na: wytworzenie metody prognozowania najkorzystniejszych czasów dla badań metodą termograficzną oraz zbadanie możliwości adaptacji metody termografii dynamicznej bazującej na analizie zmian cech promiennych powierzchni ziemi w dziedzinie czasu.

Dla osiągnięcia tych celów realizowane były następujące trzy grupy badań: w postaci matematyczno-fizycznego modelowania i numerycznej symulacji; w postaci weryfikującego takie modelowanie kontrolowanego eksperymentu z wymuszeniem sztucznym; w postaci gromadzenia termogramów i innych danych towarzyszących na terenowym polu testowym z rzeczywistymi minami i w warunkach naturalnych wymuszeń.

Uzyskane wyniki analiz i badań były na poziomie nie tylko europejskim, ale i światowym. Dowodem tego jest kilkadziesiąt cytowań przez autorów zagranicznych wyników pracy publikowanych na międzynarodowych konferencjach naukowych. Po raz pierwszy zwrócono uwagę na istotny

wpływ wilgotności i zagęszczenia gruntu na wykrywanie ukrytych w gruncie min, oraz wprowadzono do analizy możliwości wykrywania min wielowarstwowe modele gruntu z warstwami organicznymi i mineralnymi. Przy realizacji projektu badawczego WITU współpracował z Instytutem Agrofizyki PAN i firmą PIRS.

Tematyka wykrywania min była kontynuowana w latach 2010-13 w ramach projektu badawczo-rozwojowego nt. *„Wykrywanie i identyfikacja ukrytych pod powierzchnią ziemi min i IED”* finansowanego przez MNiSW. W projekcie wykorzystano doświadczenia i wyniki uzyskane we wcześniej realizowanych w WITU pracach naukowo-badawczych związanych z tą tematyką. Celem projektu było uzyskanie technologii pozwalającej na budowanie urządzeń do wykrywania bazujących na różnych zjawiskach fizycznych. W projekcie zaproponowano fuzję kilku metod wykrywania takich jak: georadar, aktywną termografię z mikrofalowym źródłem promieniowania oraz metodę wielospektralną.

Demonstrator technologii został zabudowany na platformie mobilnej, sterowanej zdalnie. Pojazd posiada własny napęd i możliwość bateryjnego zasilania. W obecnej formie, pojazd jest nośnikiem narzędzi oraz platformą ewaluacyjną. Zamontowany odpowiedni osprzęt pozwala realizować radar modulacji schodkowej (SFCW) zarówno z użyciem VNA (Agilent E5071C-4K5), aktywną metodą termografii z użyciem źródła mikrofalowego pracującego w paśmie 2,45 GHz i mocy 2 kW oraz systemu wielospektralnego wyposażonego w kamery pracujące w paśmie widzialnym, bardzo bliskiej podczerwieni (700-1000nm), ultrafiolecie (250-400 nm) i dalszej podczerwieni (7,5 - 14µm). Stacjonarny, bardzo wydajny obliczeniowo i w zakresie gromadzenia danych, komputer PC pozwala przetwarzać i wyświetlać dane skanowania pozyskiwane i przesyłane do komputera z pojazdu. Dane pozyskiwane z GPR i z użyciem metod obrazowania termicznego i wielospektralnego w znacznym stopniu uzupełniają się. Pojawia się również pewien efekt synergii. Ponieważ dane te pozyskiwane są na bazie zupełnie różnych technologii, to zakłócenia obrazowe (clutter) mają zupełnie odmienny charakter. Fuzja danych prowadzi do znacznego polepszenia dynamiki wizualizacji,

gdyż tło poza obiektami jest dobrze wygaszane na drodze korelacyjnej filtracji. Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność założenia dotyczącego

przydatności fuzji danych pozyskiwanych za pomocą różnych metod pozyskiwania sygnału.

Nowa metoda pomiaru zmian pola temperatury spalania paliw rakietowych

Parametry balistyczne układów napędowych pocisków rakietowych na paliwo stałe zależą przede wszystkim od:

- kształtu i wymiarów ładunku paliwa,
- liniowej szybkości palenia,
- kaloryczności paliwa.

Przy pomiarze liniowej szybkości palenia istotna jest ocena stabilności przebiegu procesu palenia.

Idea nowej metody pomiarowej polega na wykorzystaniu wysoce anizotropowych własności grafitu pirolitycznego. W wyniku procesu pirolizy polegającego na rozkładzie termicznym substancji, prowadzonym poprzez długotrwałe ich poddawanie działaniu wysokiej temperatury ale bez kontaktu z tlenem i innymi czynnikami utleniającymi, z grafitu, który jest materiałem miękkim, małym i łupliwym, powstaje grafit pirolityczny będący spiekami prostymi chemicznie, ale tworzącym sieć przestrzenną materiału o interesujących własnościach fizycznych. Zwrócić należy uwagę na różnice w kierunkowej przewodności cieplnej warstwowej struktury grafitu pirolitycznego, która w płaszczyźnie powierzchni warstwy jest porównywalna do przewodności cieplnej miedzi, zaś w kierunku prostopadłym do powierzchni zbliżona jest do przewodności cieplnej ceramiki. Z grafitu pirolitycznego wykonano walec, który posiadał wysoką przewodność cieplną materiału wzdłuż promienia (ok. 350 W/(mK)), zaś niską wzdłuż jego tworzącej (ok. 1,77 W/(mK)). Otwór przelotowy walca wypełniono stałym, dwubazo-

wym (zawierającym główne składniki - nitrocelulozę oraz nitroglicerynę) paliwem rakietowym. Na eksperymentalnym stanowisku pomiarowym sprawdzono możliwość pomiaru liniowej prędkości palenia powyższego paliwa rakietowego, jednocześnie starając się ocenić stabilność procesu palenia. W tym celu dokonano rejestracji procesu palenia paliwa rakietowego za pomocą kamery termowizyjnej AGEMA 900 SW, której obiektyw usytuowany był prostopadle do osi ładunku paliwa. Proces palenia został zainicjowany za pomocą lasera CO₂. Dzięki znacznym różnicom przewodności cieplnej pirografitu w kierunku wzdłuż osi walca i jego promienia, analizując sekwencje termogramów zarejestrowaną w trakcie palenia paliwa, można z dokładnością, jaką zapewnia częstotliwość rejestracji kamery śledzić zmiany położenia frontu fali palenia badanego paliwa i na tej podstawie obliczyć liniową szybkość palenia. Analiza ta pozwala również na określenie, czy proces jest stabilny czy nie. Dodatkowo proces palenia walcowego ładunku paliwa rakietowego (przemieszczanie się frontu palenia) był rejestrowany za pomocą kamery CCD.

Przedstawiona powyżej nowa metoda pomiarowa została zgłoszona jako wynalazek (w kategorii sposób i układ badawczy) przez Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia do Urzędu Patentowego RP. Opisana w artykule [3] zdobyła główną nagrodę za najlepszą pracę naukową na międzynarodowej konferencji Modern Technologies, Quality and Innovation, która odbyła się w 2012 r. w miejscowości Sinaia (Rumunia).

Detekcja w podczerwieni punktu trafienia pociskami małokalibrowymi w czasie dynamicznych ćwiczeń z użyciem broni bojowej w systemie ŚNIEŻNIK

ŚNIEŻNIK jest to zaawansowany system szkoleniowo-treningowy zaprojektowany i wykonany przez firmę Autocomp Management Sp. z o.o. oraz Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia dla Ministerstwa Obrony Narodowej. ŚNIEŻNIK jest stacjonarnym urządzeniem przeznaczonym do nauki, kontroli i oceny celowania z broni strzeleckiej oraz przygotowania żołnierzy do:

- strzelań amunicją bojową na „otwartych” strzelnicach do tarcz i figur bojowych,
- wykrywania, rozpoznawania i niszczenia celi

rzeczywistych w różnym terenie (zurbanizowany, odkryty), porach doby, warunkach atmosferycznych (mgła, śnieg, deszcz, wiatr),

- współdziałania w walce przy zastosowaniu różnych rodzajów broni i formacji,
- reagowania żołnierzy w sytuacjach nietypowych.

Kolejnym etapem rozwoju systemu było opracowanie elektronicznego systemu wykrywania miejsca trafienia pociskiem pistoletowym, pośrednim i karabinowym, w strzelnicy zamknię-

tej wspomaganej urządzeniem szkolnym do generowania wirtualnych sytuacji treningowych wyświetlanych na ekranach. Ponieważ dokładność lokalizacji miejsc trafień pocisków w ekran w zakresie promieniowania widzialnego była niewystarczająca wykorzystano do tego celu zakres promieniowania podczerwieni.

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że na skutek trafienia pociskiem ostrej amunicji jak i pociskiem amunicji treningowej w osłonę antyrykoszetową wykonaną z granulowanej gumy powstaje bardzo dobrze widoczny w podczerwieni „ślad” cieplny. Miejsca uderzeń pocisków ostrej amunicji, które przebijają użytą w badaniach osłonę nie pozostawiają na powierzchni osłony „śladów”, które byłyby dobrze widoczne w zakresie widzialnym. Pociski amunicji treningowej odbijają się od osłony i nie jest możliwe zlokalizowanie miejsca ich uderzenia w zakresie widzialnym.

W celu wyeliminowania niekorzystnego zjawiska zbyt długiego czasu widoczności w podczerwieni „śladu” cieplnego miejsca uderzenia pocisku zaproponowano dwa algorytmy.

Pierwszym rozwiązaniem jest zastosowanie w układzie detekcji algorytmu, który umożliwia sterowanie długością czasu, w którym ekspozycje i odczytywane są ślady cieplne miejsc uderzeń pocisków. Czas ekspozycji „śladów” cieplnych reguluje się poprzez wskazanie minimalnej wartości odczytu temperatury, przy jakiej następuje zakończenie odczytu ekspozycji z wykorzystaniem pomiarowej kamery termowizyjnej. Zastosowanie układu detekcji umożliwia stworzenie elektronicznego systemu wykrywania miejsca trafienia pociskiem, w postaci śladu różnielnego termicznie od tła (powierzchni celu), w ramach strzelnicy zamkniętej, wspomaganej

urządzeniem treningowym do generowania wirtualnych sytuacji szkoleniowych wyświetlanych na ekranach. Rozwiązanie to umożliwia ćwiczącym prowadzenie ognia w dynamice do celów widocznych w ruchu na ekranie z wykorzystaniem broni strzeleckiej i bojowej amunicji strzeleckiej. Krótki czas ekspozycji „śladów” cieplnych miejsc uderzeń pocisków w osłonę umożliwia rejestrację kolejnych uderzeń pocisków w krótkim przedziale czasowym w ten sam punkt lub w jego pobliżu. Algorytm uwzględnia również kaliber i rodzaj użytej amunicji, co ma istotny wpływ na wartość przyrostu pola temperatury w miejscu uderzenia pocisku.

Drugim rozwiązaniem jest zastosowanie algorytmu, który rejestruje zmiany pola temperatury o wymiarze powyżej 2x2 piksele na osłonie i wartości przewyższającej o 2°C średnią wartość temperatury osłony. Pojawiająca się zmiana temperatury na termogramie widocznym na ekranie komputera jest automatycznie rejestrowana przez oprogramowanie jako miejsce uderzenia pocisku i elektronicznie jest usuwana na następnym termogramie zarejestrowanym przez kamerę termowizyjną. Praktycznie oprogramowanie rejestruje tylko jeden termogram z kamery na którym pojawi się pierwsza zmiana pola temperatury. Kolejne zmiany pola temperatury rejestrowane są jako kolejne miejsca uderzeń pocisków na pojedynczym termogramie. Przy zapisie kamery termowizyjnej 50 Hz możliwa jest rejestracja trafień z jednej broni strzeleckiej co 0,02 sekundy. Prawdopodobieństwo, że kolejny pocisk uderzy w to samo miejsce do celów widocznych w ruchu na ekranie w czasie krótszym niż 0,02 sekundy jest praktycznie równe zero.

Przedstawione powyżej rozwiązania zostały praktycznie zastosowane i przedstawione w tym roku na targach MSPO w Kielcach.

Wnioski

Przedstawione w artykule zastosowania termowizji w aplikacjach militarnych świadczą o dużych możliwościach jej użycia w pracach naukowo-badawczych i badawczo-rozwojowych. Dzięki swoim zaletom termowizja może być konkurencyjna w wielu aplikacjach militarnych w stosunku do innych metod badawczych.

WITU posiada odpowiednie wyposażenie sprzętowe, wyszkolony personel oraz wieloletnie doświadczenie co umożliwia realizację nowych innowacyjnych projektów, w których może być zastosowana termowizja.

Literatura

- [1] Madura H. i inni, *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Redakcja czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Warszawa 2004.
- [2] Minkina W., *Pomiary termowizyjne – przyrządy i materiały*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [3] Miszczak M., Świdorski W., *A novel method on visualization of temperature fields by pyrolytic graphite sensors and IR detection systems*, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, Vol. IV, No. 2/2012 p. 55-60
- [4] Świdorski W., *Metody termograficzne w niszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych*, WITU, Zielonka 2010.
- [5] Świdorski W., Głogowski T., Haberek R., Hłosta P., Stępnia S., *Sposób wykrywania i rejestracji miejsc uderzeń pocisków strzeleckich w cel za pomocą kamery termowizyjnej*, WITU, Patent P.412063

6.5. Polimerowe ogniwa fotowoltaiczne zawierające nanocząstki srebra,

dr hab. Agnieszka Iwan, Bartosz Boharewicz, Igor Tazbir, Kamil Wójcik, Agnieszka Hreniak,
Instytut Elektrotechniki Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego

Perspektywnym kierunkiem rozwoju fotowoltaiki polimerowej są ogniwa czwartej generacji tj. ogniwa polimerowe z różnego rodzaju nanoinkluzjami plazmonicznymi. W pracy przedstawiono ogólne założenia i postęp w realizacji projektu pt.: *Nowe polimerowe ogniwa fotowoltaiczne: Badanie wpływu budowy polimeru, architektury ogniwa oraz rodzaju domieszki na sprawność polimerowych ogniw słonecznych opartych na poliazometinach i politiofenach* (POF) realizowanego w ramach

I konkursu Programu Badań Stosowanych Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (nr PBS1/A5/27/2012). Omówiono wpływ wielkości, ilości oraz umiejscowienia nanocząstek srebra w objętościowych polimerowych ogniwach fotowoltaicznych na ich parametry optyczne, elektrochemiczne i elektryczne.

Słowa kluczowe: polimerowe ogniwa słoneczne, nanocząstki srebra, polimery

Wstęp

Fotowoltaika zajmuje szczególne miejsce w rozwoju technologii odnawialnych źródeł energii (OZE). Ogniwa pierwszej i drugiej generacji to ogniwa nieorganiczne, w tym ogniwa krzemowe czy ogniwa typu CIGS (związki miedzi, indu, galu, selenu), których udział procentowy na rynku jest obecnie największy i one osiągały obecnie najwyższą sprawność (około 25%). Wśród organicznych ogniw fotowoltaicznych wyróżnia się ogniwa trzeciej i czwartej generacji. Ogniwa słoneczne trzeciej generacji obejmują ogniwa: organiczne (polimerowe jak i oparte na związkach małych cząsteczkowych), barwnikowe oraz oparte na perowskitach. Z kolei ogniwa słoneczne czwartej generacji obejmują ogniwa organiczne (polimerowe) z różnego rodzaju nanoinkluzjami plazmonicznymi takimi jak nanoinkluzyje metaliczne (Ag, Au, Pt), grafen, nanorurki, TiO_x czy ZnO [1]. W roku 2010 wartość sprawności organicznego ogniwa słonecznego wynosiła PCE = 5,15%, zaś w roku 2012 PCE = 12% [2]. Wśród zalet fotowoltaiki organicznej należy wymienić: niską toksyczność, elastyczność, oraz lekkość.

Produkcja na wielką skalę jest łatwiejsza niż dla materiałów nieorganicznych. Organiczne ogniwa słoneczne mogą być modyfikowane chemicznie poprzez dużą różnorodność struktur chemicznych (polimery, dendrymery, oligomery, ciekłe kryształy). Potencjalnie kilkukrotnie niższa cena wytwarzania energii w przeliczeniu na jednostkę powierzchni ogniwa.

Dzięki wsparciu finansowemu z NCBiR w Instytucie Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego (IEL) we Wrocławiu prowadzone są prace nad rozwojem fotowoltaiki polimerowej. Prace są ukierunkowane na konstrukcję i charakterystykę polimerowych ogniw fotowoltaicznych opartych o nowo otrzymane polimery, pochodne fulereny, TiO_2 -Ag, czy nanocząstki Ag. Przeprowadzone w IEL badania wykazały, wzrost sprawności polimerowych ogniw fotowoltaicznych z nanocząstkami srebra. Aczkolwiek decydującymi parametrami są architektura ogniwa, rozmiar i ilość Ag w polimerowym ogniwie słonecznym, co

jest przedmiotem niniejszej pracy. Umieszczenie w warstwie półprzewodnika nanoinkluzyj plazmonicznych w postaci nanocząstek Ag, powin-

no pozwolić na otrzymanie polimerowych ogniw słonecznych zdolnych do pułapkowania światła i tym samym zwiększenia ich efektywności.

Wyniki badań

Tematyka pracy obejmuje konstrukcję i charakterystykę polimerowych ogniw słonecznych z nanocząstkami Ag, w których warstwą aktywną była mieszanina poli(3-heksylofenu) (P3HT) i estru metylowego kwasu [6,6]-fenylo-C 61-maślowego (PCBM). Skonstruowano polimerowe ogniwa fotowoltaiczne, w których nanocząstki srebra o różnej średnicy i ilości wprowadzano: a) do warstwy aktywnej i b) do warstwy transportującej dziury (PEDOT:PSS). Ponadto, zbadano, wpływ wytworzonego metodą zol-żel TiO_2 -Ag (3 i 5% Ag w stosunku molowym domieszki do prekursora), jako warstwy, na parametry elektryczne polimerowych ogniw fotowoltaicznych. Ogniwa z TiO_2 -Ag były wygrzewane w 130 °C lub w 500 °C w celu zbadania różnic w wartości sprawności ogniw z TiO_2 w formie krystalograficznej anatazu lub amorficznej. Skonstruowano polimerowe ogniwa fotowoltaiczne o następującej architekturze:

szkło/ITO/PEDOT:PSS+Ag/P3HT:PCBM/Al,
szkło/ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM+Ag/Al,
szkło/ITO/ TiO_2 :Ag/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al
szkło/ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/ TiO_2 :Ag/Al

Charakterystyki fotowoltaiczne zostały zmierzane na urządzeniu Solar Simulator Model SS100AAA z lampą ksenonową o mocy 500W i filtrem AM 1.5G. Dla otrzymanych polimero-

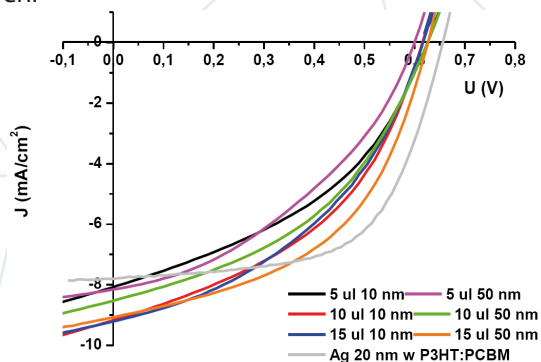
wych ogniw słonecznych wyznaczono wartości sprawności, współczynnika wypełnienia (FF), napięcia obwodu otwartego (U_{oc}) i gęstość prądu zwarcia ogniwa (J_{sc}). Do urządzenia dołączona była przystawka do pomiarów firmy Ossila, która umożliwia pomiar prototypowych ogniw słonecznych organicznych o powierzchni 4,5 mm². Parametry fotowoltaiczne dla skonstruowanych polimerowych ogniw słonecznych przedstawiono w tabeli 1.

Z przeprowadzonych badań fotowoltaicznych wynika, iż polimerowe ogniwa fotowoltaiczne z nanocząstkami Ag w warstwie aktywnej wykazują wyższą wartość PCE i FF, niż ogniwa z nanocząstkami Ag w warstwie PEDOT:PSS (tabela 1). Wraz ze zwiększaniem stężenia Ag w warstwie PEDOT:PSS (od 5 do 15 µl roztworu wodnego Ag dodanego do 1 ml PEDOT:PSS), zarówno dla nanocząstek srebra o średnicy 10 nm jak i 50 nm obserwowano wzrost sprawności ogniwa słonecznego [3]. Obecność srebra jako domieszki do TiO_2 w ilości 5% wagowych wpływa na wzrost wartości sprawności w stosunku do ogniw słonecznych z TiO_2 bez dodatku srebra (PCE z TiO_2 -Ag = 2,4%, PCE z TiO_2 = 0,57%). Niestety warstwa TiO_2 -Ag jako warstwa buforująca katodę w ogniwie o architekturze ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/ TiO_2 -Ag 3%/Al wpływa na obniżenie sprawności ogniwa w porównaniu z ogniwem nie zawierającym warstwy buforującej (PCE = 0,68%, PCE = 2,35%) [4].

