

Krzysztof DZIARSKI*, Joanna PARZYCH*

UKŁAD OPTYCZNY W DŁUGOFALOWYCH KAMERACH TERMOWIZYJNYCH PRZEZNACZONYCH DO OBSERWACJI MIKROELEMENTÓW

W niniejszym artykule przedstawiono dostępne na rynku rozwiązania zastosowane w długofalowych kamerach termowizyjnych pozwalających na obserwacje elementów zamkniętych w obudowach przeznaczonych do montażu powierzchniowego SMD (*Surface Mounted Device*). Omówiono podstawowe parametry zastosowanych matryc detektorów promieniowania podczerwonego oraz ich wpływ na wykonywany pomiar. Zestawiono omawiane matryce pod względem wykorzystywanych zjawisk oraz omówiono wykorzystywane zjawiska. Przedstawiono również układ optyczny stosowany we współczesnych długofalowych kamerach termowizyjnych. Zaproponowano takie ustawienia układu optycznego, które pozwolą na uzyskanie wystarczającej ostrości obrazu.

SŁOWA KLUCZOWE: termowizja, metrologia, obudowy SMD, detektory podczerwieni.

1. WSTĘP

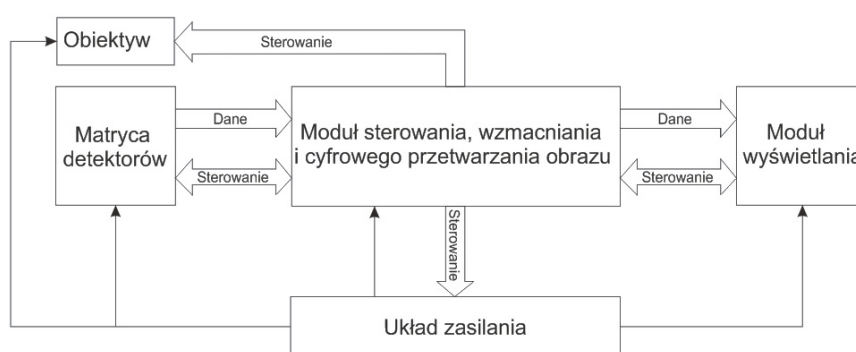
Współczesne układy elektroniczne cechują się niewielkimi wymiarami. Z tego powodu projektowane PCB zawierają dużą ilość mikroelementów – elementów zamkniętych w obudowach przeznaczonych do montażu powierzchniowego SMD (*Surface Mounted Devices*). Z uwagi na niewielkie wymiary obudów (rzędu milimetrów) wykonanie wiarygodnego pomiaru wartości ich temperatury jest utrudnione. Niewielka pojemność cieplna obudów sprawia, że przyłożenie czujnika temperatury do obudowy w znaczący sposób wpływa na jej temperaturę. Utrudnione jest również zapewnienie odpowiedniego połączenia termicznego pomiędzy czujnikiem i obudową. Sprawia to, że pomiar temperatury metoda stykową jest nieskuteczny. Powyższych problemów można uniknąć poprzez zastosowanie termowizji. Ta bezstykowa metoda polega na detekcji promieniowania podczerwonego i zamianie jej na sygnał napięciowy. Następnie otrzymane dane przedstawiane są w postaci graficznej. Oprócz zalet termowizja posiada również ograniczenia. Są one spowodowane min. budową pojedynczych detektorów, z których zbudowana jest matryca. Ograniczenia są również związane ze zjawiskami wykorzystywanymi do detekcji promieniowania podczerwonego.

* Politechnika Poznańska

W zależności od rodzaju i liczby zastosowanych detektorów oraz wykorzystanych zjawisk matryce będą różniły się właściwościami. Z tego powodu może nie być możliwe wykonanie wiarygodnych pomiarów temperatury powierzchni dowolnego mikroelementu za pomocą kamery termowizyjnej z dowolną matrycą detektorów. Znając parametry i właściwości poszczególnych matryc można dobrać odpowiednie rozwiązanie do danych potrzeb. Istotny jest również zastosowany obiektyw. Dlatego zdecydowano się na wykonanie przeglądu katalogów i literatury najczęściej wykorzystywanych matryc detektorów promieniowania podczerwonego i dodatkowych obiektywów używanych w kamerach termowizyjnych, które mogą być wykorzystane do obserwacji obudów przeznaczonych do montażu powierzchniowego SMD.