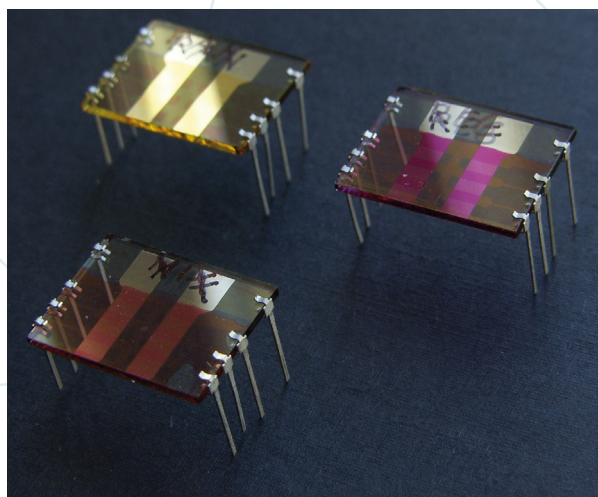
Tabela 1. Parametry fotowoltaiczne polimerowych ogniw fotowoltaicznych z nanocząstkami Ag w warstwie PEDOT:PSS lub warstwie aktywnej P3HT:PCBM

Rozmiar i stężenie Ag	J_{sc} [mA/cm ²]	U_{oc} [V]	FF [-]	PCE [%]
szkło/ITO/PEDOT:PSS+Ag/P3HT:PCBM (1:0,7)/Al				
10 nm (lub 50 nm), 0,1 µl/ml	7,56 (8,13)	0,625 (0,598)	0,40 (0,41)	1,94 (1,98)
10 nm (lub 50 nm), 0,2 µl/ml	9,72 (8,62)	0,605 (0,614)	0,42 (0,42)	2,45 (2,22)
10 nm (lub 50 nm), 0,3 µl/ml	9,01 (9,03)	0,618 (0,637)	0,43 (0,48)	2,38 (2,77)
szkło/ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM (1:0,7) +Ag/Al				
20 nm, 1 mg/ml	7,65	0,659	0,60	3,01
J_{sc} : gęstość prądu zwarcia, U_{oc} : napięcie obwodu otwartego, FF: współczynnik wypełnienia, PCE: sprawność				

Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe dla skonstruowanych ogniw fotowoltaicznych przedstawiono na rys. 1 wraz ze zdjęciami skonstruowanych polimerowych ogniw słonecznych.

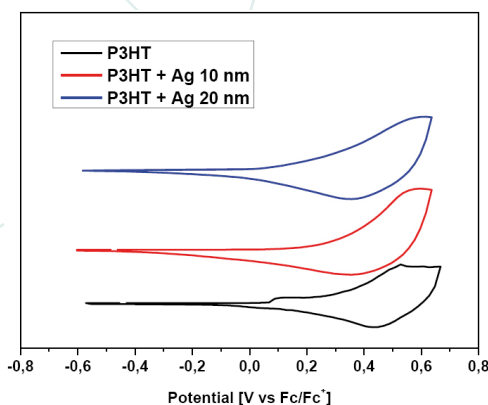
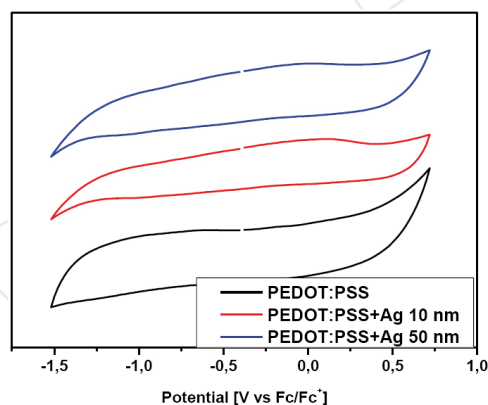


Rys. 1. Charakterystyki J-U polimerowych ogniw fotowoltaicznych z Ag wraz ze zdjęciami polimerowych ogniw fotowoltaicznych



W celu wyjaśnienia wpływu obecności nanocząstek Ag na parametry elektryczne skonstruowanych polimerowych ogniw fotowoltaicznych wykonano badania woltamperometrii cyklicznej (CV) i badania absorpcyjne w zakresie UV-vis. Dla P3HT z Ag oraz PEDOT:PSS z Ag wyznaczono potencjał jonizacji i powinowactwo elektronowe a na ich podstawie oszacowano poziomy energetyczne HOMO-LUMO. Badania elektrochemiczne zostały wykonane przy użyciu potencjostatu Autolab PGSTAT204. Badania CV były prowadzone w układzie trójelektrodowym z platynową elektrodą pomocniczą i chlorosrebrową elektrodą odniesienia. Elektrodą pracującą była płytka ITO o rezystancji wynoszącej 20 Ω /kw. ITO pokrywano roztworem polimeru z nanocząstkami Ag. Pomiaru były prowadzone w atmosferze argonu w 0,1 M roztworze TBAPF₆ w acetonitrylu (dla P3HT) lub chloroformu (dla PEDOT:PSS) w zakresie potencjałów od -1,6 do 0,8 V (dla PEDOT:PSS) i od -0,6 do 0,6 V (dla P3HT) z prędkością 100 mV/s. Wyniki badań CV dla P3HT bez i z nanocząstkami Ag przedstawiono w tabeli 2.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, wpływ rozmiaru nanocząstek Ag zarówno w warstwie z P3HT jak i z PEDOT:PSS na położenie poziomu HOMO i wartość potencjału utlenienia (E_{ox}). Krzywe woltamperometryczne przedstawiono na rys. 2.

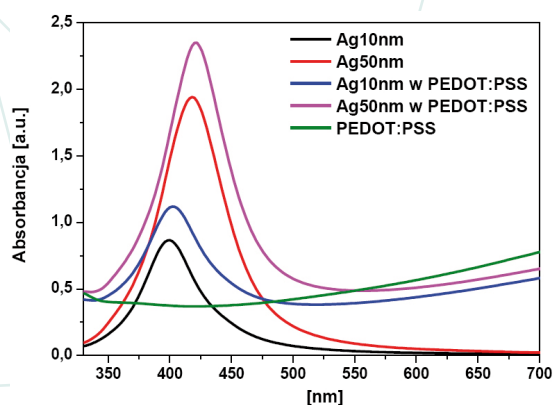


Rys. 2. Krzywe woltamperometrii cyklicznej dla PEDOT:PSS z Ag i P3HT z Ag

Tabela 2. Wyniki badań CV dla P3HT bez i z nanocząstkami Ag

Polimer	E_{ox} [V]	HOMO [eV]	E_g [eV]	LUMO [eV]
P3HT z Ag 20 nm	0,17	-4,84	2	-2,84
P3HT z Ag 10 nm	0,31	-5,04	2	-3,04
P3HT	0,31	-5,03	2,16	-2,87

Istotnym aspektem w fotowoltaice jest zakres spektralny światła absorbowanego przez warstwę organiczną w ogniwie słonecznym. Dlatego też wykonano widma absorpcyjne w zakresie UV-vis dla P3HT z nanocząstkami Ag, PEDOT:PSS z nanocząstkami Ag i warstw TiO_2 -Ag. Pomiar absorpcji w zakresie UV-Vis w roztworze i warstwie wykonano na spektrofotometrze Jasco V-670. Nie obserwowano istotnych różnic we właściwościach absorpcyjnych badanych roztworów i warstw. Przykładowe widma absorpcyjne w zakresie UV-vis przedstawiono na rys. 3.

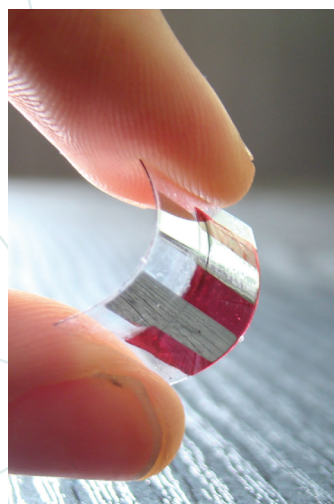


Rys. 3. Widma absorpcji w zakresie UV-vis dla nanocząstek Ag oraz PEDOT:PSS bez i z nanocząstkami Ag w roztworze wodnym

Podsumowanie

Polimerowe ogniwa słoneczne na podłożach elastycznych o zoptymalizowanej architekturze i dobranych parametrach optycznych i elektrycznych pozwalają na zastosowanie ich, jako tzw. przenośnych źródeł energii, elementów ubiorów a także pokryć budynków (dachy, ściany), namiotów czy też żagli. W Instytucie Elektrotechniki we Wrocławiu wytworzono elastyczne polimerowe ogniwo fotowoltaiczne na podłożu PET jak przedstawiono na rys. 4 [5, 6].

Polimerowe ogniwa fotowoltaiczne są także proponowane do zastosowań militarnych, gdzie wymagana jest elastyczność, lekkość i łatwe przemieszczanie detektorów promieniowania i elementów zasilania. Ponadto polimerowe ogniwa słoneczne mogą, jako przenośne źródła energii znaleźć zastosowanie w przypadku wystąpienia kłesk żywiołowych, do zasilania obiektów o utrudnionym dostępie, w tym także urządzeń militarnych.



Rys. 4. Zdjęcie elastycznego polimerowego ogniwa fotowoltaicznego wytworzonego w IEL Wrocław

Literatura

1. K.D.G. I. Jayawardena, L. J. Rozanski, C.A. Mills, M.J. Belatis, N.A. Nismy, S.R.P. Silva, *Inorganics-in-organics: recent developments and outlook for 4G polymer solar cells*, Nanoscale, 5, 8411-8427, 2013.
2. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, *Solar cell efficiency tables* (version 42), Prog. Photovolt: Res. Appl. 21, 827-837, 2013.
3. B. Boharewicz, A. Iwan, B. Zboromirska-Wnukiewicz, *Wpływ dodatku nanocząstek srebra do warstwy PEDOT:PSS na sprawność objętościowych polimerowych ogniw słonecznych*. XIV Krajowa Konferencja Elektroniki, 8-12 czerwca 2015, Dartówko Wschodnie. Sesja specjalna pt: Rozwój ogniw fotowoltaicznych i paliwowych w Polsce.
4. A. Iwan, B. Boharewicz, A. Hreniak, I. Tazbir, J. Chmielowiec, *Polymer solar cells with a TiO_2 :Ag layer*, Journal of Modern Optics, special issue Organic Photovoltaics, 61, 1767-1772, 2014.

5. B. Boharewicz, A. Iwan, A. Hreniak, I. Tazbir, K. Parafiniuk, *Polimerowe ogniwa fotowoltaiczne: konstrukcja i charakterystyka*. XIII Krajowa Konferencja Elektroniki, Materiały konferencyjne, rozdział IX. Polimerowe ogniwa fotowoltaiczne, str. 361-365, 2014, ISBN: 978-83-934712-1-8.
6. A. Iwan, I. Tazbir, M. Sibiński, B. Boharewicz, G. Pasciak, E. Schab-Balcerzak, *Optical, electrical and mechanical properties of indium tin oxide on polyethylene terephthalate substrates: Application in bulk-heterojunction polymer solar cells*, Materials Science in Semiconductor Processing, 24, 110-116, 2014.

Podziękowania

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu pt.: „Nowe polimerowe ogniwa fotowoltaiczne: Badanie wpływu budowy polimeru, architektury ogniwa oraz rodzaju domieszki na

sprawność polimerowych ogniw słonecznych opartych na poliazometinach i politiofenach” (POF) otrzymane w ramach I konkursu NCBiR „Program Badań Stosowanych” (nr PBS1/A5/27/2012).



6.6. Systemy obrazowania trójwymiarowego: dokumentacja, analiza i wizualizacja 3D miejsc zdarzeń.

Małgorzata Kujawińska, Robert Sitnik, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska

Współcześnie dwuwymiarowe, konwencjonalne monitorowanie, obrazowanie i dokumentowanie otaczającej nas rzeczywistości jest w wielu przypadkach niewystarczające [1]. Dotyczy to, oprócz licznych zastosowań cywilnych, wielu obszarów działań służb mundurowych: wojska, policji, straży granicznej i straży pożarnej. Wśród najważniejszych obecnie zidentyfikowanych zadań należy wymienić:

1. oględziny czyli czynność procesową obowiązującą zarówno w dochodzeniach policyjnych jak i wojskowych i polegającą na wykrywaniu, zabezpieczaniu/dokumentacji, wstępnym zbadaniu szeroko rozumianych śladów kryminalistycznych w celu wyjaśnienia charakteru i okoliczności zdarzenia. Często w przypadku oględzin wojskowych np. miejsc po ataku z użyciem tzw. improwizowanych urządzeń eksplodujących wymagania dotyczące sprzętu i metodyki pomiarowej są szczególnie wymagające;
2. opracowywanie realistycznych trójwymiarowych środowisk (scen) do szkolenia służb z wykorzystaniem systemów rzeczywistości rozszerzonej wykorzystującej techniki 3D;
3. wykrywanie, lokalizacja i monitorowanie żywych ludzi poprzez dym i płomienie.

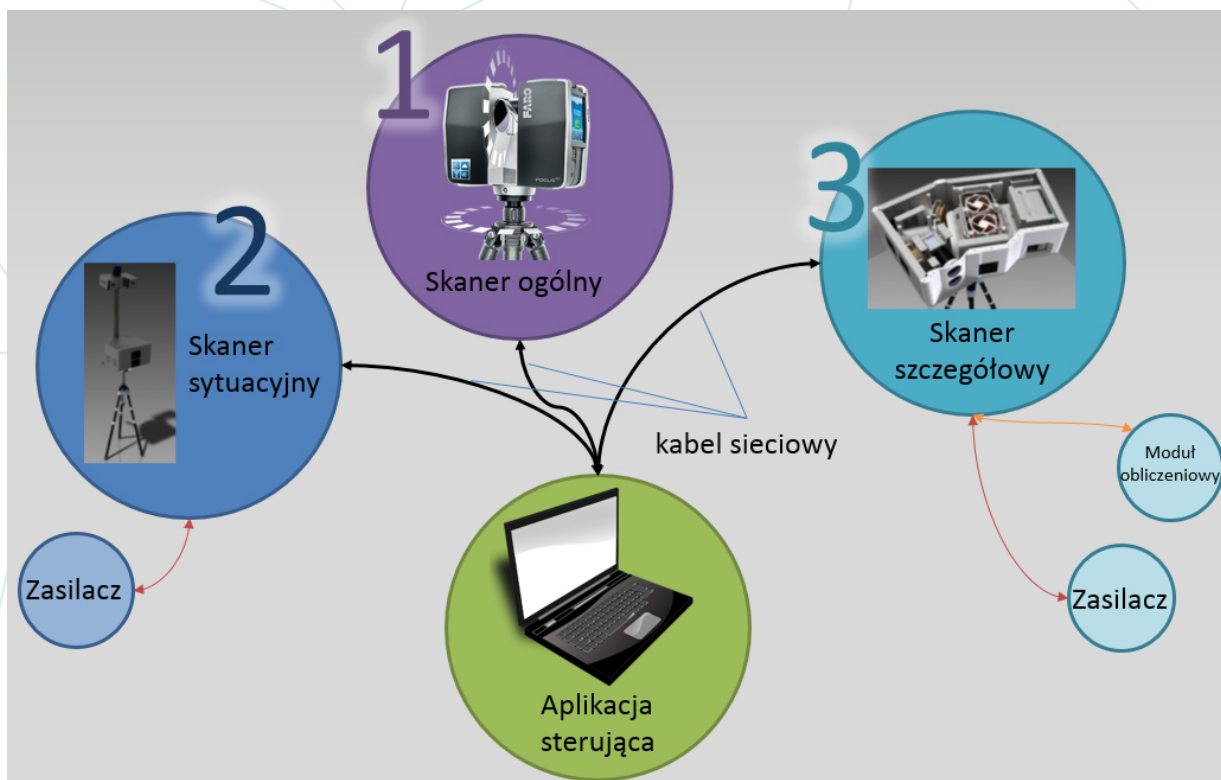
W zakresie tej tematyki zespół naukowo-techniczny z Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej prowadzi szereg prac związanych z obrazowaniem 3D i pomiarami optycznymi, a w szczególności z metodami dokumentacji trójwymiarowej miejsc zdarzeń [2], a w tym:

- skanowanie trójwymiarowe (3D) ogólnie dokumentujące całą scenę (wykonywane z wykorzystaniem techniki powrotu czasu impulsu),
- sytuacyjne pomiary 3D w objętości około 1m^3 pozwalające na uzyskanie rozdzielczości do $0,3\text{mm}$ przy niepewności pomiaru $<0,1\text{mm}$ (wykonywane

za pomocą techniki z oświetleniem strukturalnym, OS) [3],

- szczegółowe pomiary 3D w objętości około $200\text{mm} \times 120\text{mm} \times 100\text{mm}$ pozwalające na dokumentowanie powierzchni z rozdzielczością rzędu $50\mu\text{m}$ z niepewnością poniżej $10\mu\text{m}$ (OS),
- lokalne pomiary 3D w objętości kilkudziesięciu mm^3 z submikrometrową niepewnością pomiaru (pomiary interferometryczne i holograficzne).

W ramach rozwoju technik dokumentacji trójwymiarowej miejsc zdarzeń został opracowany hierarchiczny system składający się z trzech skanerów oraz oprogramowania do integracji danych 3D w jeden model przestrzenny (Rys.1). Oprogramowanie pozwala stworzyć hierarchiczną dokumentację 3D miejsca zdarzenia zgodnie ze scenariuszami pomiarowymi opracowanymi we współpracy z Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym Policji. Zgodnie z nimi pierwszym etapem procedury dokumentacji miejsca zdarzenia jest stworzenie modelu całej sceny poprzez połączenie kilku skanów ogólnych. Następnie wykonywane są skany sytuacyjne wybranych fragmentów sceny uznanych za szczególnie interesujące i kolejno są one umieszczane w modelu ogólnym. W obrębie skanów sytuacyjnych wykonywane są skany szczegółowe o największej rozdzielczości i dopasowywane są do modelu [4]. Skany szczegółowe ze względu na stosunkowo dużą rozdzielczość reprezentacji pozwalają na analizę poszczególnych nawet poszczególnych plam krwawych oraz śladów narzędzi. Przykładowy wynik skanowania znajduje się na Rys. 2.



Rys. 1. Schemat połączeń w hierarchicznym systemie do dokumentacji miejsc zdarzeń.



Rys. 2. Model ogólny miejsca zdarzenia (zrzut ekranu z oprogramowania do wspomagania tączenia danych kierunkowych).

Powyższe techniki skanowania 3D mogą być wzbogacone poprzez zastosowanie metody cyfrowej korelacji obrazu (CKO) umożliwiającej monitorowanie zmian (przemieszczeń i deformacji oraz odkształceń) w badanym obiekcie [5] oraz dołączenie do systemu kamery termowizyjnej, umożliwiającej

monitorowanie obciążeń termicznych obiektu [6]. Szczególnie predystynowane są do tego systemy oświetlenia strukturalnego, które bez poważnych zmian w konfiguracji sprzętowej (oprócz dołączenia kamery IR) mogą być przekształcone w systemy wielofunkcyjnego obrazowania i monitorowania

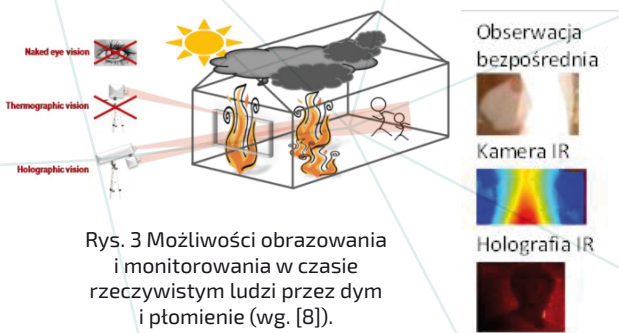
obiektów i scen trójwymiarowych. W przypadku zapotrzebowania na dokładne lokalne pomiary kształtu i jego zmian w niewielkich objętościach lub na analizę obiektów przezroczystych (fazowych) nasza oferta obejmuje również opracowanie i implementację zautomatyzowanych układów interferometrycznych (systemy cyfrowej interferometrii plamkowej i interferometrów z rozdzieleniem czoła fali [5] oraz kamer holograficznych [6]. Układy te specjalnie zaprojektowane dla wykonywania pomiarów poza laboratorium (w warunkach polowych) umożliwiają wykonywanie analiz z dokładnością nanometrową.

Najnowszą propozycją Zespołu z Wydz. Mechatroniki jest opracowanie systemu bezsoczewkowej holografii cyfrowej pracującego w dalekiej podczerwieni ($10,4 \mu\text{m}$) [8] i umożliwiającego obrazowanie i monitorowanie w czasie rzeczywistym żywych ludzi poprzez dym i płomień niezależnie od chemicznej natury źródła ognia (Rys. 3) [9].

Możliwość obrazowania sceny poprzez płomień i dym stanowi ogromne wyzwanie w trakcie działań służb ratowniczych. Współczesne technologie, zaadaptowane m. in. przez straż pożarną, wykorzystują bolometryczne kamery IR umożliwiające obrazowanie poprzez dym. Jednakże detektory te są oślepiane przez promieniowanie emitowane przez płomień (Rys. 3). Proponujemy opracować system działający na innej zasadzie tj. wykorzystujący technologię bezsoczewkowej cyfrowej holografii w zakresie podczerwieni [8,9], która umożliwia prawidłowe obrazowanie żywych ludzi przez dym i płomień. Proponowany system bazuje na rejestracji hologramów sceny z wykorzystaniem la-

sera cw o długości fali $10,6 \mu\text{m}$ i umożliwia:

- dobrej jakości obrazowanie przez dym i płomień, niezależnie od natury chemicznej palących się materiałów i ich emisyjnego widma,
- monitorowanie w czasie rzeczywistym nieruchomych lub poruszających się ludzi (Rys. 3).



Rys. 3 Możliwości obrazowania i monitorowania w czasie rzeczywistym ludzi przez dym i płomień (wg. [8]).

Wszystkie powyższe techniki mogą być również stosowane do pozyskiwania realistycznego kontentu do systemów rzeczywistości rozszerzonej i wirtualnej w celu przeniesienia rzeczywiście istniejących miejsc i lokacji do różnego rodzaju systemów wspomagania, treningu i planowania operacji z wykorzystaniem środowisk 3D.

Prace i systemy proponowane powyżej zostały zainicjowane i częściowo zrealizowane w ramach dwóch projektów z obszaru bezpieczeństwa i obronności (DOBR/0006/R/ID1/2012/03, DOBR-BIO4/005/13287/2013 - finansowanych przez NCBiR) oraz projektów MONIT - POIG.0101.02-00-013/08-00 (projekt współfinansowany ze środków EFRR) i HoloTrue3D (projekt w ramach programu MAESTRO finansowany przez NCN).

Bibliografia

- [1] H. Larsson, D. Letalick, *Military forensic use of handheld 3D camera*, Proc. SPIE 8731, 873111 (2013)
- [2] K. Januszkiewicz, E. Szablowska-Gnap, J. Dabrowska, M. Walczuk, and M. Kwietniewska, *Platform for Securing and Analyzing Bloodstains at the Crime Scene Using 3D technology*, Journal of Bloodstain Pattern Analysis, 29(3&4), 28 (2013)
- [3] Adamczyk M., Kamiński M., Sitnik R., Bogdan A., Karaszewski M., *Effect of Temperature on Calibration Quality of Structured-Light Three-Dimensional Scanners*, Applied Optics, 53(23), 5154-5162 (2014)
- [4] Sitnik R., Hołowko E., *View integration technique using multi-resolution point clouds in 3D modeling*, Proc. SPIE 87910, 87910D-12 (2013)
- [5] M. Malesa, K. Małowany, U. Tomczak, B. Siwek, M. Kujawińska, and A. Siemińska-Lewandowska, *"Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry"*, Computers in Industry, 64, 1301-1315 (2013)
- [6] Malesa M., Małowany K., Wiśnioch M., Kujawińska M., *System monitoringu newralgicznych elementów bloków elektrociepłowniczych*, Przegląd Energetyczny 2012, nr 3 (67), s. 35-40

- [6] D. Łukaszewski, L. Satbut, *Sensor for in-plane displacement measurement based on combined grating and speckle pattern phase shifting interferometry*, J. Theoret. Appl. Mechanics, 50(4), 1063-1072 (2012)
- [7] A. Michalkiewicz, M. Kujawińska, K. Stasiewicz, *Digital holographic camera and data processing for remote monitoring and measurements of mechanical parts*, Optoelectronics Review, 16(1), 68-75 (2008)
- [8] M. Locatelli et al. *Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography*, Optics Express 21, 5379-5390 (2013)
- [9] A. Pelagotti, M. Paturzo, M. Locatelli, A. Geltrude, A. Finizio, P. Ferraro, G. Finke, M. Kujawinska, *An automated method for increasing the numerical aperture of IR digital holography recording system*, Proc. SPIE 8083, 80830Y (2011)

6.7. System optyczny do nieinwazyjnego monitorowania zmian utlenowania kory mózgowej podczas treningu pilotów Sił Powietrznych RP w warunkach przeciążeń.

dr hab. inż. Łukasz Dziuda, Wojskowy Instytut Medycyny Lotniczej

Streszczenie

W pracy zaprezentowano 6-kanalowy system oparty na spektroskopii bliskiej podczerwieni - NIRS (near infrared spectroscopy), umożliwiający monitorowanie zmian stężenia hemoglobiny w tkankach kory mózgowej. System wykorzystuje promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fali z zakresu 600-900 nm, w którym tkanka wykazuje niską absorpcję, pozwalając światłu na względnie głęboką penetrację. Mierzac natężenie promieniowania przechodzącego przez tkankę, możliwe jest dokonywanie oceny jej parametrów hemodynamicznych. W prezentowanym zastosowaniu, system optyczny stanowi element stanowiska do badań funkcjonalnych układu krążenia pilota w warunkach obniżonego ciśnienia wokół dolnej części ciała – LBNP (lower body negative pressure) oraz stresu ortostatycznego. Metoda LBNP pozwala na zasymulowanie zjawiska hipoksji niedokrwiennej u pilota, natomiast pionizacja badanego umożliwia wywołanie stanu

hipotonii. Obydwu tych zjawisk, oddzielnie lub łącznie, doświadczają piloci samolotów wysokomaneurowych. Ich objawami są kolejno: utrata widzenia kolorów, widzenie tunelowe, całkowita utrata widzenia oraz utrata przytomności. Zadaniem systemu optycznego jest odpowiednio wcześnie wykrycie niebezpiecznych trendów zmian stężeń hemoglobiny utlenowanej i zredukowanej w monitorowanych obszarach kory mózgowej oraz przerwanie badania lub treningu tuż przed wystąpieniem wyżej wymienionych oznak. Praca zawiera wstępne wyniki pomiaru zmian stężeń hemoglobiny zarejestrowane u pilota poddanego zmianom kąta nachylenia ciała w zakresie od $+14^\circ$ do -14° . System NIRS prawidłowo i bezzwłocznie rejestruje sygnały.

Słowa kluczowe: badania lotniczo-lekarskie, hipoksja, hipotonia, LBNP, NIRS, utlenowanie kory mózgowej

Wstęp

Piloci samolotów wysokomaneurowych często doświadczają długotrwałych przyspieszeń sięgających 6-8 G w osi podłużnej ciała (oś z), a zdarza się, że wartość przyspieszenia ziemskiego jest chwilowo przekraczana nawet kilkunastokrotnie. Wówczas dochodzi do kumulowania krwi w kończynach dolnych, powodującego zaburzenia jej transportu w górnych partiach ciała, w tym w mózgu. Konsekwencją zaburzeń krążenia mózgowego są objawy niedoboru tlenu, czyli stan hipoksji niedokrwiennej (ischemicznej). Pilot najpierw przestaje rozróżniać kolory (greyout),

doświadcza widzenia tunelowego (tunnel vision), wreszcie traci obraz (blackout) i doznaje przeciążeniowej utraty świadomości (G-LOC). Podobne symptomy towarzyszą hipotonii, czyli zjawisku zmniejszonego napięcia mięśniowego wywołanego zaburzeniami regulacji ciśnienia i obniżenia pojemności wyrzutowej serca podczas gwałtownych zmian pozycji ciała, np. z leżącej do stojącej. W przypadku wykonywania ruchów z użyciem siły własnych mięśni, np. wstawanie z łóżka, u osób z prawidłowo funkcjonującym autonomicznym układem nerwowym objawy hipotonii ortosta-

tycznej nie występują lub są znikome. Jednak u pilotów, którzy podczas wykonywania manewrów lotniczych przechodzą z pozycji poziomej do pionowej bez użycia siły mięśni nóg, skutki takiego stresu ortostatycznego mogą być szczególnie niebezpieczne, a w skrajnej sytuacji doprowadzić do wypadku.

Od kilkudziesięciu lat zarówno hipotonia niedokrwienna jak i hipoksja były badane z wykorzystaniem wirówek przeciążeniowych lub komór LBNP generujących podciśnienie wokół dolnej części ciała, umieszczanych na stołach pionizacyjnych [1]. Drugi z wymienionych sposobów angażuje znacznie mniejsze zasoby ludzkie i aparaturowe do przeprowadzania badań, podczas, gdy bodźce wywierane na pilota mogą być wystarczające do praktycznego zapoznania go z wyżej przytoczonymi zjawiskami i trenowania manewrów

przeciwprzeciążeniowych minimalizujących ich skutki. Ponadto, komora LBNP zintegrowana ze stołem pionizacyjnym może służyć do określania predyspozycji do wykonywania zawodu pilota w oparciu o monitorowane sygnały i wyznaczane na ich podstawie parametry fizjologiczne.

Przedstawiamy zaprojektowane i skonstruowane we własnym zakresie stanowisko ORTO-LBNP, w skład którego, oprócz układów do zadawania zaburzeń ortostatycznych i obniżonego ciśnienia, wchodzi moduły do monitorowania czynności życiowych, w tym system NIRS [2]. W kolejnych częściach pracy czytelnik znajdzie opis konstrukcji systemu oraz wstępne wyniki uzyskane za jego pomocą.

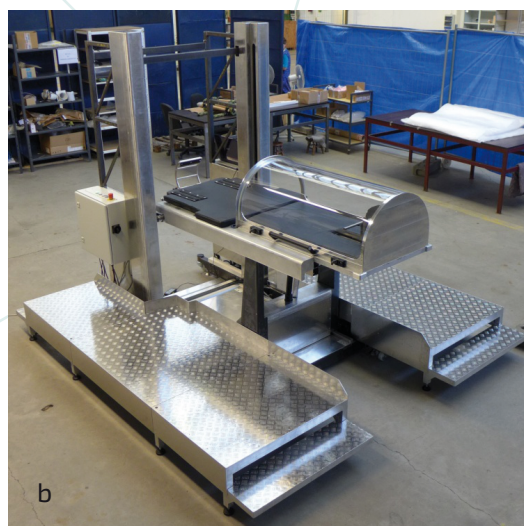
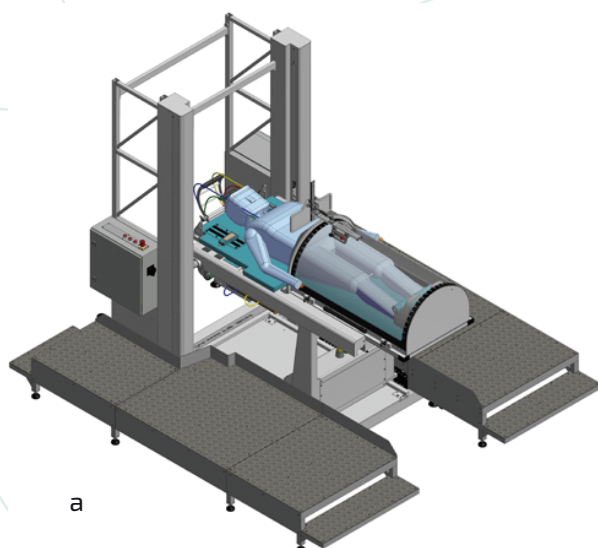
Metody

Komora LBNP

Zintegrowane ze sobą moduły ORTO (stół pionizacyjny) i LBNP (komora hipobaryczna) powstały w oparciu o wnikliwą analizę dostępnej literatury oraz własne doświadczenia w tych obszarach [1]. Układ napędowy stanowiska badawczego umożliwia poruszanie się stołu pionizacyjnego z komorą LBNP przypominające ruch kołyski; został zastrzeżony w Urzędzie Patentowym RP. Na rysunku 1 pokazano model stanowiska stworzony w środowisku Inventor oraz fotografię fizycznego

urządzenia, charakteryzującego się następującymi właściwościami:

- zakres kąta pochylenia stołu pionizacyjnego: $-45^{\circ} \div +80^{\circ}$;
- prędkość zmiany pochylenia leża: $45^{\circ}/s$;
- zakres zmian podciśnienia w komorze: $0 \div -100 \text{ mmHg}$;
- prędkość zmiany ciśnienia w komorze: $20 \text{ mmHg}/s$.



Rys. 1. Stanowisko badawcze ORTO-LBNP: (a) model w środowisku Inventor oraz (b) jego fizyczna realizacja.

System NIRS

Obok szeregu modułów pomiarowych takich jak elektrokardiograf czy elektroencefalograf, system NIRS stanowi integralny element stanowiska ORTO-LBNP. Schemat ideowy 6-kanalowego systemu do pomiarów NIRS przedstawia rysunek 2 (a), natomiast fotografię urządzenia pokazano na rysunku 2 (b). Schemat rozmieszczenia światłowodów pomiarowych na powierzchni głowy oraz na panelu czołowym systemu NIRS ilustruje rysunek 3. Światłowody kanałów 1 i 2 umieszczono nad płatem czołowym (L1, R1), kanały 3 i 4 - nad ośrodkami motorycznymi kory mózgowej (L2, R2), natomiast kanały 5 i 6 monitorują zmiany w ośrodku wizualnym kory mózgowej (L3, R3). Zastosowano długości fali: $\lambda_1=735$ nm i $\lambda_2=850$ nm. Monitorowanie zmian stężenia hemoglobiny oparte na technologii NIRS polega na pomiarze natężenia promieniowania reemitowanego z powierzchni głowy i jest oparte na wykorzystaniu zmodyfikowanego prawa Lamberta-Beera [2]. Całkowitą ekstynkcję (osłabienie) wiązki świetlnej, A , opisuje się zależnością

$$A = \log \frac{I_0}{I} = (\varepsilon_{HbO_2} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb} C_{Hb}) \langle l \rangle + A_T$$

gdzie:

I_0 - natężenie promieniowania padającego,

I - natężenie promieniowania podlegającego detekcji,

$\langle l \rangle$ - średnia droga optyczna fotonów,

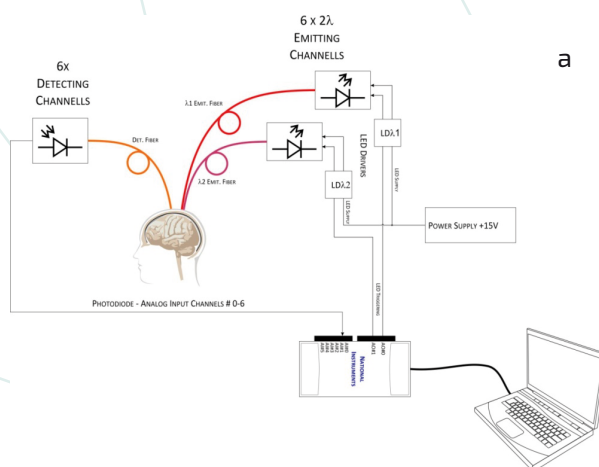
A_T - ekstynkcja tła,

C, ε - stężenia i współczynniki ekstynkcji hemoglobiny utlenowanej HbO_2 i zredukowanej Hb .

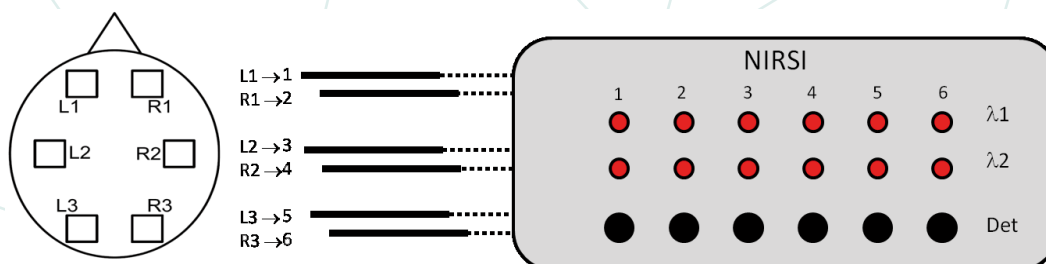
W przypadku pomiaru z wykorzystaniem dwóch długości fali, po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się układ równań

$$\begin{cases} \Delta A_1 = (\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} \Delta C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} \Delta C_{Hb}) \langle l \rangle \\ \Delta A_2 = (\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} \Delta C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} \Delta C_{Hb}) \langle l \rangle \end{cases}$$

którego rozwiązanie pozwala na wyznaczenie wartości zmian stężeń hemoglobiny utlenowanej i zredukowanej.



Rys. 2. 6-kanalowy system NIRS:
(a) schemat ideowy, (b) urządzenie fizyczne

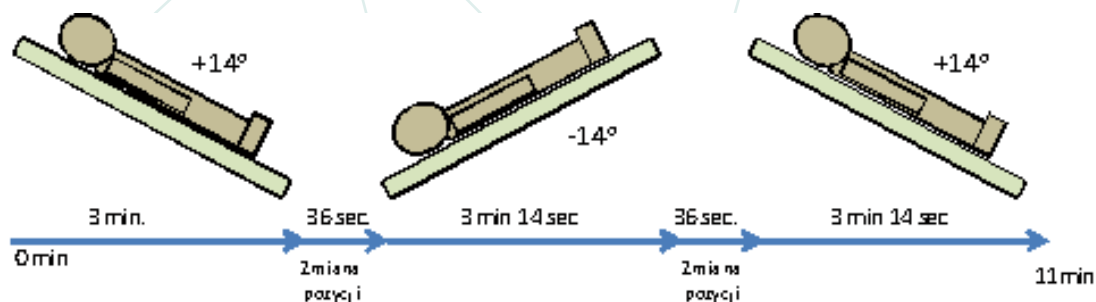


Rys. 3. Układu optod pomiarowych rozmieszczonych symetrycznie na powierzchni głowy:

L - półkula lewa, R - półkula prawa, L1 i R1 - płatek czołowy (frontal lobe),
L2 i R2 - płatek ciemieniowy (motor cortex), L3 i R3 - płatek potyliczny (visual cortex)

Rezultaty

Wstępne testy wykonano dla kontrolowanej zmiany kąta nachylenia ciała pilota wg protokołu przedstawionego na rysunku 4.



Rys. 4. Zmiana kąta nachylenia ciała podczas pomiaru NIRS: pozycja początkowa $+14^\circ$, 3 min, zmiana pozycji do -14° w ciągu 36 sekund, pozycja -14° , 3 min 14 sekund, powrót do pozycji wyjściowej w czasie 36 sekund, pozycja $+14^\circ$, 3 minuty 14 sekund.

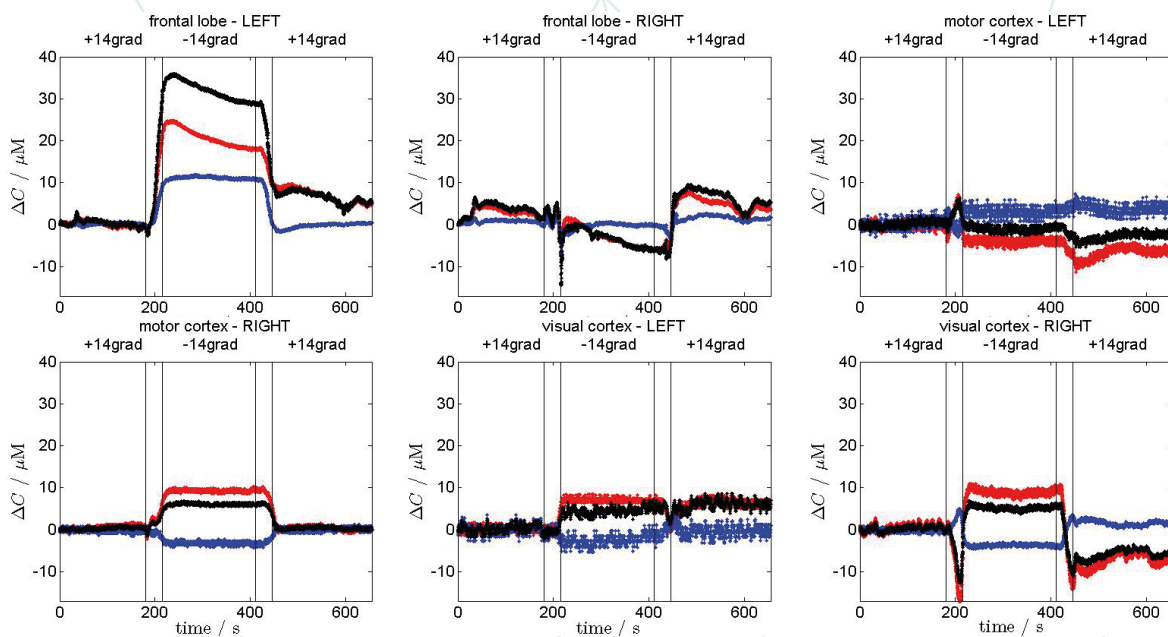
Jak pokazano na rysunku 5, przepływ mózgowy był stały w pierwszej fazie eksperymentu (ciało pilota ułożone pod kątem $+14^\circ$). W momencie zmiany kąta nachylenia (do -14°), zaobserwowano wzrost stężenia hemoglobiny całkowitej, spowodowany zwiększonym napływem krwi do mózgu. Po kolejnej zmianie kąta nachylenia (do $+14^\circ$), stężenia hemoglobiny dążyły do uzyskania wartości początkowych, rejestrowanych w pierwszej fazie testu. Zmiany te były podobne dla wszystkich kanałów z wyjątkiem kanału umieszczonego nad ośrodkiem motorycznym lewej półkuli oraz kanału

umieszczonego nad ośrodkiem czołowym prawej półkuli. Dla tych kanałów stwierdzono zbyt niski stosunek sygnału do szumu.