2. MATRYCE DETEKTORÓW PODCZERWIENI

Uzyskanie możliwie najbardziej dokładnego rozkładu temperatury na powierzchni obudowy przeznaczonej do montażu powierzchniowego wymaga użycia kamery termowizyjnej wyposażonej w układ optyczny i detektory o odpowiednich parametrach. Kamery termowizyjne przetwarzają promieniowanie podczerwone emitowane lub odbite od obserwowanych powierzchni na sygnał elektryczny. Następnie na podstawie uzyskanego sygnału elektrycznego tworzony jest obraz widoczny na ekranie. Współczesne kamery zawierają układ optyczny (obiektyw), nieruchomą matrycę FPA (*Focal Plane Array*) złożoną z detektorów oraz elektroniczne układy wzmacniania, przetwarzania i wizualizacji [5, 6]. Nie stosuje się już rozwiązań polegających na przesuwaniu pojedynczego detektora lub liniiki detektorów. Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy ilustrujący budowę współczesnej kamery termowizyjnej.



Rys. 1. Schemat budowy współczesnej kamery termowizyjnej [zbiory własne]

Pierwszym z parametrów, na jaki należy zwrócić uwagę podczas doboru kamery termowizyjnej do obserwacji elementów umieszczonych w obudowach

SMD jest zakres spektralny, w którym pracuje dana matryca FPA. Podstawowy podział kamer termowizyjnych wynika z pracy zastosowanych detektorów w jednym z pięciu podzakresów pasma promieniowania podczerwonego:

- bliska podczerwień (NIR – *Near Infrared*) – od 0,78 μm do 1 μm ,
- zakres krótkofalowy (SWIR – *Short Wave Infrared*) – od 1 μm do 3 μm ,
- zakres średniofalowy (MWIR – *Medium Wave Infrared*) - od 3 μm do 6 μm ,
- zakres długofalowy (LWIR – *Long Wave Infrared*) - od 6 μm do 15 μm oraz zakres ultra długofalowy (VLWIR – *Very Long Wave Infrared*) od 15 μm do 1000 μm [1].

W przypadku pomiarów termowizyjnych nastawionych na szacowanie temperatury złącz półprzewodnikowych umieszczonych we wnętrzu obudów SMD najczęściej wyróżnia się kamery średniofalowe MWIR i długofalowe LWIR. Deklarowana przez producentów maksymalna temperatura złącza półprzewodnikowego ϑ_{jmax} w większości przypadków wynosi 150 °C. Warto pamiętać, że zależnie od temperatury otoczenia wartość ta może być wyższa od wartości deklarowanej nawet o kilkadziesiąt stopni Celsjusza. Z tego powodu należy nastawić się na obserwację wartości temperatury z zakresu od 20 °C do 200°C, ze szczególnym uwzględnieniem podobszaru mieszczącego się w granicach od 100°C do 160°C. Na mocy prawa Wiena wiążącego temperaturę obserwowanej powierzchni z maksymalną długością fali promieniowania podczerwonego emitowanego przez tą powierzchnię, można stwierdzić, że podany zakres temperatury odpowiada zakresowi długości fal od około 9,89 μm do około 6,12 μm (dla podanego podzakresu temperatur od 100 °C do 160 °C – 7,77 μm do 6,69 μm). Są to wartości odpowiadające zakresowi LWIR. Warto zauważyć, że te wartości znajdują się na granicy zakresów LWIR i MWIR. Wykorzystana matryca FPA powinna zawierać detektory posiadające zakres spektralny pokrywający się w możliwie największym stopniu z zakresem spektralnym emitowanego promieniowania, dlatego z punktu widzenia użytkownika - i z uwagi na zakres spektralny - do obserwacji temperatur na powierzchni obudów SMD i szacowania temperatury złącza odpowiednia jest kamera zawierająca detektory pracujące w zakresie LWIR.