Otrzymane wyniki potwierdzają, że system NIRS prawidłowo i bez zbędnej zwłoki rejestruje sygnały zmian stężeń hemoglobiny. Pozwala to na natychmiastową reakcję w przypadku zagrożenia badanego pilota utratą przytomności. Dodatkowo, w sygnałach pomiarowych zaobserwowano wyraźną falę tętna oraz falę oddechową.

Wnioski

Skojarzenie techniki NIRS z uznaną i dobrze udokumentowaną metodą LBNP pozwala na rozszerzenie formuły diagnostycznej tej drugiej oraz umożliwia zastosowanie nowej metody diagnostyki w badaniach hipotonii ortostatycznej i mechanizmów regulacyjnych układu krążenia. Na podstawie szeregu badań z udziałem kandydatów do lotnictwa zostaną opracowane obiektywne wskaźniki efektywności działania pętli regulacyjnych odpowiedzialnych za utrzymanie prawidłowego poziomu mózgowego przepływu krwi, pozwalające na dokonywanie oceny predyspozycji i wyszkolenia pilotów. Pracę sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Projekt Nr DOBR/0052/R/ID1/2012/03.



Rys. 5. Wyniki pomiaru zmian stężeń hemoglobiny utlenowanej (czerwony), zredukowanej (niebieski) i całkowitej (czarny) przeprowadzonego na pilocie podczas testu ortostatycznego.

Literatura

- [1] Śmietanowski, M., Cudnoch-Jędrzejewska, A., Dziuda, Ł., Zastosowanie testu pionizacyjnego i podciśnienia wokół dolnej połowy ciała w badaniach odruchowej regulacji krążenia u ludzi, „Folia Cardiologica”, 2015, 10 (4), 283-287.
- [2] Liebert, A., *Metody optyczne w przeczaszkowych badaniach utlenowania i ukrwienia mózgu*, IBIB PAN, Warszawa 2013.

6.8. Kwantowe lasery kaskadowe,

prof. dr hab. Maciej Bugajski, Instytut Technologii Elektronowej

Streszczenie

W referacie omówione zostaną badania nad nowym typem półprzewodnikowych laserów podczerwieni, tzw. kwantowymi laserami kaskadowymi, prowadzone w Instytucie Technologii Elektronowej. Lasery te, ze względu na swoją zwartą konstrukcję, małe wymiary i łatwość zasilania są szczególnie predystynowane do zastosowań w systemach bezpieczeństwa i technice wojskowej. Omówione zostaną prace nad zastosowaniem laserów kaskadowych w przenośnych

urządzeniach do detekcji śladowych ilości zanieczyszczeń gazowych i par materiałów wybuchowych a także w systemach zabezpieczenia ruchomych obiektów wojskowych przed atakiem pocisków naprowadzanych na podczerwień, których działanie oparte jest na wykorzystaniu efektu oślepienia.

Słowa kluczowe: lasery kaskadowe, detekcja gazów, systemy oślepiające

Wstęp

Niezwykle ważnym problemem we współczesnym świecie są zagrożenia terrorystyczne. Aby przeciwdziałać tym zagrożeniom, w państwach NATO prowadzone są badania nad opracowaniem technologii do miejscowego i zdalnego wykrywania obecności materiałów wybuchowych. Detekcję klasycznych i improwizowanych materiałów wybuchowych (MW) realizuje się poprzez: obrazowanie broni i ładunków ukrytych w środkach transportu, bagażu, pod ubraniem, itp., wykrywanie par MW, uwalnianych z ładunków wybuchowych lub resztek (śladów) MW pozostawionych na przedmiotach lub dłoniach. W ramach pierwszej grupy stosuje się metody wykorzystujące: promieniowanie X oraz gamma, promieniowanie neutronowe, spektroskopię jądrowego rezonansu magnetycznego, spektroskopię mikrofalową, spektroskopię Ramana. Zaletą tych metod jest możliwość dokładnej lokalizacji materiałów wybuchowych, np. w bagażu. Jednakże ich wadą jest bardzo wysoka cena. Do drugiej grupy można zaliczyć metody analitycz-

ne, metody z zastosowaniem markerów, chromatografię gazową, spektrometrię masową, spektrometrię ruchliwości jonów, spektroskopię fotoakustyczną i metody optoelektroniczne.

Technologia konstrukcji sensorów jest bardzo zróżnicowana, przy czym większość z nich ma istotne ograniczenia dotyczące czułości lub specyficzności. Dlatego też niezawodną detekcję MW osiągnąć można jedynie przy pomocy rozbudowanych systemów detekcji, w których wykorzystuje się sygnały otrzymane z kilku sensorów.

Drugim ważnym nurtem prac prowadzonych w Instytucie Technologii Elektronowej są badania nad oświetlaczami laserowymi do zastosowania w systemach zabezpieczenia ruchomych obiektów wojskowych (samolotów, helikopterów, pojazdów bojowych) przed atakiem pocisków naprowadzanych na podczerwień. Ich działanie oparte jest na wykorzystaniu efektu zakłócenia lub oślepienia naprowadzających pocisk na cel kamer podczerwonych promieniowaniem lase-

rowym z obszaru średniej i dalszej podczerwieni generowanym przez monolitycznie sprzężone

matryce laserów QCL o wysokiej jasności.

Laserowa detekcja śladowych ilości par i gazów

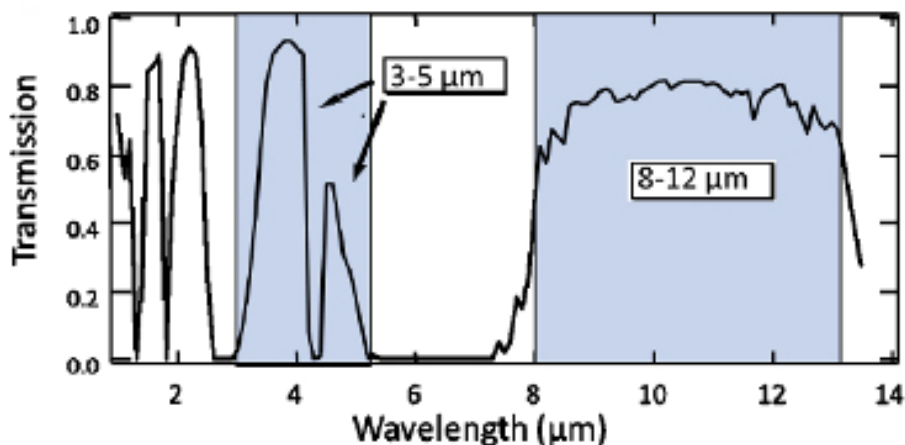
Stężenie par materiałów wybuchowych emitowanych do atmosfery zawiera się w przedziale od 10^{-15} do 10^{-3} g w 1 cm^3 . Zatem do wykrycia tak małych stężeń par MW należy zastosować systemy detekcyjne o ekstremalnie dużej czułości. Tak niskie stężenia preferują metody optoelektroniczne oparte na absorpcji w podczerwieni.

Wykrycie śladowych ilości par materiałów wybuchowych umożliwia jedna z najnowocześniejszych technik spektroskopii absorpcyjnej - technika CEAS (Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy). W oparciu o tę technikę, w Instytucie Optoelektroniki WAT we współpracy z Instytutem Technologii Elektronowej PAN i firmą Vigo System S.A. opracowano optoelektroniczne czujniki amoniaku (NH_3) i tlenków azotu (NO). Uzyskano czułości rzędu kilkadziesiąt ppb (ang. part per billion) dla W sensorze NH_3 zastosowano polski laser QCL (Quantum Cascade Laser) opracowany w Instytucie Technologii Elektronowej, natomiast sensorach NO - lasery QCL szwajcarskiej firmy Alpes i ITE, oraz polskie fotodiody HgCdTe firmy Vigo System. Pozyskanie laserów QCL, o ściśle zdefiniowanych parametrach, pod kątem zastosowania w ww. sensorach jest niezwykle trudne i kosztowne. W Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie są prowadzone prace nad polskimi laserami QCL. Opracowana została technologia wytwarzania laserów kaskadowych dużej mocy, pracujących impulsowo w temperaturze pokojowej. Lasery przeznaczone są do zastosowań w układach do wykrywania śladowych ilości substancji gazowych pracujących w oknach transmisji atmosferycznej ($3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$ i $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$).

Lasery wytwarzane są z heterostruktur AlGaAs/GaAs lub AlInAs/InGaAs/InP otrzymywanych techniką epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Obszar aktywny lasera tworzy układ 3 lub 4 studni kwantowych o grubości pojedynczych nanometrów, sprzężonych z spersyciowym injektorem. Układ ten powtórzony kilkadziesiąt razy tworzy rdzeń lasera. Falowód lasera składa się z warstw AlInAs lub InP . Dla poprawy ograniczenia pola e-m wykorzystywany jest efekt plazmonowy w silnie domieszkowanym półprzewodniku. Opracowane lasery wykorzystane zostały do konstrukcji głowic laserowych, wyposażonych w dedykowane zasilacze i układy kontroli temperatury, przystosowanych do pracy w warunkach polowych. Dodatkowo opracowano metodologię i odpowiednie narzędzia projektowania kwantowych laserów kaskadowych na zadaną długość fali, co stwarza podstawę do elastycznego reagowania na potrzeby rynku w tym zakresie.

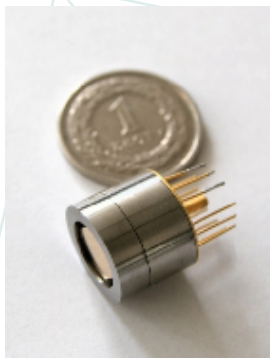
Lasery kaskadowe z AlGaAs/GaAs pracują w zakresie średniej podczerwieni ($\sim 9.0 \mu\text{m} - 10.0 \mu\text{m}$). Lasery z AlInAs/InGaAs/InP emitują promieniowanie z zakresu $4.5 \mu\text{m} - 5.5 \mu\text{m}$. Przesunięcie pasma emisji w kierunku fal krótszych pociąga za sobą konieczność optymalizacji procesu epitaksji, która umożliwi kompensację naprężeń wynikających z niedopasowania sieciowego w strukturach. Rozwiązania wymagały również zagadnienia związane z odprowadzaniem ciepła ze struktur, szczególnie istotne przy pracy z dużą mocą ($P > 1 \text{ W}$) i przy dużych współczynnikach wypełnienia.

Atmospheric Transmission



Rys. 1. Widmo transmisji atmosfery w zakresie średniej podczerwieni

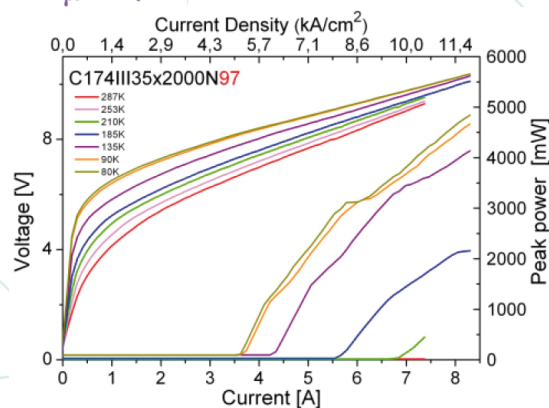
Struktury laserowe montowane są na termoelementie Peltiera w hermetyzowanej obudowie wypełnionej gazem obojętnym. Typowe gęstości prądu progowego laserów z AlGaAs/GaAs emitujących w pasmie $\sim 9 \mu\text{m}$ – $10 \mu\text{m}$, w $T=77 \text{ K}$ są rzędu 5 A/cm^2 a sprawności kwantowe przekraczają 1 W/A , przy całkowitej sprawności energetycznej sięgającej 10%. W temperaturze 300 K lasery pracują impulsowo (współczynnik wypełnienia $ff=0.1\%$) z mocą kilkudziesięciu mW.



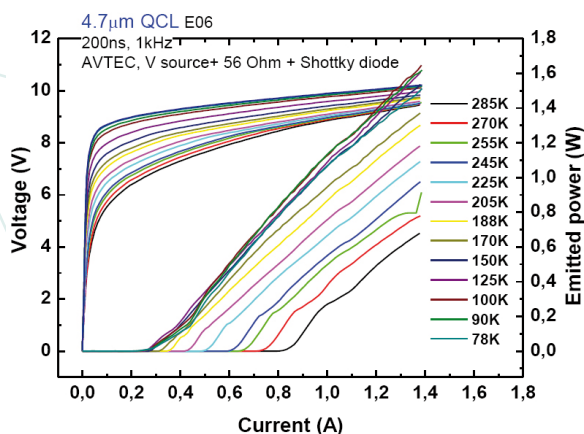
Rys.3 Kwantowy laser kaskadowy z $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) w hermetyzowanej obudowie.

Lasery z $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ emitujące promieniowanie z zakresu $4.5 \mu\text{m}$ – $5.5 \mu\text{m}$ pracują w sposób quasi-ciągły (długości impulsów $\sim 10 \mu\text{s}$) w $T=300 \text{ K}$, z mocą powyżej 0.5 W . Jednocześnie, lasery te charakteryzują się znacznie niższymi gęstościami prądu progowego ($\sim 0.8 \text{ A/cm}^2$).

9.4 μm QCL

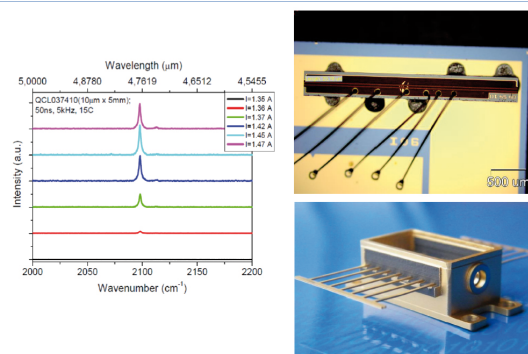


Rys.2 Charakterystyki I-V i P-I laser kaskadowego z $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) reprezentującego aktualny poziom technologii w ITE w tym zakresie.



Rys.4 Charakterystyki I-V i P-I lasera kaskadowego z $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ ($\lambda = 4.7 \mu\text{m}$) reprezentującego aktualny poziom technologii w ITE w tym zakresie.

QCL $\text{InP}/\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$ ($4.7 \mu\text{m}$) double phonon extraction (4)



Rys.5 Kwantowy laser kaskadowy z $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ ($\lambda = 4.7 \mu\text{m}$) w obudowie typu „flat pack”.

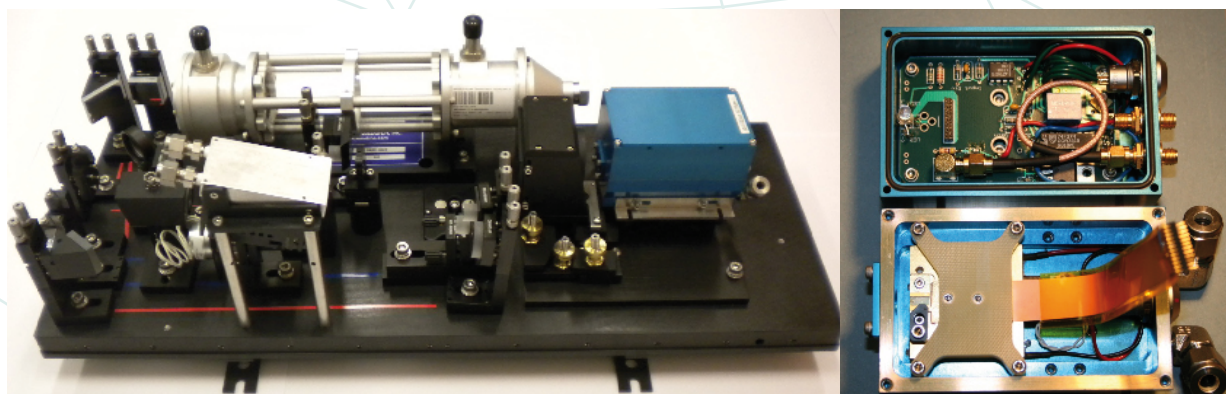
Parametry laserów kaskadowych $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) wytwarzanych w ITE

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Threshold current density	$J_{th}(77\text{K})$	$5 \text{ kA/cm}^2 - 6 \text{ kA/cm}^2$
Threshold current density	$J_{th}(300\text{K})$	$10 \text{ kA/cm}^2 - 14 \text{ kA/cm}^2$
Threshold voltage	$V_{th}(77\text{K})$	$\sim 8.5 \text{ V}$
Power	$P(77\text{K})$	$> 4 \text{ W}$ (max 6 W)
Power	$P(300\text{K})$	25 – 35 mW
Emission wavelength	$\lambda(300\text{K})$	$\sim 9.5 \mu\text{m}$
Characteristic temperature	T_0	220 K - 300 K
Series resistance	$R_s(77\text{K}-300\text{K})$	$0.5 \Omega - 0.7 \Omega$
External differential efficiency	$\eta_d(77\text{K})$	1.2 W/A - 1.6 W/A
Wall plug efficiency	$\eta_{wpe}(77\text{K})$	8.5% - 10.5%

Parametry laserów kaskadowych AlInAs/InGaAs/InP ($\lambda = 4.7 \mu\text{m}$)

	T = 77 K	T = 300 K
Prąd progowy, J_{th}	0.7 kA/cm ²	2.5 kA/cm ²
Sprawność kwantowa, η_d	~1.5 W/A	~1.5 W/A
Moc w impulsie, P	~1.6 W	~0.6 W
Napięcie progowe, V_{th}	~8 V	~9 V
Długość fali, λ	~ 4.6 μm	~ 4.7 μm

Opracowana została konstrukcja i wykonany prototyp głowicy laserowej z dedykowanym zasilaczem, przeznaczonej do pracy w warunkach polowych. Głowica laserowa została wszechstronnie przebadana pod kątem parametrów wytrzymałościowych i eksploatacyjnych.

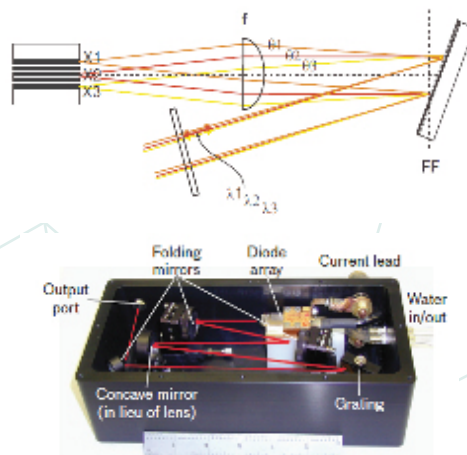


Rys.6 Urządzenie do wykrywania śladowych ilości par amoniaku (NH₃) wykonane w Instytucie Optoelektroniki WAT. Urządzenie wykorzystuje lasery kaskadowe opracowane i wytwarzane w Instytucie Technologii Elektronowej. Czutość ~ 70 ppb.

Laserowe systemy oślepiające

W oparciu o opracowaną w ITE technologię wytwarzane są matryce laserów kaskadowych przeznaczone do zastosowania w systemach oślepiających IRCOM (infra Red Countermeasures) mających na celu zabezpieczenie ruchomych obiektów wojskowych (samolotów, helikopterów, pojazdów bojowych) przed atakiem pocisków naprowadzanych na podczerwień. Działanie systemu IRCOM oparte będzie na wykorzystaniu efektu oślepienia naprowadzających pocisk na cel kamer podczerwonych promieniowaniem laserowym z obszaru średniej podczerwieni. Innowacyjność proponowanego rozwiązania polega na zastąpieniu w oświetlaczach dużych i ciężkich laserów OPO (Optical Parametric Oscillator) półprzewodnikowymi laserami QCL (Quantum Cascade Laser). Demonstrator urządzenia zbudowany będzie w pełni w oparciu o wytwarzane w kraju podzespoły (lasery kaskadowe średniej podczerwieni). Wytwarzane w Instytucie Technologii Elektronowej lasery kaskadowe emitujące w pasmie ~5 μm i ~9 μm posłużą jako punkt wyjścia do opracowania głowic laserowych dużej mocy wykorzystujących monolityczne matryce laserowe. Obecnie opracowywana jest technologia montażu modułów laserowych i formowania wiązki wykorzystująca niekoherentne sumowanie wiązek poszczególnych laserów (w terminologii anglojęzycznej tzw. wave-

length beam combining). Wynikiem będzie w pełni oryginalna technologia monolitycznych oświetlaczy laserowych wysokiej jasności gwarantująca niezawodność działania w warunkach polowych. Istotną nowością proponowanych rozwiązań jest wykorzystanie w konstruowanych głowicach laserów pracujących w średniej podczerwieni (pasmo ~4-5 μm , które jest wykorzystywane w najnowszej generacji systemów poszukiwania i naprowadzania na cel).



Rys.7 Schematyczny diagram układu niekoherentnego formowania wiązki

Niekoherentne sumowanie wiązek poszczególnych laserów matrycy (wavelength beam combining) łączy przestrzennie ich wiązki w pojedynczą, wysoko-intensywną wiązkę o zwielokrotnionej jasności (brightness). Układ optyczny, który realizuje powyższą funkcję przedstawiony jest na Rys.7. Każdy element matrycy laserowej tworzy w nim wnękę rezonansową składającą się z lasera pokrytego powłoką antyrefleksyjną, soczewki transformującej wiązkę, siatki dyfrakcyjnej i odsprzęgacza (outcoupler). Niekoherentne sumowanie wiązek pozwala przy zachowaniu jakości wiązki pojedynczego elementu matrycy na uzyskanie mocy wyjściowej równej nP , gdzie n jest liczbą elementów matrycy a P mocą pojedynczego lasera.

Opisany układ sumacyjny zostanie zastosowany w konstrukcji głowicy wykonywanej w projekcie. Ilość elementów w matrycy uzależniona będzie

od tego jaką maksymalna moc pojedynczego emitera uda się uzyskać i jaka będzie jego sprawność energetyczna. Przy założeniu mocy pojedynczego emitera $P = 1W$ i sprawności $\eta = 10\%$ szacujemy, że matryca złożona z 5 – 10 emiterów powinna być w stanie pracować w sposób quasi-ciągły w temperaturze do 320 K bez konieczności chłodzenia kriogenicznego (chłodziarka Peltiera + wymiennik ciepła w postaci radiatora z wentylatorem).

Demonstrator urządzenia zbudowany będzie w oparciu o wytwarzane w kraju podzespoły (lase-ry i detektory podczerwieni). Opracowana zostanie technologia montażu modułów laserowych i formowania wiązki oraz układy optycznego prowadzenia wiązki i skanowania pola wokół chronionego obiektu. Badania nad systemami oślepiającymi i zakłócającymi pracę kamer podczerwonych prowadzone są we współpracy z Instytutem Optoelektroniki WAT.

Podsumowanie

Badania i prace aplikacyjne nad laserami kaskadowymi prowadzone w ITE mają charakter nowatorski i dotyczą elementów, które są trudno dostępne w sprzedaży. W chwili obecnej jedyną możliwością pozyskania źródeł promieniowania (lasery kaskadowe) stosowanych w urządzeniach do wykrywania substancji gazowych jest ich zakup u producentów zagranicznych. W większości przypadków jest to szwajcarska firma Alpes Lasers. Jednakże zakup laserów na określoną długość fali, które nie znajdują się w aktualnym katalogu firmy, a które wymagają opracowania jest bardzo trudny – czasami wręcz niemożliwy. Jednocześnie cena jednostkowa takich laserów jest ciągle bardzo wysoka. W Polsce jesteśmy jedynym zespołem, który zajmuje się tematyką laserów kaskadowych. Lasery na pasmo $9.4 \mu m$, które opracowaliśmy w roku 2009 mają parametry porównywalne z przyrządami opracowanymi w laboratoriach f-my Thales, Francja. W przypadku laserów na inne długości fali prace są istotnie zawansowane i osiągamy średni poziom technologii, co już gwarantuje użyteczność praktyczną wytwarzanych laserów. Uważamy

również, że modyfikacje konstrukcji obszarów czynnych laserów, które proponujemy, pozwolą w wybranych przypadkach uzyskać poprawę parametrów laserów w stosunku do wartości publikowanych w literaturze. Ważnym elementem prac, decydującym o możliwości wykorzystania opracowanych laserów w układach do detekcji śladowych ilości zanieczyszczeń gazowych i par materiałów wybuchowych i w laserowych systemach oślepiających, są prace nad wykonaniem układów zasilania i sterowania laserów i wykonaniem kompletnych modułów laserowych. Moduły takie nie są dostępne na rynku. Efektem realizacji projektu będzie również opracowanie metodologii i odpowiednich narzędzi projektowania kwantowych laserów kaskadowych na zadaną długość fali, co stworzy podstawę do elastycznego reagowania na potrzeby rynku w tym zakresie. Lasery kaskadowe są nowym produktem, wymagającym specjalistycznego know how w dziedzinie nanotechnologii i fotoniki, i jako takie mogą stanowić idealne pole do działania dla małych firm ściśle związanych z ośrodkami badawczymi.

Literatura

- [1] Maciej Bugajski, Anna Wójcik-Jedlińska, *Kwantowe Lasery Kaskadowe, Elektronika*, nr 11, 2014, 10-16

6.9. Aparatura kontrolno-pomiarowa do badań kamer termowizyjnych, kamer VIS-NIR, kamer SWIR, dalmierzy laserowych oraz wielosensorowych systemów obserwacyjnych,

prof. dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski, INFRAMET

Streszczenie

Optoelektroniczne urządzenia obserwacyjne i laserowe są uznawane za krytycznie ważne wyposażenie nowoczesnych sił zbrojnych umożliwiające prowadzenie działań bojowych w nocy i w trudnych warunkach atmosferycznych. W tym artykule dokonano przeglądu sytuacji na światowym rynku aparatury metrologicznej do badań optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych i laserowych, oraz szczegółowo zaprezentowano aparaturę polskiej firmy Inframet.

Stowa kluczowe: kamery termowizyjne, kamery VIS-NIR, kamery SWIR, dalmierze laserowe, metrologia

Wstęp

Optoelektroniczne urządzenia obserwacyjne (kamery termowizyjne, kamery wizyjne VIS-NIR, kamery krótkofalowe SWIR) oraz urządzenia laserowe (dalmierze laserowe, wskaźniki celu, oświetlacze laserowe) stanowią obecnie podstawowe wyposażenie nowoczesnych armii świata umożliwiając prowadzenie działań bojowych w nocy i w trudnych warunkach atmosferycznych. Wyżej wymienione urządzenia optoelektroniczne są stosowane zarówno w postaci samodzielnych urządzeń jak i jako składniki dużych wielosensorowych systemów obserwacyjno-celowniczych. Optoelektroniczne urządzenia obserwacyjne i laserowe znalazły również szerokie pole zastosowań na rynku cywilnym.

Aparatura kontrolno-pomiarowa jest potrzebna na wszystkich etapach życia ww. urządzeń optoelektronicznych: badania prototypu, produkcja, końcowe badania producenta, badania wstępne odbiorcy, badania okresowe, badania na potrzeby napraw. Technologia produkcji aparatury pomiarowej do badań optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych i laserowych jest trudna i jest ona oferowana tylko przez kilka firm w świecie.

W tym artykule dokonano przeglądu sytuacji na światowym rynku aparatury metrologicznej do badań optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych i laserowych oraz szczegółowo zaprezentowano aparaturę polskiej firmy Inframet.

Sytuacja rynkowa firmy Inframet

Rynek aparatury kontrolno-pomiarowej do badań optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych i laserowych jest zdominowany przez pięć firm [1-5]:

1. CI- Systems, Izrael
2. Electro-Optical Industries, USA

3. HGH Systèmes Infrarouges, Francja
4. Inframet, Polska
5. SBIR, USA.

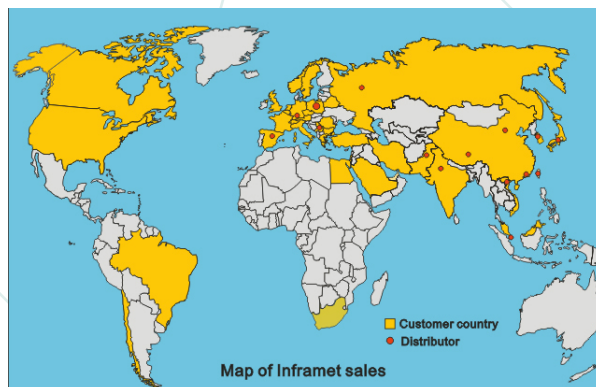
Inframet jest najmłodszą firmą w grupie ww. producentów aparatury kontrolno-pomiarowej do

badzeń optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych i laserowych. Inframet jest również jedyną firmą z Europy Wschodniej – z regionu negatywnie kojarzonego z zacofaniem technologicznym. Następnie firmy konkurencyjne mają rynki własne wielokrotnie większe od rynku krajowego.

Wyżej wymienione czynniki spowodowały poważne utrudnienia i znacznie spowolniły rozwój firmy Inframet. Niemniej jednak po okresie trzynastu lat od momentu rozpoczęcia działalności w 2002 roku Inframet jest znaną w świecie firmą high-tech o zasięgu globalnym (eksport do ponad 40 krajów świata, rozbudowana sieć marketingowa).

Pod względem komercyjnym (obroty, zatrudnienie) Inframet jest wciąż znacznie mniejszą firmą porównując do firm konkurencyjnych. Ze względu na brak dużego rynku krajowego w stosunku do rynków krajów firm konkurencyjnych oraz poprawiające się, ale wciąż negatywne postrzeganie kraju pochodzenia firmy ta sytuacja utrzyma się w przyszłości.

Natomiast pod względem technicznym Inframet jest uznawany za jednego z liderów w grupie producentów aparatury do badań urządzeń obserwacyjnych i laserowych. Firma wprowadziła na rynek



Rys. 1. Mapa sprzedaży Inframetu

długą serię zestawów kontrolno-pomiarowych do badań omawianych urządzeń, które zostaną omówione w dalszej części artykułu.

Wszyscy ww. producenci oferują zestawy kontrolno-pomiarowe o podobnej budowie oraz o dość zbliżonych możliwościach metrologicznych. Największe podobieństwa występują w przypadku sprzętu do badań kamer termowizyjnych, a największe różnice – w przypadku zestawów do badań dalmierzy laserowych oraz kamer VIS-NIR oraz kamer SWIR. Z tych względów prezentacja sprzętu firmy Inframet da również sporo informacji o zasadzie działania i możliwościach aparatury firm konkurencyjnych.

Podsumowanie

Aparatura kontrolno-pomiarowa oferowana przez Inframet do badań urządzeń obserwacyjnych może być podzielona na trzy grupy:

1. Zestawy serii DT do badań kamer termowizyjnych,
2. Zestawy serii TVT do badań kamer wizyjnych VIS-NIR,
3. Zestawy serii ST do badań kamer krótkofalowych SWIR.

Wszystkie trzy ww. zestawy kontrolno-pomiarowe wykorzystują identyczną zasadę działania. Działają one jako projektor wzorcowych obrazów testów referencyjnych (Rys.2). Badane kamery generują kopie projektowanych obrazów referencyjnych. Różnice pomiędzy obrazami idealnymi, a obrazami generowanymi przez badane kamery dają informację o jakości tych urządzeń obrazujących. Analiza jakości obrazów generowanych przez badane kamery jest prowadzona subiektywnie przez obserwatora lub pół-automatycznie z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania.

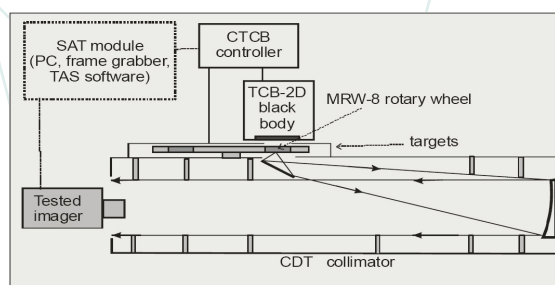
Różnice między zestawami DT, TVT i ST pole-

gają na różnych źródłach promieniowania, różnych zestawach testów oraz różnicach w oprogramowaniu.

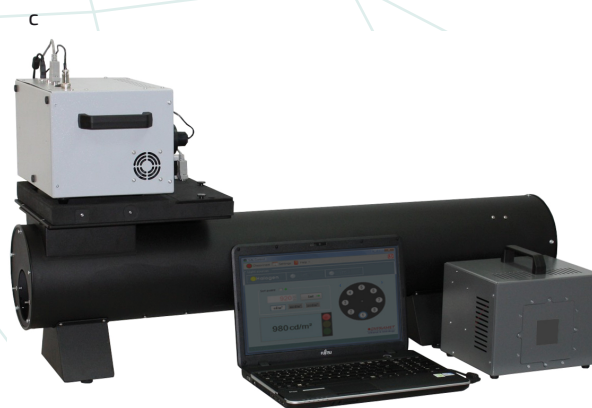
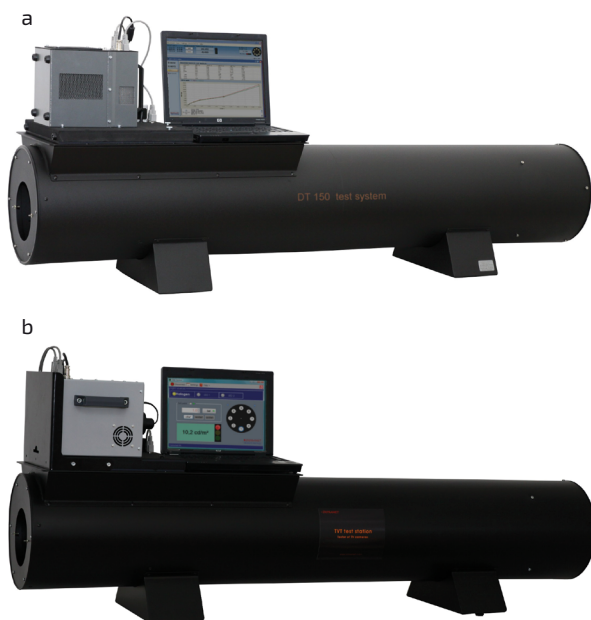
Zestaw DT do badań kamer termowizyjnych wykorzystuje precyzyjne niskotemperaturowe ciało czarne serii TCB jako źródło promieniowania. Regulacja mocy promieniowania odbywa się poprzez ultra precyzyjną (rozdzielczość regulacji 0.001°C) regulację temperatury promiennika ciała czarnego typu TCB-2D.

Zestaw TVT do badań kamer wizyjnych VIS-NIR wykorzystuje wielospektralne źródło promienienia DAL. Źródło to zapewnia symulację realnych warunków oświetlenia od bardzo ciemnej nocy w górach Afganistanu do ultra jasnego dnia na pustyni irackiej (dynamika regulacji intensywności światła na poziomie ponad 10 miliardów razy). Jednocześnie możliwa jest regulacja widma promieniowania emitowanego przez źródło DAL. Ta ostatnia cecha umożliwia symulowanie różnych obserwowanych scenarii: morze, pustynia, zielona roślinność.

Zestaw ST do badań kamer krótkofalowych SWIR wykorzystuje wielospektralne szerokopasmowe źródło promienienia SAL. To źródło to praktycznie szerokopasmowa wersja źródła DAL, która emituje promieniowanie w rozszerzonym zakresie widma aż do długości fali ok 2000nm.



Rys. 2. Schemat blokowy zestawów DT, TVT, ST do badań kamer



Rys. 3. Fotografie zestawów do badań kamer:
a)zestaw DT150,
b)zestaw TVT,
c)zestaw ST

Zestawy serii DT umożliwiają pomiar następujących parametrów kamer termowizyjnych: MRTD, MDTD, MTF, NETD, FPN, niejednorodność, SiTF, dystorsja, FOV, Auto MRTD, PVF, SRF, ATF, NPSD, szum 3D.

Zestawy serii TVT umożliwiają pomiar następujących parametrów kamer wizyjnych: rozdzielczość, MRC, MTF, dystorsja, FOV, czułość, SNR, NEI, FPN, niejednorodność, szum 3D, mar-

twe piksele, funkcja odpowiedzi, oraz wierność odwzorowania barw.

Zestawy serii ST umożliwiają pomiar następujących parametrów kamer krótkofalowych SWIR: rozdzielczość, MRC, MTF, dystorsja, FOV, czułość, SNR, NEI, FPN, niejednorodność, szum 3D Noise, martwe piksele, funkcja odpowiedzi, wykrywalność D^* , oraz dynamika.

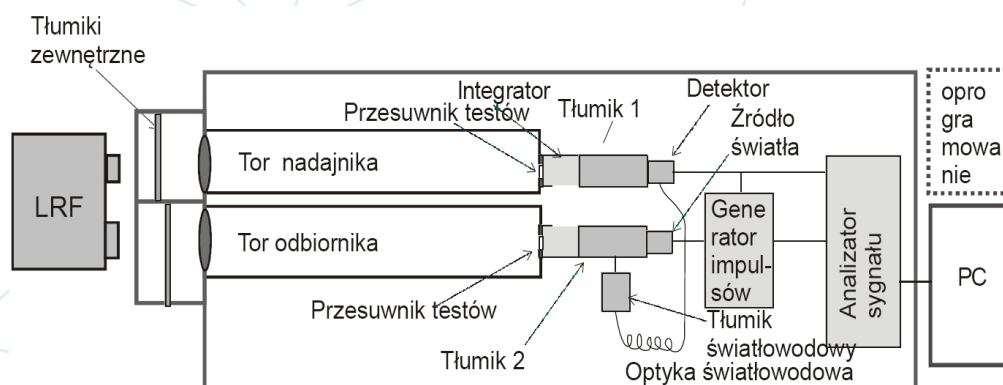
Aparatura do badań urządzeń laserowych

Stacja kontrolno-pomiarowa LTE to flagowy produkt Inframetu do badań urządzeń lasero-

wych, głównie dalmierzy laserowych (rys. 4-5).



Rys. 4. Fotografia stacji LTE do badań dalmierzy laserowych



Rys. 5. Schemat blokowy stacji LTE do badań dalmierzy laserowych

Stacja kontrolno-pomiarowa LTE może pracować w dwóch trybach:

- A) Tryb symulacji elektronicznej,
- B) Tryb symulacji światłowodowej.

Tryb A umożliwia symulację zmiennej odległości dalmierz-obiekt w przedziale od ok. 200 m do 100 km z regulowany tłumieniem toru oraz zmiennymi parametrami generowanych impulsów laserowych.

Tryb B umożliwia symulację stałej odległości dalmierz-obiekt o wartości ok. 1.2 km z regulowanym tłumieniem toru oraz z parametrami generowanych impulsów laserowych identycznymi jak parametry impulsów badanego dalmierza laserowego.

Stacja LTE umożliwia pomiar następujących parametrów dalmierzy laserowych: energia impulsu, moc szczytowa impulsu, czas trwania impulsu, częstotliwość repetycji, rozbieżność wiązki, dokładność pomiaru odległości

dla celu pojedynczego, dokładność pomiaru odległości dla celu wielokrotnego, minimalna rozróżnialna odległość oraz współczynnik ekstynkcji. Należy podkreślić fakt, że ten ostatni parametr jest bezpośrednio powiązany z maksymalnym zasięgiem skutecznego działania dalmierza laserowego.

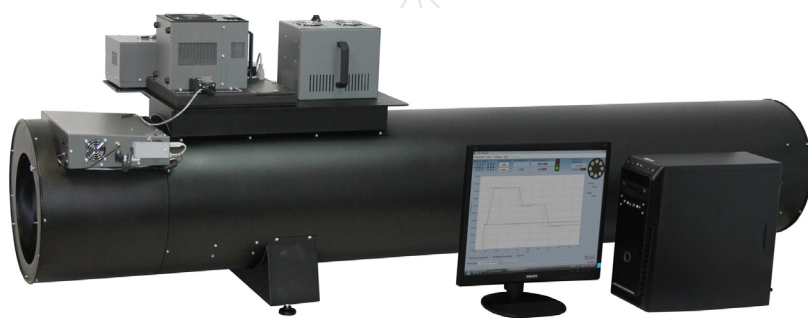
Budowa stacji LTE jest zoptymalizowana pod kątem badań dalmierzy laserowych z dwoma odseparowanymi torami (tor nadajnika i tor odbiornika). Dalmierze tego typu to co najmniej 99% dalmierzy oferowanych na rynku. Przykłady dalmierzy tego typu to popularne dalmierze typu Vector 21, Vector Nite, Vector 23, PLR10, PLR15, Moskito (Vectronix AG), czy TLS40, Molem, LP16, 15Hz ELRF (Airbus Defense). Przeprowadzone ostatnio eksperymenty wykazały, że stacja LTE może być również wykorzystana do badań dalmierzy laserowych z pojedynczym torem optycznym, gdzie tor nadajnika jest zintegrowany z torem odbiornika.

Aparatura do badań systemów wielosensorowych

Aparatura kontrolno-pomiarowa oferowana przez Inframet do badań wielosensorowych systemów obserwacyjnych (składających się z kamery termowizyjnej, kamery wizyjnej, dalmierza laserowego oraz innych opcjonalnych sensorów) może być podzielona na dwie główne grupy:

- A) Zestawy kontrolno-pomiarowe do prowadzenia rozszerzonych badań oraz justowania systemów wielosensorowych,
- B) Zestawy kontrolno-pomiarowe do justowania oraz uproszczonych badań systemów wielosensorowych.

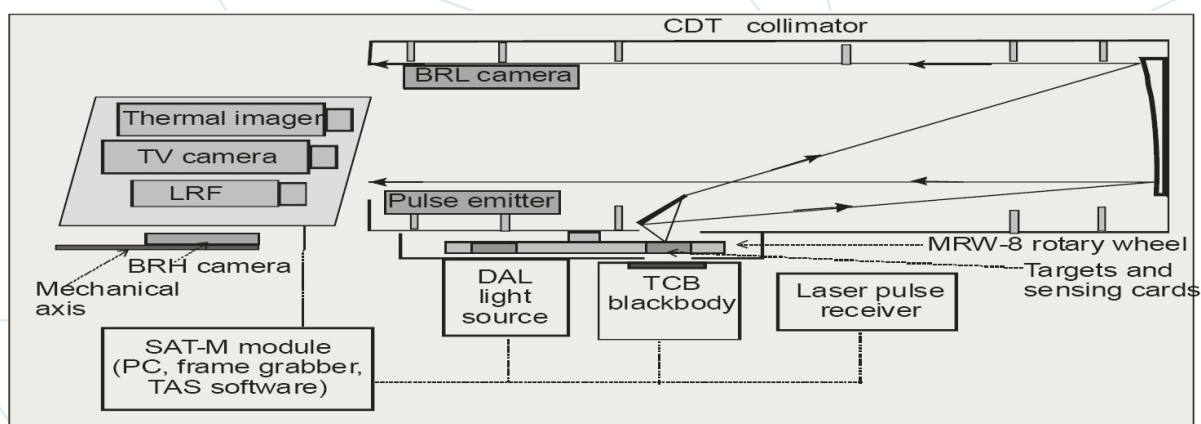
Zestawy kontrolno-pomiarowe serii MS należą do grupy A (Rys. 6). Z kolei zestawy kontrolno-pomiarowe serii JT oraz JAT należą do grupy B (Rys.7).