Zakres spektralny, w którym pracują detektory składające się na matrycę zależy od typu detektora i zjawiska wykorzystywanego do absorpcji promieniowania podczerwonego. Pojedyncze detektory można podzielić na dwie podstawowe grupy: detektory chłodzone i niechłodzone pracujące w temperaturze otoczenia. Chłodzone detektory do absorpcji promieniowania podczerwonego wykorzystują zjawiska kwantowe. Można je podzielić ze względu na rodzaj materiału, z którego wykonano półprzewodnik wykorzystany do ich produkcji. Większość chłodzonych detektorów takich jak np. detektor wykonany InGaAs pracujący w zakresie 0,9 μm – 1,7 μm i detektor wykonany z InSb (zakres 2 μm – 5,6 μm) z uwagi na zakres spektralny nie nadaje się do obserwacji rozkładu temperatur na powierzchni obudów. Z pośród chłodzonych detektorów pracujących w za-

kresie spektralnym odpowiadającym wyżej określonymu zakresowi spektralnemu warto wymienić detektor QWIP (*Quantum Well Infrared Photon*) posiadający największą zdolność absorpcyjną w pasmie 8-9 μm oraz detektor wykonany z HgCdTe (MCT - *Mercury Cadmium Telluride*) [5,7,10] i detektor T2SL (*Type II Super Lattice*) [25], których zakresy spektralne zależą od proporcji składników.

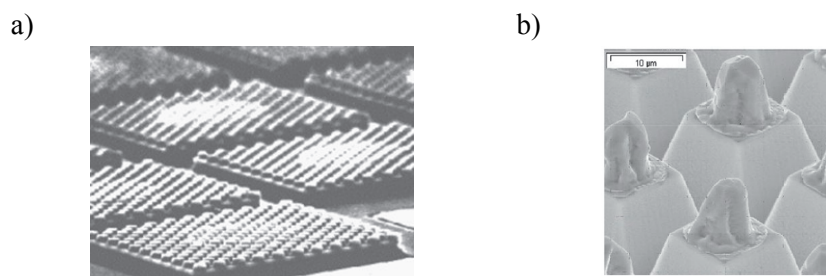
Detektor QWIP jest fotonowym, studniowym detektorem promieniowania podczerwonego. Wykorzystuje efekt powstania studni kwantowej w strukturze dwóch warstw półprzewodnikowych o różnych poziomach pasma zabronionego. W powstałej studni potencjału istnieją skwantowane poziomy energetyczne, które mogą być obsadzone przez większościowe nośniki domieszkowanego półprzewodnika. Opisane poziomy energetyczne mogą być wykorzystane do przejść zachodzących w wyniku absorpcji promieniowania padającego na powierzchnię detektora. Odległość pomiędzy poziomami energii jest zależna od szerokości studni. Można ją dobrać tak, by absorbowane było promieniowanie z zakresu promieniowania podczerwonego. Detektor QWIP składa się głównie z warstw AlGaAs oraz GaAs [7,10]. Widok pojedynczych detektorów QWIP został przedstawiony na rys. 2.

Detektor MCT działa odmiennie od detektora QWIP. W trakcie jego działania nośniki mniejszościowe unoszone są przez zewnętrzne pole elektryczne w kierunku elektrody sygnałowej. We współczesnych matrycach często spotyka się detektory wykonane z kilku warstw HgCdTe [10]. Na rys. 2 przedstawiono widok pojedynczego detektora wykonanego z 3 warstw HgCdTe.

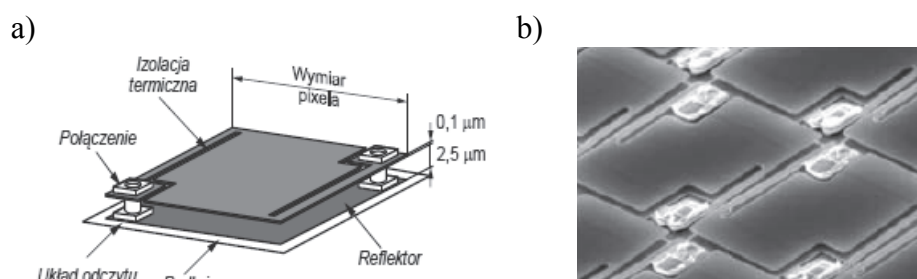
Trzeci z wymienionych typów detektorów T2SL wykonany jest z naprzemiennie ułożonych warstw półprzewodnikowych GaSb oraz InAs. Jego działanie opiera się na ruchu wewnątrzpasmy nośników oraz tunelowaniu przez wielobarierowy układ kwantowo-mechaniczny. [22] Z uwagi na duży postęp związany z rozwojem detektora tego typu można przewidywać, że w przyszłości skutecznie wyprze on inne typy detektorów.