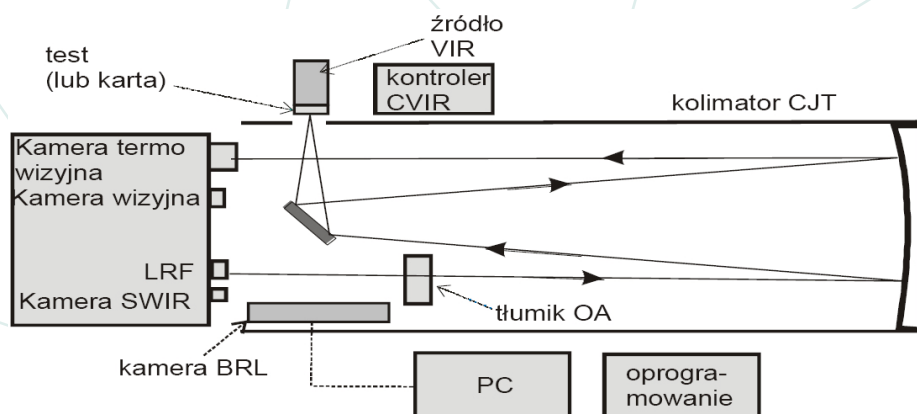
Rys. 6. Fotografia zestawu MS300 do rozszerzonych badań systemów wielosensorowych



Rys. 7. Fotografie zestawu JT300 oraz JAT200 do justowania systemów wielosensorowych



Rys. 8. Schemat blokowy zestawu MS300 badań systemów wielosensorowych



Rys. 9. Schemat blokowy zestawu JT300 do justowania systemów wielosensorowych

Wszystkie trzy omawiane zestawy kontrolno-pomiarowe (MS, JT, JAT) działają na zasadzie projektor obrazów (Rys. 8-9). Jednakże, zestaw MS wykorzystuje zaawansowane technologicznie, ultra precyzyjne źródła promieniowania (ciało czarne TCB-2D oraz kalibrowane źródła światła typu DAL, SAL, HAL) w sytuacji kiedy zestawy JT i JAT wykorzystują proste, nie kalibrowane źródła promieniowania.

Następnie zestaw MS jest zbudowany z wykorzystaniem drogich pozaosiowych kolimatorów zwierciadlanych serii CDT (brak centralnego przystaniania) w sytuacji kiedy zestawy JT i JAT wykorzystują prostsze i tańsze kolimatory współosiowe (występuje centralne przystanianie).

Wymienione różnice konstrukcyjne spowodowały w konsekwencji znaczne różnice w możliwościach metrologicznych pomiędzy zestawami serii MS, a zestawami serii JT/JAT.

Zestaw MS umożliwia pomiar długiej serii parametrów (kamera termowizyjna: MRTD, TOD, MTF, SiTF, NETD, FPN, niejednorodność, dystorsja, FOV, MDTD, PVF, SRF, ATF, NPSD, szum 3D, martwe piksele; kamera wizyjna : MRC, rozdzielczość, MTF, NEI, FPN, niejednorodność, funkcja odpowiedzi,

SNR, dystorsja, FOV; dalmierz laserowy: energia impulsu, moc szczytowa impulsu, czas trwania impulsu, częstotliwość repetycji, rozbieżność wiązki, dokładność pomiaru odległości (opcja); oświetlacz laserowy: moc, rozbieżność wiązki. Jednocześnie, zestaw MS umożliwia precyzyjny pomiar kątów pomiędzy osiami optycznymi kamery termowizyjnej, kamery wizyjnej, dalmierza laserowego oraz innych sensorów.

Możliwości metrologiczne zestawów serii JT/JAT są znacznie bardziej ograniczone. Zestawy te umożliwiają precyzyjny pomiar kątów pomiędzy osiami optycznymi kamery termowizyjnej, kamery wizyjnej, dalmierza laserowego, ogniskowanie na nieskończoność oraz pomiar rozdzielczości obu ww. kamer.

Te zmniejszone możliwości metrologiczne (akceptowalne w wielu zastosowaniach) są pewną wadą zestawów JT/JAT. Jednakże do zalet tych zestawów należy większa prostota obsługi, niższy koszt oraz zwiększona mobilność. Należy podkreślić, że przeprowadzone badania wykazały, iż zestaw JAT może być używany w warunkach lotniska do prowadzenia sprawdzeń lotniczych wielosensorowych głowic obserwacyjno-laserowych.

Wnioski

Inframet oferuje długą serię zestawów kontrolno-pomiarowych do badań optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych i laserowych. Oferowane zestawy kontrolno-pomiarowe umożliwiają prowadzenie badań wszystkich typów ww. urządzeń (kamery termowizyjne, kamery wizyjne VIS-NIR, kamery krótkofalowe SWIR, dalmierze

laserowe, oświetlacze laserowe) oferowanych na międzynarodowym rynku. Firma Inframet jest jednym ze światowych liderów na rynku metrologii optoelektronicznej. Szczegółowe informacje o możliwościach technicznych firmy zostały zaprezentowane na witrynie internetowej firmy www.inframet.com.

Literatura

- [1] <http://www.ci-systems.com>
- [2] <http://www.electro-optical.com/>
- [3] <http://www.hgh.fr/>
- [4] <http://inframet.com/>
- [5] <http://www.sbir.com>

6.10. Światłowodowy system pomiarowy w łączy transmisyjnym DWDM

Piotr Stępczak, Katedra Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki Politechniki Poznańskiej

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję światłowodowych układów pomiarowych wielkości nieelektrycznych w łączach transmisyjnych z gęstym zwielokrotnieniem falowym (DWDM) przy wykorzystaniu światłowodowych filtrów Bragga (FBG) jako czujników skupionych. Zaproponowano rozwiązanie ze źródłem szerokopasmowym oraz wielofalowym źródłem optycznych częstotliwości nośnych jako macierzy laserów. Przeprowadzono analizę wpływu zastosowanych źródeł optycznych

i rozwiązań układowych na możliwości adaptacyjne do istniejących łączy DWDM, a w szczególności pasywnych sieci optycznych (PON). Przedstawiono prototypowy układ pomiarowy z optycznym czujnikiem temperaturowym i tensometrycznym. Rozważono ograniczenia parametryczne w poszczególnych konfiguracjach układowych.

Słowa kluczowe: DWDM, wielofalowe źródło optycznych częstotliwości nośnych, FBG, PON.

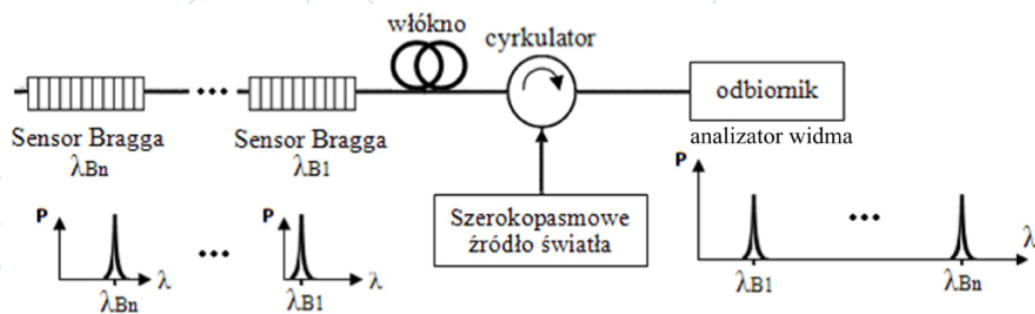
Wstęp

Światłowodowe systemy pomiarowe wyróżniają się ponadprzeciętną odpornością na zakłócenia i jednocześnie umożliwiają znacząco większy zasięg układów pomiarowych. W szczególności kiedy system jest całkowicie optyczny - wyposażony w czujniki optyczne - otwierają się nieograniczone możliwości pomiarowe. Największym zainteresowaniem charakteryzują się czujniki budowane na bazie światłowodowej siatki Bragga (Fiber Bragg Grid). Zasada ich działania opiera się na liniowym przestrojeniu długości fali Bragga na skutek zmiany mierzonej wartości fizycznej (m.in. temperatury i odkształcenia). Układy te posiadają wiele zalet, a do najważniejszych z nich należy nieczułość na zakłócenia występujące w torze transmisyjnym.

Czujniki FBG są zdecydowanie mniejsze i lżejsze niż czujniki elektryczne, a system zbudowany na ich podstawie posiada znacznie mniejszą wagę. Ma to szczególne znaczenie gdy sensorów jest kilkadziesiąt, a nawet kilkaset. Równie ważnym jest łatwość montażu systemu z czujnikami FBG. Do kluczowych

kryteriów należy możliwość wykorzystania pojedynczego standardowego włókna jednomodowego dla jednoczesnej obsługi wielu sensorów FBG połączonych kaskadowo, a sam system może pracować na pojedynczym włóknie z udostępnionym tylko jednym końcem. Przykładowy układ przedstawiono na rysunku 1. Zastosowanie wzmacniaczy optycznych istotnie zwiększa zasięg toru pomiarowego, który może być liczony w setkach kilometrów, a co umożliwia scentralizowanie punktu akwizycji danych.

Czujniki FBG są elementami całkowicie biernymi, co czyni je odpornymi na wszelkie zakłócenia elektrostatyczne czy radiowe i jednocześnie nie emitujące takowych zakłóceń, co wynika z zastosowania technologii światłowodowej [1]. Ponadto sensory FBG utrzymują swoje parametry niezmiennie w czasie, co eliminuje konieczność okresowej kalibracji. Dzięki temu mogą być one stosowane w systemach o długiej żywotności [2].



Rys. 1. Przykładowy schemat układu pomiarowego z sensorami FBG.

Właściwości FBG i układy pomiarowe

Długość fali Bragga (λ_B) odbijanej od siatki zależy od efektywnego współczynnika załamania (n_{ef}) oraz okresu siatki (Λ)

$$\lambda_B = 2n_{ef} \cdot \Lambda$$

Oba te parametry są czułe na temperaturę oraz odkształcenia siatki, co wykorzystano w systemach pomiarowych, jako tensometry i sensory temperatury. Zmiana długości fali Bragga spowodowana zmianą temperatury oraz naprężeń następuje według zależności [3]:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T$$

α_Λ - współczynnik rozszerzalności temperaturowej włókna,

α_n - współczynnik temperaturowo-optyczny,

ε - odkształcenie względne, $\varepsilon = \Delta L/L$ (po przyłożeniu siły w kierunku wzdłużnym do włókna optycznego o długości L następuje jego wydłużenie na skutek elastyczności materiału),

p_e - współczynnik odkształceniowo-optyczny.

Światłowodowa siatka Bragga do pomiaru odkształceń wytrzymałe maksymalnie wydłużenie ok. 1% ($\Delta L/L=0,01$), oraz ściśnięcie ok. 10% ($\Delta L/L=-0,1$). Oczywiście są to wartości przybliżone, zależne od wielu czynników, dlatego systemy pomiarowe nie wykorzystują pełnego zakresu odkształceń sprężystych. Typowo, dla siatki o $\lambda_B = 1550$ nm osiąga się pomiarową szerokość spektralną rzędu 10 nm (rozciąganie) i 100 nm (ściskanie). Różne laboratoria opracowały szereg mechanizmów do kontrolowania odkształceń siatki Bragga, aby zapewnić przetrwalność długości fali Bragga (m.in. za pomocą umieszczonego w sieci ceramicznego okucia).

Układ tensometryczny do pomiaru odkształceń składał się z równomiernej światłowodowej siatki Bragga, znajdującej się pomiędzy odcinkami światłowodu jednomodowego zakończonego złączami. FBG była zatopiona w syntetycznej płytce z polimetakrylanu metylu przytwierdzonej końcami do krańców układu. Umieszczony poniżej płytki krążek poruszał się ruchem kołowym osadzonym mimośrodowo na osi napędu, powodujący częściowe odkształcenie profilu. W ten sposób profil wraz z włóknem ulegał wydłużeniu, w zależności od aktualnego położenia krążka. Układ sterujący naprężeniem był odpowiedzialny za obrót krążka wokół osi obrotu. Pomiaru zostały wykonane przy zmianie położenia krążka dla 4 nastaw. Dla siatki tensometrycznej zastosowanej w doświadczeniu pracującej na długości fali Bragga $\lambda_B = 1552,54$ nm uzyskano czułość 1211 nm/ ε .

Czułość temperaturowa światłowodowej siatki Bragga jest bardzo mała, i w ogólnym przypadku mieści się ona w przedziale (10,5-11,5) pm/ $^{\circ}\text{C}$. Możliwe jest zwiększenie tej czułości, dzięki pokryciu włókna warstwą materiału, którego współczynnik rozszerzalności cieplnej jest wysoki. Najbardziej popularnym rozwiązaniem jest osadzanie czujnika w cienkiej warstwie folii aluminiowej, za pomocą ultradźwiękowych procesów spawalniczych. Współczynnik rozszerzalności aluminium wynosi $2,38 \cdot 10^{-5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Wówczas długość fali Bragga uzależniona jest od dwóch czynników: czułości siatki, oraz wydłużenia względnego metalu. Zależność długości fali Bragga oraz obciążenia folią aluminiową jest w przybliżeniu liniowa, a w skutek tego zabiegu, czułość elementu pomiarowego można podwyższyć do ok. 28 pm/ $^{\circ}\text{C}$ [4].

Układ temperaturowy, podobnie jak układ tensometryczny, zawiera sensor z równomierną siatką Bragga umieszczoną na radiatorze w aluminiowym

opakowaniu i układ sterujący. Do regulacji temperatury odcinka pomiarowego wykorzystano moduł Peltiera, którym chłodzono lub nagrzewano sensor. Dla siatki termicznej zastosowanej w doświadczeniu pracującej na długości fali Bragga $\lambda_B = 1548,78$ nm uzyskano czułość $19,16$ pm/°C.

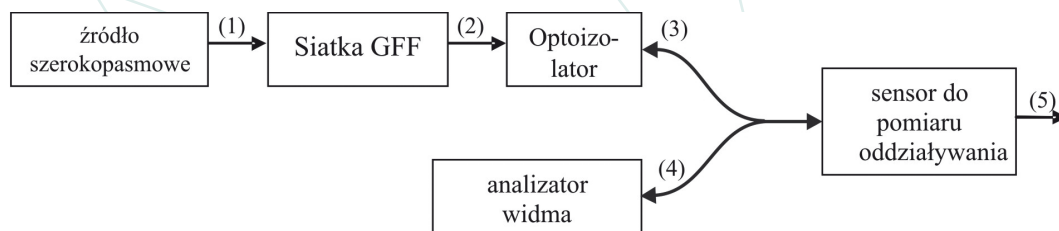
Do pomiaru charakterystyki odbiciowej siatki wykorzystano źródło szerokopasmowe sygnału ASE wzmacniacza erbowego z filtrem GFF wyrównującym charakterystykę wzmacniacza EDFA, natomiast do rejestracji wyników pomiarowych wykorzystano analizator widma optycznego Anritsu MS 9710B. Na rysunku 2 przedstawiono schemat układu pomiarowego, a na rysunku 3 uzyskane widma w poszczególnych miejscach układu (oznaczone cyframi).

Założono, że ewentualne fluktuacje temperatury otoczenia w czasie doświadczenia nie miały wpływu na pracę czujnika tensometrycznego (pomiaru zostały wykonane w temperaturze 23 °C; niezmienniej

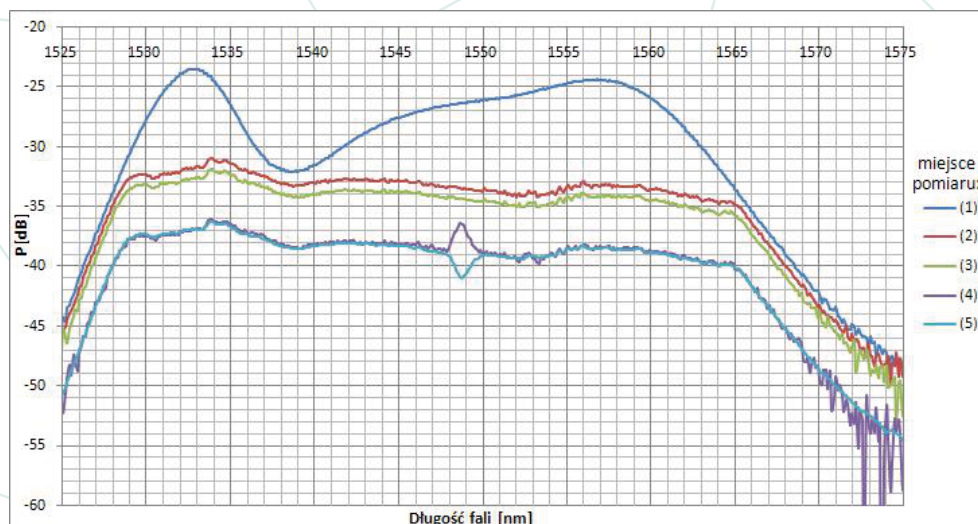
w czasie prowadzonego pomiaru). Czujnik termiczny na czas pomiarów został zamknięty w pojemniku termo-izolacyjnym.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe widma odbiowe sensora tensometrycznego przy czterech różnych nastaw położenia krążka. Analogiczne pomiary przeprowadzono dla sensora termicznego. Im większe naprężenie włókna, czy wartość temperatury, tym większe przesunięcie fali Bragga w kierunku dłuższych fal.

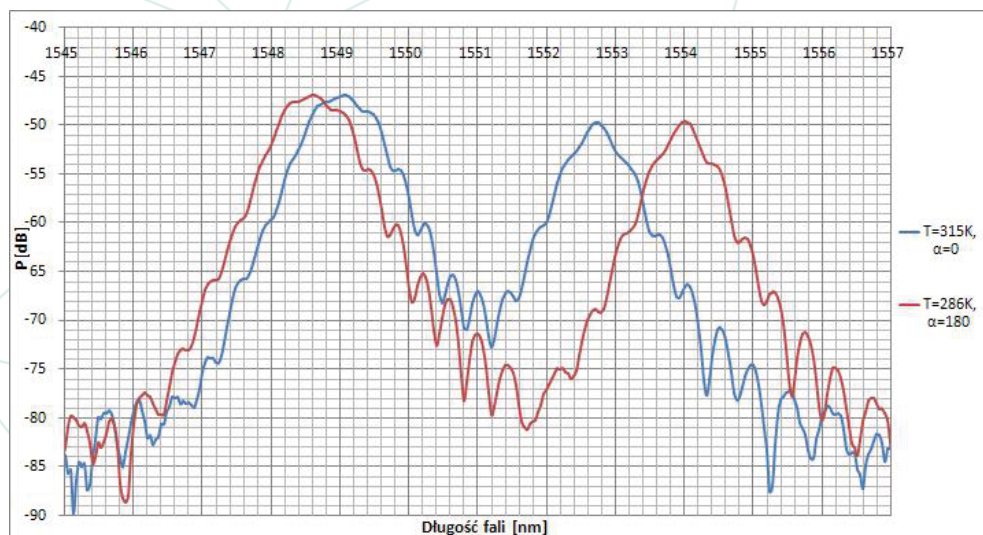
Pomiary wykazały, że charakterystyki odbiowe wykorzystanych siatek nie nachodzą na siebie w obrębie dokonywanych zmian temperatury (od 289 do 313 °K) i naprężenia (od 0 do 0,1074 %). Możliwe jest zatem wykonanie układu do jednoczesnego pomiaru temperatury i odkształcenia. Na rysunku 5. przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk obu siatek w funkcji długości fali dla skrajnych nastaw temperatury oraz odkształcenia.



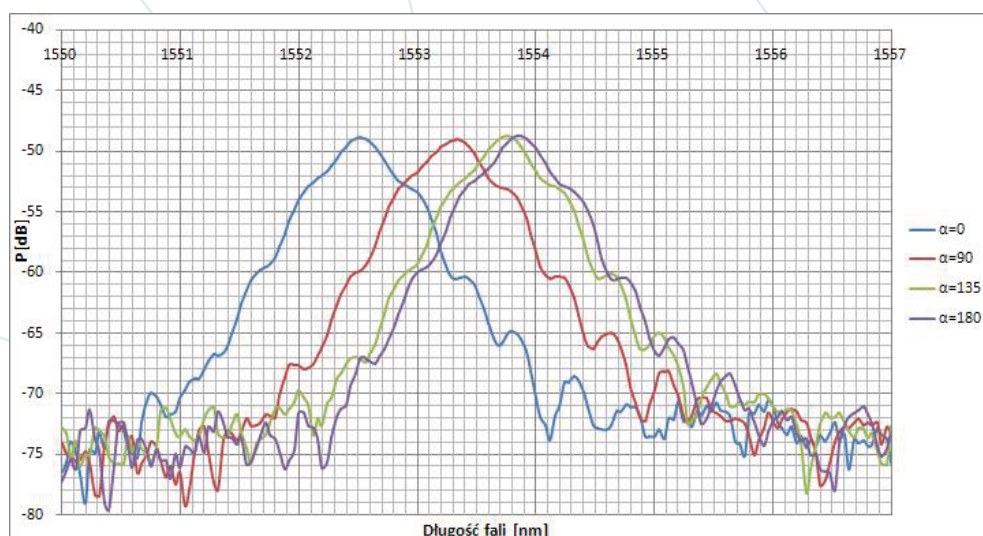
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiaru widma siatki tensometrycznej oraz termicznej.



Rys. 3. Moc w funkcji długości fali w wybranych punktach układu.



Rys. 5. Porównanie charakterystyk odbiciowych dla skrajnych przypadków parametrów pomiarowych.



Rys. 4. Charakterystyki odbiciowe układu pomiarowego z tensometryczną siatką Bragga dla różnych nastaw położenia krążka (0° - brak oddziaływania, 180° - oddziaływanie maksym.).

Światłowodowy system pomiarowy

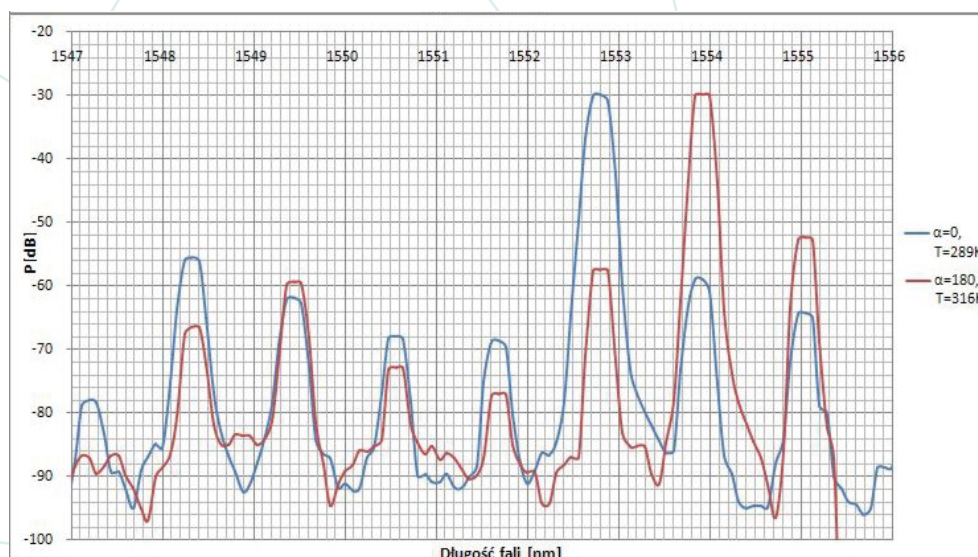
Wykorzystanie analizatora widma oraz szerokopasmowego źródła optycznego czyni układ pomiarowy prostym konstrukcyjnie lecz cechuje go silne ograniczenie dynamiki pomiarowej wynikające z właściwości analizatora, a zarazem bardzo kosztownym. Wzrost częstotliwości skanowania widma jest możliwy przez zastąpienie analizatora interogatorem, jednak są to urządzenia nadal kosztowne. Ponadto systemy z multipleksją czasową wymusza minimalne odstępy między sensorami większe od 1 metra [5].

Ciągła rejestracja każdej zmiany wielkości mierzonej, w dowolnie umieszczonym sensorze, nastąpi gdy każdy sensor będzie pobudzany wąskopas-

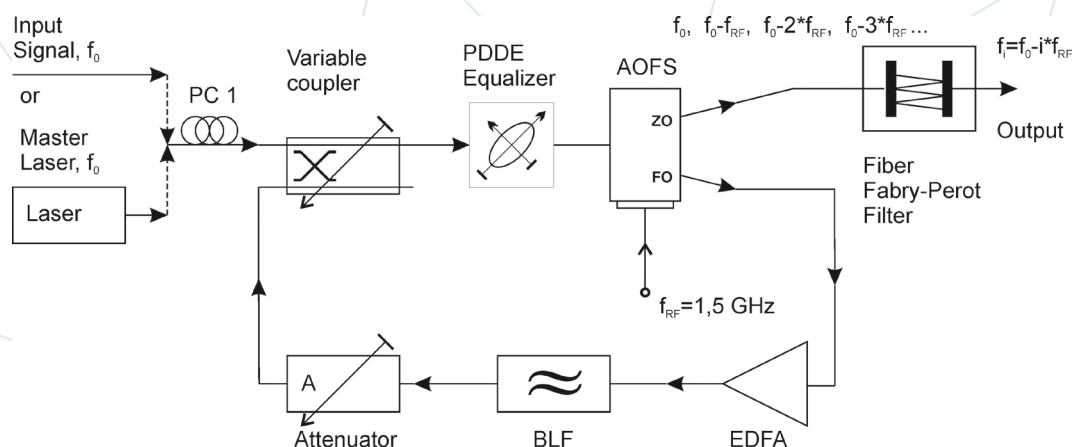
mowym źródłem optycznym (np. laser DFB), a same FBG, traktując jak przestrzajalny filtr optyczny wrażliwy na określony czynnik, będzie ulegał przestrojeniu dokonując zmiany mocy odbitej wiązki zależnej od zmian oddziaływania. Wykluczając straty wynikające z transmisji sygnału w torze optycznym procent mocy odbitej od siatki pomiarowej będzie zależny od czynnika oddziałującego na sensor wprost proporcjonalnie. Jednoznaczność odczytu zapewnia wykorzystanie jedynie części charakterystyki siatki, w której nie powtarza się równy procent odbicia mocy dla większej ilości długości fali niż jedna. W przypadku charakterystyki używanych sensorów był możliwy odpowiednio dla siatki temperaturowej przedział od 1547,96 do 1548,44 nm, natomiast dla

odkształceniowej od 1552,16 do 1552,54 nm. W rozwiązaniu tym występuje tyle odbiorników ile sensorów w kaskadzie umożliwiając dodanie nowych w dowolnym czasie, co czyni go zarazem elastycznym w konfiguracji, gwarantując jednocześnie najwyższą dynamikę zbierania wyników. Ponadto zastosowanie selektywnych źródeł światła pozwala budować system pomiarowy na istniejącej już sieci światłowodowej z gęstym zwielokrotnieniem falowym (DWDM), w których stosowanie szerokopasmowych źródeł optycznych jest znacznie ograniczona. Koncepcja ta pozwala również na umieszczanie czujników FBG w optycznych sieciach dostępowych PON, obecnie silnie rozwijanych przez licznych operatorów sieciowych. Niedogodnością omawianej metody jest konieczność utrzymywania wysokiej stabilności lasera pomiarowego. Ma to szczególne znaczenie w systemie złożonym z kaskady wielu czujników, w którym wymaganych jest szereg lase-

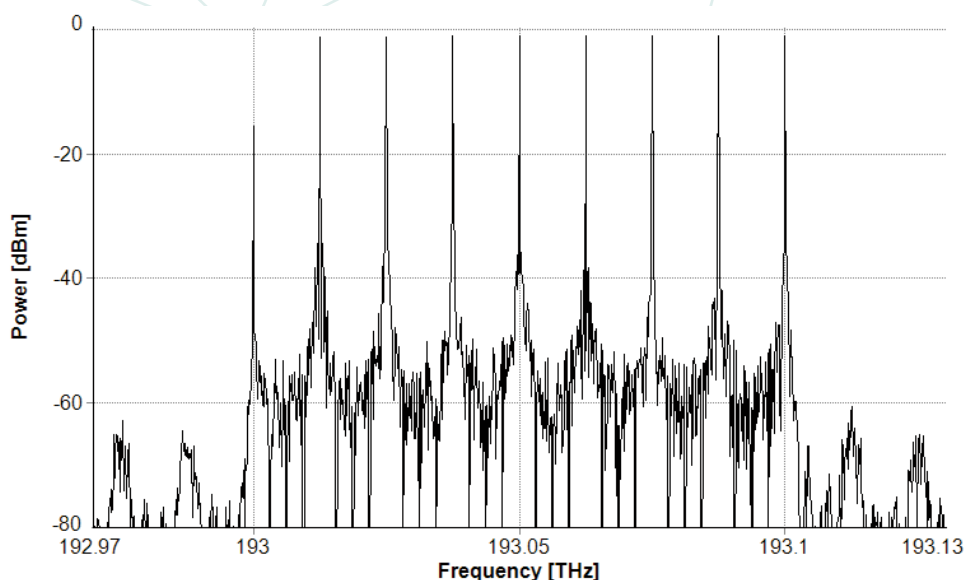
rów. Jednym ze sposobów zastąpienia grupy laserów jest zastosowanie lasera wielomodowego Fabry-Perot odpowiednio stabilizowanego, z którego wykorzystuje się mody do pomiaru w poszczególnych czujnikach. Na rysunku 6 przedstawiono wynik pomiaru kaskady sensorów pobudzonych wielomodowym laserem. Odstęp międzymodowy lasera FP narzuca szerokość pasma FBG i dopuszczalny zakres przestrajania. Ponadto spektrum lasera FP ma ograniczoną liczbę modów, których amplitudy nie są sobie równe. Znacznie lepszą propozycją jest wielofalowe źródło częstotliwości nośnych, będące generatorem powielającym widmo lasera źródłowego w równych i wysoce stabilnych odstępach spektralnych [6]. Na rysunku 7 przedstawiono schemat wielofalowego źródła, a na rysunku 8 przedstawiono przykładowe widmo 8 składowych wygenerowanych w przedziale 0,8nm stanowiącego jeden z kanałów w systemie DWDM.



Rys.6. Widmo modów lasera FP odbitych przez kaskadę sensorów w skrajnych nastawach.



Rys.7. Schemat blokowy źródła wielofalowego o wysoce stabilnych odstępach.



Rys.8. Widmo wyjściowe generator wielofalowego z 8 optycznymi nośnymi, odstęp międzykanałowy: 12.5 GHz.

Wnioski

Układy z filtrami Bragga wykorzystywanymi do pomiarów wielkości fizycznych za pomocą wiązki optycznej cechują się wyjątkową rozdzielczością pomiarową i odpornością na zakłócenia przy jednoczesnym osiąganiu znacznie większych zasięgów niż inne systemy pomiarowe. Ponadto umieszczone w kaskadzie na jednym włóknie światłowodowym, czy też w sieci dostępowej, pozwalają na pomiar

wielu parametrów, zarówno skupionych jak i rozłożonych, realizując je przy wykorzystaniu tylko jednego końca toru światłowodowego. Analiza konfiguracji układowych pozwoliła sformułować kryteria zastąpienia, typowo stosowanych, szerokopasmowych źródeł optycznych źródłem wielofalowym oraz kaskady układów odbiorczych, realizujących pomiar wielkości.

Literatura

- [1] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings, Optics and Photonics*, 1999
- [2] K. Matysa, *Innowacyjne czujniki do pomiaru odkształceń, przemieszczeń, ciśnienia i temperatury*, Laboratorium 9/2009, Sprzęt i aparatura laboratoryjna
- [3] Z. Kaczmarek, *Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe*, Agenda Wydawnicza PAK, grudzień 2006, Warszawa
- [4] B. Ziętek, *Optoelektronika*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika 2005, Toruń
- [5] *Optical Fiber Sensors Guide, Fundamentals & Applications*, Micron Optics, <http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/Micron%20Optics%20Optical%20Sensing%20Guide.pdf>, 2013
- [6] J. Lamperski, A. Dobrogowski, P. Stepczak: "Multifrequency Source for UDWDW Fiber Systems", OECC/ACOFT, Sydney, Australia, 2008, P65

6.11. Łączność optyczna jako technologia bezprzewodowej wymiany danych. Sposoby implementacji i ograniczenia,

Rafał Słomski, Edward Sędek, Grzegorz Strzeczysz, Damian Jamioł, PIT-RADWAR S.A.

Streszczenie

Artykuł przedstawia doświadczenia oraz analizy zebrane podczas implementacji optycznej, bezprzewodowej technologii transmisji danych. Od pewnego czasu oprócz bardzo popularnych połączeń kablowych i bezprzewodowych (radiowych) wykorzystuje się coraz częściej łącza optyczne wykorzystujące zakres IR. Przedstawiono wyniki pomiarów transferu prędkości danych układu łączności optycznej opartego na zestawie pracującym

z długością fali z zakresu $800 \div 900$ [nm]. W artykule przeanalizowano możliwości wykorzystania rozwiązań optycznych zarówno na rynku cywilnym jak i w obszarze systemów dowodzenia i zarządzania kryzysowego.

Słowa kluczowe: łączność optyczna, FSO (Free Space Optics), sieci optyczne

Wstęp

Zadaniem systemu telekomunikacyjnego jest przystanie informacji pomiędzy jego użytkownikami. Danych może być bardzo dużo, często nie są to tylko rozmowy foniczne ale relatywnie duże pliki. Dostęp światłowodowy zaczyna być standardem przy budowie nowych inwestycji. Jednak nie wszędzie jest możliwe stosowanie takiego rozwiązania. Obecnie wykorzystywane jest kilka pasm promieniowania podczerwonego zapewniającego realizowanie bezprzewodowych połączeń w relacji punkt $\leftrightarrow$ punkt. Rozważana technologia nosi nazwę Free Space Optics (FSO) i oprócz swych zalet (m.in. odporności na zakłócenia elektromag-

netyczne) posiada główną wadę. Jest zależna od warunków atmosferycznych, które w przypadku niekorzystnych mogą uniemożliwić nawiązanie połączenia. W celu zmniejszenia ryzyka takiego zjawiska stosuje się układy hybrydowe, w skład których oprócz zestawu optycznego wchodzi również element łączności radiowej. W efekcie czego w przypadku zerwania połączenia optycznego (szerokopasmowego) utrzymywana jest komunikacja radiowa. Dużą zaletą FSO jest brak konieczności zgody na użytkowanie od odpowiednich instytucji państwowych, co na pewno wpływa na zwiększenie popularności tego typu rozwiązań.

Definicja łączności optycznej

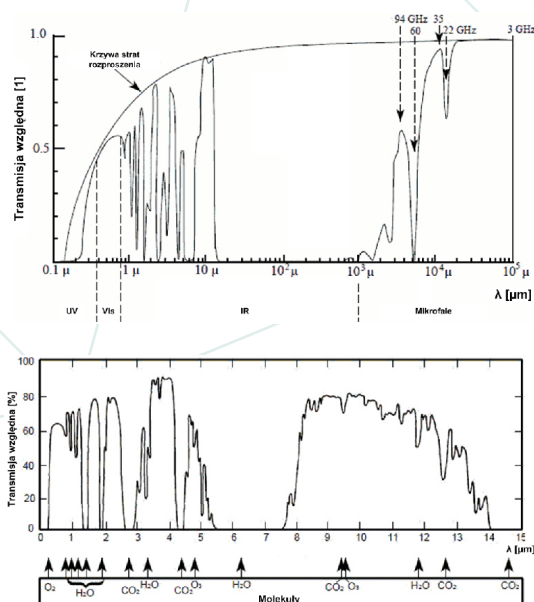
W literaturze związanej z tym obszarem wiedzy bardzo często definiuje się FSO jako technologię bezprzewodowej komunikacji optycznej, która opiera się na emisji światła w wolnej przestrzeni w celu przesyłania informacji pomiędzy dwoma odległymi od siebie punktami. W dosłownym

tłumaczeniu przytoczonego skrótu występuje zwrot wolna przestrzeń. Jednak to pojęcie w odniesieniu do łączy optycznych działających w warunkach atmosfery ziemskiej jest traktowane na zbyt liberalnie, lepiej je nazwać optycznymi liniami w otwartej przestrzeni [1].

Ograniczenia stosowania łączności optycznej

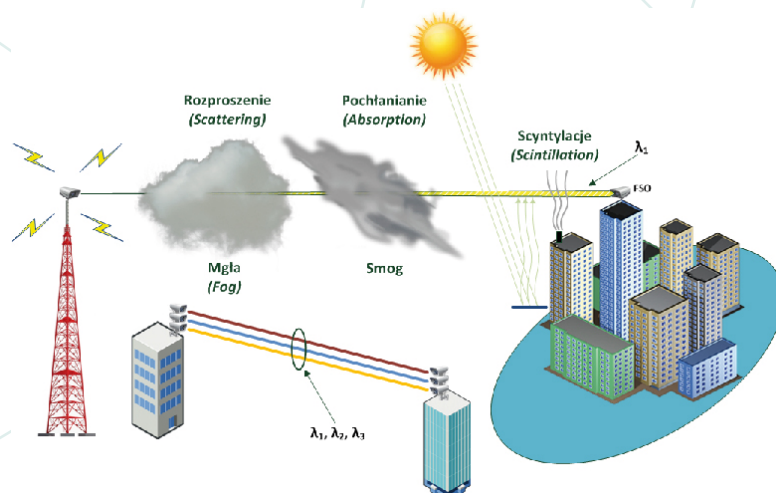
Tłumienie wiązki optycznej przez atmosferę jest wywołane przez cząsteczki gazów i par, tworzące atmosferę oraz przez cząstki zawieszone w atmosferze – aerozole. Nawet czyste powietrze jest w stanie silnie absorbować promieniowanie. Dotyczy to szczególnie promieniowania z zakresu podczerwieni. Propagacja fal optycznych ogranicza się do zasięgu bezpośredniej widoczności, gdyż nie ulegają praktycznie ugięciom, a odbicie od większości powierzchni odbywa się ze stratami. Absorpcja promieniowania ma charakter selektywny, związany z pobudzaniem określonych cząsteczek, tlenu, azotu, dwutlenku węgla. Tak silnych skutków nie obserwuje się w zakresie promieniowania widzialnego, a także w zakresie fal radiowych i mikrofal (poniżej 30 GHz). W miarę rozrzedzania powietrza absorpcja słabnie, przy transmisji między satelitami (na wysokościach powyżej 200 km), można ją pominąć. Z poniższych wykresów wynika, że zjawiska absorpcji i rozproszenia promieniowania optycznego rozchodzącego się w wolnej przestrzeni mogą być wywołane m.in. opadami atmosferycznymi, mgłą, zanieczyszczeniami oraz ruchami powietrza. Czynniki te powodują osłabienie sygnału docierającego do odbiornika i prowadzą do zwiększenia elementowej stopu błędów BER (ang. Bit Error Ratio). Zatem należy szukać takich okien dla promieniowania optycznego, w których można przeprowadzić efektywną transmisję. Zjawiska tłumienia w atmosferze są dość skomplikowane z uwagi na ich mnogość i występowanie tzw. czynnika przypadkowego, czyli np. zbyt mocne świecenie słońca, błyski światła, wiatr powodujący ruchy budynku czy fruwające ptaki na kierunku emisji wiązki optycznej. Tłumienie w atmosferze określa tzw. współczynnik ekstynkcji [1]:

$$\tau = e^{-\alpha R} = e^{-(\alpha_a + \alpha_r)} \quad (1)$$



Rys. 1. Transmisja względna atmosfery na odległości 1 mili morskiej

którego składowe są odpowiedzialne za pochłanianie, czyli absorpcję promieniowania oraz rozpraszanie. Krzywe, które zobrazowują pochłanianie fal przez cząsteczki zawarte w atmosferze zostały zobrazowane na Rys. 1. [2]. Rozproszenie jest związane z wielkością cząstki względem długości fali. Wyróżnia się trzy podstawowe jego rodzaje, które zostały przywołane w pozycji [1]: Rayleigha, Mie i geometryczne. Wszystkie podane powyżej czynniki mogą występować jednocześnie, co dowodzi jak skomplikowany jest opis analityczny tłumienia wiązki w atmosferze. Poniżej zamieszczono rysunek, na którym przedstawiono trzy podstawowe źródła zmniejszania energii wiązki świetlnej: rozproszenie, absorpcja i scyntylacja. Przykłady te pokazują, że zasadne są tryby pracy modułów FSO z wieloma długościami fali, co w efekcie powoduje zwiększenie jakości i pewności transmisji.



Rys. 2. Czynniki ograniczające transmisję wiązki optycznej w atmosferze

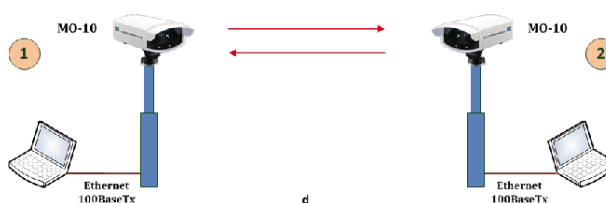
Badania łącza optycznego

Testy łącza optycznego zostały zrealizowane w ramach tematu: Optoelektroniczny, wielowidmowy system wspomagający lądowanie samolotów SWL-20. Z uwagi na specyfikę działania systemu (dedykowanego głównie do Baz Lotniczych) zaistniała w nim konieczność szybkiego nawiązania szerokopasmowej łączności pomiędzy elementami. Efektem tego wymagania była implementacja FSO. Do sprawdzeń wykorzystano zestaw transmisji optycznej WBXT100 WAVEBRIDGE L.E.D. Wireless Transceiver LONG RANGE 100 Mb/s, RJ-45 2000 m (prod. TELEOPTICS) oznaczony jako MO-10 na poniższym rysunku.