Wymienione wyżej matryce detektorów wymagają chłodzenia. Współcześnie do chłodzenia detektorów najczęściej wykorzystuje się chłodziarkę Stirlinga pracującą w zamkniętym obiegu.

Oddzielną grupę detektorów stanowią detektory niechłodzone. Matryca detektorów bolometrycznych, obok chłodzonych detektorów kwantowych, jest obecnie najpowszechniej stosowanym typem detektora w budowie współczesnych kamer termowizyjnych. Działanie detektora bolometrycznego opiera się na zmianie rezystancji w funkcji temperatury. Współczesne detektory bolometryczne składają się z warstwy absorbera absorbującego padający na detektor strumień promieniowania podczerwonego, termometru i izolacji termicznej. Widok oraz budowę pojedynczego detektora mikrobolometrycznego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Widok pojedynczych detektorów QWIP (a) i pojedynczego detektora wykonanego z 3 warstw HgCdTe (b) [11, 27]



Rys. 3. Budowa mikrobolometrycznego detektora podczerwieni (a) oraz widok detektorów w matrycy (b) [6]

Warstwa absorbera jest to najczęściej bardzo cienka napyłona reaktywnie warstwa tlenku azotu. Warstwa termometryczna składa się z cienkiej (ok. $0,1 \mu\text{m}$) warstwy uszlachetnionego, amorficznego krzemu (aSi) lub tlenku wanadu (VOx). W przypadku obu materiałów wartość współczynnika TCR (temperaturowy współczynnik zmian rezystancji) wynosi ok $2\text{-}3 \text{ \%}/\text{K}$. Właśnie ta warstwa spełnia rolę termometru i nie absorbuje promieniowania. Odległość pomiędzy warstwą absorbującą i reflektorem jest zależna od zakresu, w jakim pracuje matryca i wynosi $1/4$ długości fali środka pasma pracy matrycy. W przypadku matryc pracujących w zakresie LWIR odległość ta wynosi ok. $2,5 \mu\text{m}$. Wymiary pojedynczych pikseli niechłodzonej matrycy detektorów bolometrycznych są zależne od rodzaju kamery, w której zostały zamontowane.

Matryca wraz z elektronicznym układem przeznaczonym do odczytu i generacji sygnału jest umieszczona w próżniowej obudowie z oknem wykonanym z Ge, Si lub ZnSe. Zamknięcie matrycy w próżni zapewnia izolację detektora od otoczenia. Pozwala to na uzyskanie dużej czułości oraz zapobiega wystąpieniu zjawiska dryftu temperaturowego [6,8,10]. Innym istotnym parametrem jest rozdzielczość zastosowanej matrycy FPA. Z uwagi na niewielkie wymiary obudów przeznaczonych do montażu powierzchniowego (rzędu milimetrów) zastosowana matryca powinna zawierać możliwie najwięcej pikseli (de-

tektorów). Im więcej detektorów będzie zawierać zastosowana matryca, tym mniejszy obszar obserwowanej powierzchni przypadnie na pojedynczy detektor. Pozwoli to na bardziej dokładne odwzorowanie rozkładu temperatur. Wzrośnie również ostrość otrzymanego termogramu. Pojedyncze detektory służące do budowy matryc FPA posiadają niewielkie wymiary. W przypadku detektorów stosowanych w kamerach pracujących w zakresie LWIR rozmiar pojedynczego detektora wynosi ok 15 μm . Umożliwia to budowę matryc o dużej rozdzielczości. Standaryzowane rozdzielczości współczesnych matryc pracujących w zakresie LWIR wynoszą 320 x 256, 480 x 380 a nawet 640 X 512 [25].