Do każdego z modułów optycznych dołączono komputer i przygotowaną konfiguracją testową. Badanie połączenia odbywało się na dwa sposoby:

1. Sprawdzenie maksymalnej przepustowości zestawionego łącza transmisyjnego. Do pomiaru transferu danych użyto programu *IPerf*, działającego na zasadzie klient-server, z możliwością pomiaru i odczytu przepływności transmisji.
2. Obserwacja jakości i płynności zobrazowania filmu w rozdzielczości HD, który został uruchomiony na zdalnym komputerze.

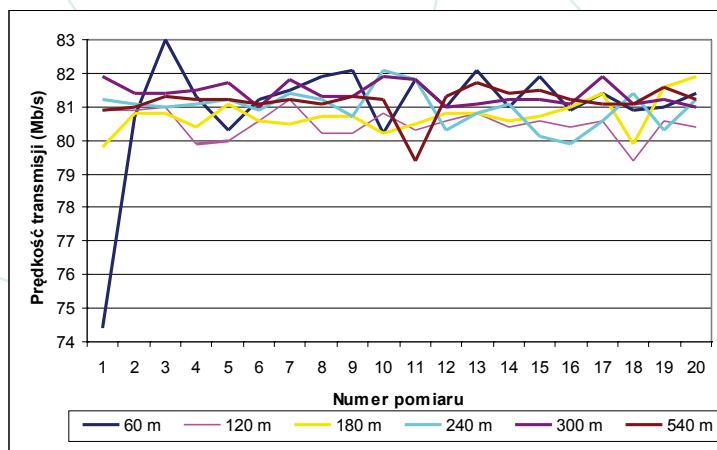
Testy odbyły się na terenie oddziału PIT-RADWAR w Kobyłce. Sprawdzenia wykonano w następujących warunkach: wilgotność powietrza 60%, temperatura powietrza -3°C , zachmurzenie umiarkowane). Badania wykonano na dostępnym odcinku terenowym o długości ~ 540 m. W efekcie przeprowadzonych sprawdzeń uzyskano wyniki, które przedstawiono na Rys. 5. Badanie modułów optycznych rozpoczęło od wyznaczenia minimalnej odległości pozwalającej na prawidłową ich pracę. Testy wykazały, że jest to ~ 60 m. W przypadku użycia urządzeń na mniejszym dystansie, odbiorniki wchodzą w stan nasycenia, co uniemożliwia ich poprawne działanie.



Rys. 3. Schemat badawczy zestawu łączności optycznej



Rys. 4. Wygląd modułu FSO



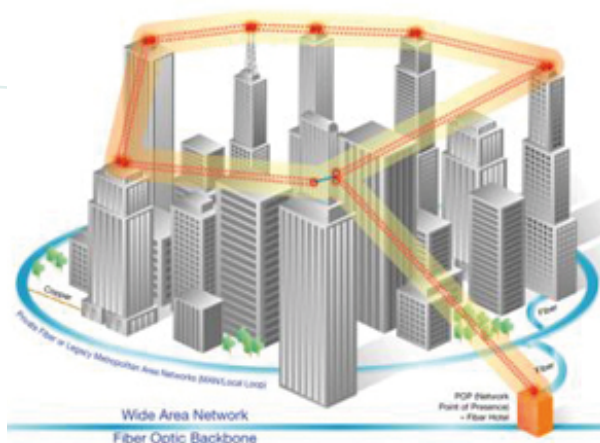
Rys. 5. Zmierzone przepływności transmisji w zależności od odległości pomiędzy MO

Łączność optyczna w praktyce

Łączność z wykorzystaniem fali optycznej znajduje coraz więcej możliwości zastosowania. Choć jednostkowy koszt zakupu i instalacji zestawu jest obecnie relatywnie wysoki w stosunku do np. połączeń radiowych, znaleźć można szereg przykładów wykorzystywania FSO zarówno w systemach komercyjnych jak specjalnego przeznaczenia [5]. Łączność optyczna charakteryzuje się następującymi cechami:

- szerokie wykorzystanie w obszarach metropolitalnych, gdzie istnieją problemy związane z zestawianiem połączeń radiowych i kablowych;
- wygodne rozwiązanie w przypadku konieczności szerokopasmowego połączenia;
- odporność na oddziaływanie i zakłócenia elektromagnetyczne, którego źródłem są np. linie wysokiego napięcia, trakcja kolejowa czy nadajniki telekomunikacyjne;
- brak opłat za użytkowanie pasm częstotliwości,
- brak odporności na zjawiska atmosferyczne, które powodują znaczne osłabienie/tłumienie fali optycznej;
- konieczność wzajemnego i precyzyjnego justowania/orientowania modułów optycznych.

W centrach dużych miast, gdzie istnieje gęsta zabudowa, niezmiernie trudne, bez dodatkowych często bardzo kosztownych inwestycji, jest zapewnienie połączenia kablowego pomiędzy np. dwoma budynkami. W oparciu o FSO istnieje możliwość budowy metropolitarnej sieci szkieletowej (ang. core network), która łączy ze sobą wiele punktów/budynków. Artystyczna wizja takiej idei została pokazana poniżej.



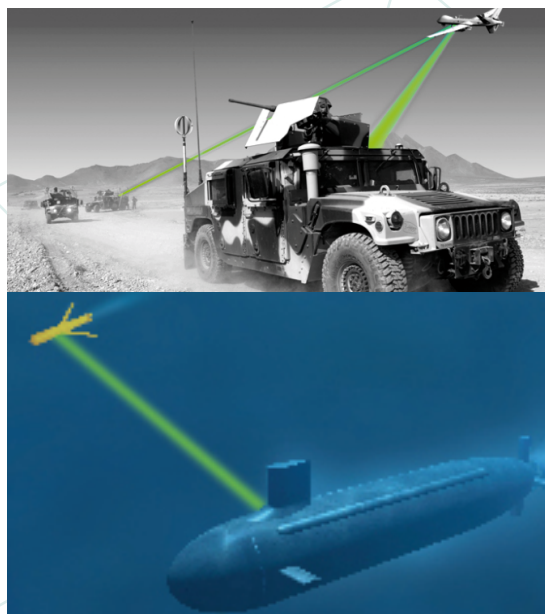
Rys. 6. Wizja optycznej sieci metropolitarnej na bazie FSO

Free Space Optics może znaleźć zastosowanie również w komunikacji obiektów typu UAV (ang. Unmanned Aerial Vehicle) z wozami bojowymi, które mogą otrzymywać np. obraz (wysokiej rozdzielczości)

z obszaru, w którym się znajdują [3]. Zatem system komunikacji optycznej można traktować jako jeden ze sposobów wymiany danych w BMS (ang. Battle-field Management System).



Rys. 7. Przykład zastosowania FSO



Rys. 8. Futurystyczna wizja wykorzystania FSO

Źródłem emitującym sygnał w rozwiązaniach typu FSO może być zarówno dioda jak i laser. Jednym z bardzo zaawansowanych rozwiązań laserowych jest układ zaprojektowany przez Cassidian (pion wojskowy EADS). Zestaw transmisyjny umożliwił połączenie pomiędzy stacją bazową TOGS (ang. Transportable Optical Groundstation), znajdująca się na powierzchni ziemi, a myśliwcem Tornado

(lejącym z prędkością bliską prędkości dźwięku) odległym o około 60 km (Rys. 9). Przez mniej niż minutę utrzymać przepustowość na poziomie 1 Gb/s. Rozwiązanie to umożliwia transmisję dużej ilości danych z obiektu, który porusza się relatywnie



nie szybko, do stacji znajdującej się na powierzchni ziemi. Niewątpliwą wadą tego typu rozwiązania są kłopoty z związane z orientacją układów nadawczo-odbiorczych w taki sposób, aby możliwa była transmisja danych.



Rys. 9. Stacja TOGS (zdjęcie lewe), podwieszony do myśliwca Tornado układ umożliwiający komunikację optyczną ze stacją bazowaną TOGS (zdjęcie prawe)

Wnioski

Technologia FSO znajduje obecnie szerokie zastosowanie w obszarach metropolitalnych, gdzie pojawiają się problemy związane z zapewnieniem odpowiedniej infrastruktury przewodowej lub radiowej. Niewątpliwie FSO może być stosowane jako rozwiązanie tzw. ostatniej mili (zarówno jako stała lub tymczasowa implementacja).

Dobór odpowiedniego zakresu widma promieniowania może ograniczyć wpływ tłumienności atmosfery na zasięg, tym niemniej zjawiska atmosferyczne należy uwzględnić w projektowaniu łącza optycznego.

Łącza optyczne są budowane w oparciu o bardzo wąską wiązkę optyczną lub z wykorzystaniem nadajnika z wiązką bardzo szeroką, wręcz sferyczną. Ten ostatni sposób znakomicie ułatwi wzajemne „widzenie się” układów nadawczo-odbiorczych, natomiast jest nieefektywny energetycznie. Ponadto wiązka może być w łatwy sposób odebrana przez nieuprawnionych użytkowników, co zasadniczo ogranicza możliwości zastosowania takiego rozwiązania w systemach specjalnego przeznaczenia [4]. Łączność oparta na generowaniu bardzo wąskiej wiązki świetlnej jest efektywna energetycznie i dość odporna na nieuprawnione przechwycenia. Problemem jest precyzja ustawienia osi optycznych nadajnika i odbiornika, co ogranicza możli-



Rys. 10. Przykłady rozwiązań hybrydowych FSO/RF

wość zastosowania takiego rodzaju komunikacji w obiektach mobilnych.

Technologia FSO, mimo swoich zalet (np. szerokie pasmo transmisji) jest podatna na warunki atmosferyczne, dlatego należy stosować drugie łącze (radiowe), które powinno być redundantnym medium transmisyjnym. Wówczas w przypadku np. gęstych opadów śniegu transmisja z wykorzystaniem FSO będzie utrudniona, w skrajnych przypadkach niemożliwa, natomiast dzięki rezerwowemu traktowi RF zostanie zapewniona (przynajmniej w pewnym zakresie). W związku z powyższym, często zastosowanie znajdują hybrydowe układy telekomunikacyjne FSO/RF, których przykłady implementacji praktycznych zaprezentowano na Rys. 10.

Literatura

- [1] Holejko K.: *Łączą optyczne w otwartej przestrzeni. Przegląd Telekomunikacyjny*, 2005, nr 4, s. 118-124.
- [2] *Electronic warfare and radar systems engineering handbook* (Rev 2). Naval air system command. Avionics Departament. Washington, 1999, p. 7-1.9 – 7-1.10.
- [3] Majumdar Arun K.: *Advanced Free Space Optics (FSO). A Systems Approach*. Springer 2015.
- [4] Słomski R. Sędek E.: *Telekomunikacja optyczna jako perspektywiczna metoda wymiany danych w systemach specjalnego przeznaczenia. V Konferencję Łączności „Ewolucja wojskowych systemów teleinformatycznych oraz Lessons Learned w świetle misji pokojowych i stabilizacyjnych”*. Sieradz, 23.04.2014 r.
- [5] Romaniuk Ryszard S.: *Zaawansowane Systemy Elektroniczne i Fotoniczne*, Wilga 2014. Część 1 – Fotonika. Elektronika 11/2014.



6.12. Optyka dyfrakcyjna i detekcja UV.

-Przykład zastosowania w analizatorze widma pożarów.

prof. nzw. dr hab. inż. Lech Dobrzański, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych

Opracowano szereg detektorów na zakres UV na bazie heterostruktury GaN/AlGaIn. Zakresy czułości widmowej detektorów w postaci diody Schottky'ego (visible, solar blind) pokrywają pasma UVA, UVB i UVC.

Natomiast unikalne detektory w postaci diod p-i-n, niedostępne na wolnym rynku mają pasmową charakterystykę czułości. Kontrolujemy położenie środka pasma i jego szerokość. Ta unikalna cecha umożliwia analizę widma emisyjnego specyficznych molekuł. Ponadto opracowano bardzo szybkie detektory typu MSM (metal-semiconductor-metal).

Institute of Electronic Materials Technology
133 Wólczyńska str., 01-919 Warsaw, POLAND

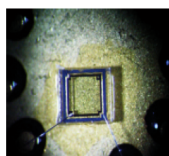
Tel.: (+48 22) 835 30 41, Fax/tel.: (+48 22) 834 90 03, Fax: (+48 22) 864 54 96
e-mail: itme@itme.edu.pl



DETEKTORY UV z GaN/AlGaIn

Fotodetektory są wykonywane z azotku galu półprzewodnika, którego krawędź absorpcji światła wynosi 365 nm. Bez stosowania kosztownych filtrów uzyskuje się dużą czułość tylko dla ultrafioletu. Czułość dla światła widzialnego jest o kilka rzędów wielkości mniejsza. Ta unikalna cecha umożliwia wiele zastosowań przyrządu.

Zastosowania:

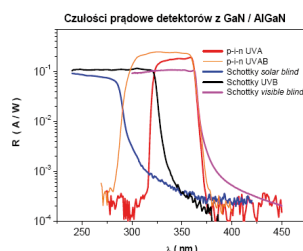


- analiza płomienia – kontrola procesu spalania
- analiza promieniowania nieba
- wykrywanie dziury ozonowej
- monitoring skażenia środowiska
- wykrywanie wybuchów
- wykrywanie ognia strzeleckiego
- naprowadzanie rakiet na cel
- kontrola źródeł promieniowania UV – kontrola sterylizacji
- zastosowania naukowe

Parametry techniczne:

Typ:	Zakres widmowy ¹⁾ [nm]	Czułość ²⁾ [A/W]	Kontrast ³⁾	Prąd ciemny ⁴⁾ [nA]
Dioda p-i-n UVA	320-365	0.15($\lambda_g=350\text{nm}$)	$>10^3$	<1
Dioda p-i-n UVAB	290-365	0.15($\lambda_g=310\text{nm}$)	$>10^3$	<1
Dioda Schottky UVB	200-320	0.1($\lambda_g=285\text{nm}$)	$>10^3$	<10
Dioda Schottky UVC (solar blind)	200-280	0.1($\lambda_g=275\text{nm}$)	$>10^2$	<10
Dioda Schottky UVA (visible blind)	200-365	0.1($\lambda_g=350\text{nm}$)	$>10^3$	<10

- 1) Patrz charakterystyki poniżej.
 - 2) Czułość fotoelektryczna przy $U=0\text{V}$ i λ_g
 - 3) Kontrast pomiędzy UV i światłem widzialnym
 - 4) Prąd ciemny przy $U_k = -1\text{V}$
- Stale czasu zaniku prądu jasnego $\leq 1\mu\text{s}$ przy $R_L=1\text{k}\Omega$
Powierzchnia czynna detektorów 0.8mm^2
Wykrywalność, dioda Schottky'ego $> 2 \times 10^{11}\text{ cm Hz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$
Wykrywalność, dioda p-i-n $> 1.5 \times 10^{12}\text{ cm Hz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$



Rys. 1 Ulotka informacyjna na temat parametrów oferowanych detektorów

Posiadamy ponad 20 letnie doświadczenie w elektronolitografii i reaktywnym trawieniu struktur 3D w różnych podłożach. To umożliwia realizację optycznych elementów dyfrakcyjnych (DOEs). Wykonujemy takie elementy na zakres IR, VIS a ostatnio także na zakres UV, ponieważ wykonujemy elementy o wymiarze krytycznym 50nm na podłożach o dyżych rozmiarach (7"). Kompetencje w zakresie detekcji UV i optyki dyfrakcyjnej zostały wykorzystane w ramach programu PROTEUS. Opracowano czterokanałowy układ analizy widma płomienia przeznaczony do diagnostyki pożaru z pokładu samolotu bezzałogowego.

System składa się z czterech torów analizy widmowej – dwóch z zakresu ultrafioletu i dwóch z zakresu podczerwieni.

Układ optyczny został wykonany w postaci trójwymiarowych soczewek dyfrakcyjnych. Żrenica wejściowa soczewki ma średnicę 25mm, a rozmiar detektora 1*1mm i w kwadracie tego stosunku uzyskano poprawę sygnału do szumu.

Informacja z czterech torów pomiarowych umożliwia diagnostykę pięciu rodzajów pożaru :

- Sadza
- Węglowodory
- Klasyczny
- Chemiczny
- Wybuch (lub wyładowanie elektryczne).

Opisany sposób detekcji i analizy pożaru jest przedmiotem zgłoszenia patentowego krajowego i międzynarodowego.

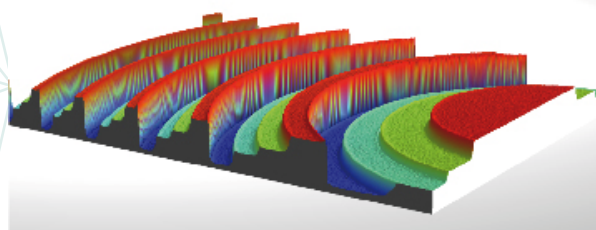
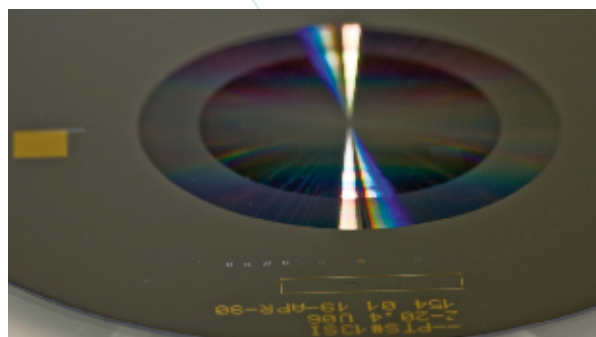
System zdalnej detekcji i analizy pożaru został przetestowany w Centrum Naukowo Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej (CNBOP) i przeszedł pozytywnie badania mechaniczne, klimatyczne, elektromagnetyczne oraz został zakwalifikowany do pierwszej klasy czułości przeciwpożarowej zgodnie z normą PN-EN 54. System został zintegrowany z kamerami wizyjnymi w obrotowej głowicy na pokładzie samolotu bezzałogowego. W locie testowym uzyskano detekcję pożaru z wysokości 250m (prezentacja filmu).



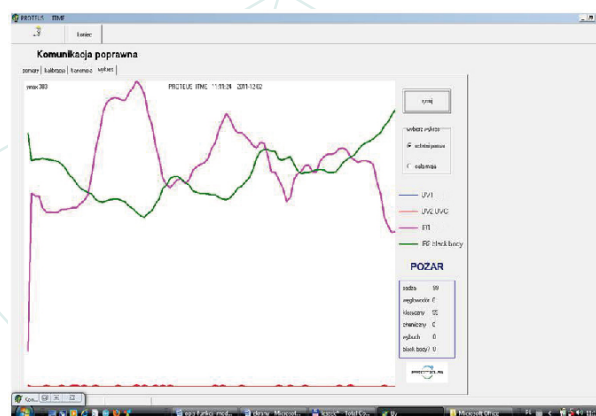
Rys. 5 Układ czterech radiometrów po integracji w głowicy obrotowej bezzałogowego samolotu



Rys.2 Zespół czterech radiometrów przed integracją na pokładzie samolotu



Rys. 3 Fotografia wytrawionej w krzemie soczewki dyfrakcyjnej oraz profil powierzchni soczewki zobrazony przy pomocy mikrodyfraktometru



Rys. 4 Przykładowa analiza płomienia świecy – emisja molekuly CO_2 oraz sadzy

7. Podziękowanie

Serdecznie dziękujemy za przyjęcie zaproszenia i wzięcie udziału w I Konferencji Optoelektronicznej pod tytułem „Optoelektronika dla bezpieczeństwa państwa i obywateli”. Mamy nadzieję, że konferencja ta była okazją do przedstawienia możliwości polskiej optoelektroniki, a także, że przyczyni się w przyszłości do jeszcze lepszej współpracy pomiędzy wojskiem, nauką i przemysłem. Oczekujemy, że podjęte dyskusje będą kontynuowane podczas kolejnych jej edycji.

dr inż. Ryszard Kardasz
Prezes Zarządu
PCO S.A.

8. Dane kontaktowe



PCO Spółka Akcyjna

ul. Jana Nowaka-Jeziorańskiego 28
03-983 Warszawa
pco@pcosa.com.pl
tel. +48 22 515 75 01
www.pcosa.com.pl



Wojskowa Akademia Techniczna

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa 49
sekretariat.rektora@wat.edu.pl
tel. 22 683 90 01
www.wat.edu.pl



Polska Platforma Technologiczna Fotoniki

Polska Platforma Technologiczna Fotoniki

Siedziba Koordynatora - PCO S.A.
ul. Jana Nowaka-Jeziorańskiego 28
03-982 Warszawa
email: pco@pcosa.com.pl



Politechnika Warszawska

ul. Plac Politechniki 1
00-661 Warszawa
tel. 22 234 72 11
www.pw.edu.pl