Ostatnim parametrem, na jaki należy zwrócić uwagę przy doborze kamery termowizyjnej do obserwacji rozkładu temperatur na powierzchni mikroelementów jest rozdzielczość termiczna NEDT. Określa najmniejszą możliwą do rozróżnienia różnicę temperatur pomiędzy poszczególnymi punktami. Dla współczesnych kamer termowizyjnych wartość ta dochodzi do 10-20 mK w przypadku zastosowania chłodzonych matryc detektorów kwantowych oraz 40-100 mK w przypadku zastosowania niechłodzonych matryc detektorów termicznych. [10]

3. UKŁAD OPTYCZNY

Oprócz matrycy detektorów promieniowania podczerwonego równie ważnym elementem kamery termowizyjnej jest układ optyczny. Jest on podobny do tego w zwykłej kamerze, różni się przede wszystkim rodzajem szkła, z którego wykonana jest soczewka obiektywu oraz rodzajem mocowania (TA, zamiast C lub CS). Zadaniem obiektywu jest skupienie na matrycy detektorów wiązki promieniowania docierającego do układu optycznego, a w kamerach termowizyjnych powinien on absorbować jedynie strumień promieniowania podczerwonego, nie przepuszczając do dalszej części układu optycznego promieniowania z zakresu widzialnego. Tradycyjne szkło, którego głównym składnikiem jest kwarc, odbija promieniowanie podczerwone, dlatego obiektywy współczesnych kamer termowizyjnych wykonywane są z monokryształu germanu, krzemu lub selenku cynku oraz siarczku cynku i szkła chalogenidkowego. Dodatkowo, aby zwiększyć przepuszczalność w zakresie promieniowania podczerwonego i tłumienie w zakresie promieniowania widzialnego, obiektywy pokrywane są warstwami antyrefleksyjnymi oraz mogą zawierać filtry pasmowe. Niekiedy, szczególnie w zastosowaniach wojskowych, stosuje się specjalne warstwy przeciwo-blaskowe odporne na ścieranie o strukturze diamentu tzw. *hard carbon*. [6].

Właściwości obiektywów montowanych w kamerach uzależnione są od zastosowania, do którego dedykowana jest kamera. Do obserwacji mikroelementów w układach elektronicznych potrzeba obiektywu, który z dużą rozdzielczością zobrazuje objekty o rozmiarach rzędu milimetrów z rozdzielczością < 1 mm. Warunek ten spełniają obiektywy mikroskopowe oraz obiektywy

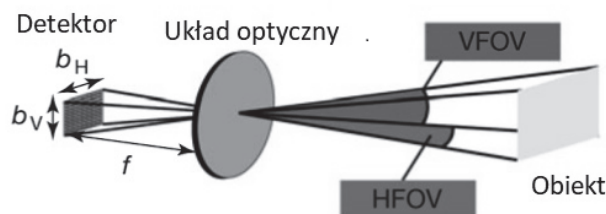
z soczewką immersyjną. Większość dostępnych na rynku kamer termowizyjnych posiada wbudowany obiektyw. Jednak w wielu przypadkach możliwa jest wymiana obiektywu lub zamontowanie dodatkowego. Umożliwia to uzyskanie ostrego obrazu obserwowanej powierzchni. Ponadto we współczesnych obiektywach zamiast pojedynczej soczewki stosowane są zestawy soczewek (5-9) wklęsłych i wypukłych. Pozwala to wyeliminować takie wady jak aberracja sferyczna (wada wynikająca z różnego załamania promieni przyosiowych oraz pozaosiowych) czy koma (wada wynikająca z różnego załamania w soczewce promieniowania padającego pod pewnym kątem). [9]

Do najważniejszych parametrów obiektywu należy zaliczyć:

- pole widzenia (kąt widzenia) (FOV – *Field Of View*),
- ogniskową f ,
- rozdzielczość geometryczną (kątową) (IFOV - *Instantaneous Field Of View*).

Pole widzenia obiektywu należy rozumieć, jako ostrosłup, którego wierzchołek znajduje się w ogniskowej. Umieszczana w dokumentacji technicznej wartość FOV odnosi się do kąta pomiędzy przeciwnymi ścianami tego ostrosłupa. Pole widzenia może być prostokątem, definiuje się wówczas pole widzenia w kierunku pionowym (VFOV) oraz pole widzenia w kierunku poziomym (HFOV) (rys. 4). Najczęściej obie wartości oznaczone są w karcie katalogowej jako FOV z dwoma różnymi wartościami kąta. Ogniskowa to odległość pomiędzy matrycą a płaszczyzną obrazu. Im dłuższa jest ogniskowa, tym większe jest powiększenie, a im krótsza - tym większe jest pole widzenia. Natomiast rozdzielczość geometryczna oznacza kąt ostrosłupa, którego podstawą jest obszar powierzchni emitujący promieniowanie oświetlające pojedynczy piksel detektora kamery. Wielkość tego obszaru jest wymiarem najmniejszego obiektu, jaki może rozróżnić układ optyczny [9].

Do obserwacji mikroelementów w układach elektronicznych potrzeba obiektywu, który z dużą rozdzielczością zobrazuje obiekty o rozmiarach rzędu milimetrów. Stąd wynika, że obiektyw taki powinien cechować się małymi wartościami HIFOV oraz VIFOV, mieć odpowiednią rozdzielczość geometryczną, a wartość jego ogniskowej nie powinna wykraczać poza odległość obiekt-detektor. Warunki te spełniają wąskokątne obiektywy o wartości f nieprzekraczającej 50 mm (mikroskopowe lub z soczewką immersyjną).



Rys. 5. Graficzne przedstawienie wielkości FOV oraz f [9]

W obiektywach stosowanych w kamerach termowizyjnych wartość ogniskowej jest stała. Możliwa jest jedynie skokowa zmiana jej wartości na skutek zmiany dołączonego obiektywu lub zastosowania pierścienia pośredniego. Pierścienie pośrednie (tzw. kręgi lub pierścienie makro) pozwalają na zmniejszenie minimalnej odległości rejestracji (MOD – *Minimal Object Distance*). Zamontowanie pierścienia pośredniego między kamerą a obiektywem spowoduje zwiększenie odległości soczewka - matryca detektorów, a tym samym zmniejszenie odległości między obserwowanym obiektem a obiektywem. Dzięki temu rozwiązaniu uzyskuje się dodatkowe powiększenie obrazu bez wymiany obiektywu. Jednak dodanie pierścieni pośrednich wpływa nie tylko na zmianę geometrii układu optycznego, trzeba też wziąć pod uwagę wpływ promieniowania emitowanego przez same pierścienie na dokładność detekcji. Nagrzewanie się pierścienia podczas pomiaru termowizyjnego powoduje wzrost mierzonej wartości temperatury oraz zniekształcenia obrazu (w miarę zwiększania się odległości od osi przechodzącej przez środek matrycy detektorów, pogarsza się jakość obrazu), a im dłuższy pierścień, tym większy efekt powoduje. Można zminimalizować wpływ pierścienia na pomiar temperatury stosując programową korekcję niejednorodności, jednak wymaga to wcześniejszych pomiarów z wykorzystaniem wzorca temperatury [2, 3].

4. PORÓWNANIE PARAMETRÓW WYBRANYCH KAMER TERMOWIZYJNYCH

Większość kamer termowizyjnych dostępnych na rynku przeznaczonych m.in. do obserwacji mikroelementów wyposażona jest w niechłodzoną matrycę mikrobolometryczną. Stąd ich zakres spektralny najczęściej obejmuje od 7,5 do 14 μm . Kamery z detektorem QWIP lub MTC mają zdecydowanie mniejszy zakres spektralny, jak np. w kamerze FLIR TitaniumSC7700L (8,1-8,7 μm) czy w kamerze FLIR SC7750L (8,0-9,4 μm), co w pewnym stopniu może zmniejszyć użyteczność kamery w danych zastosowaniach [14, 20]. Natomiast zakres spektralny kamer z chłodzonym detektorem T2SL obejmuje, zarówno MWIR, jak i LWIR przy długości fali odcięcia powyżej 9 μm (np. Pelican-D LW, 9,3 μm), dlatego mogą sprawdzić się w pomiarach na granicy zakresów średnio- i długofalowym [4].

W tabeli 1 podano wartości wybranych parametrów dla niektórych kamer dostępnych na rynku. Jak widać, czułość termiczna oferowanych kamer jest rzędu kilkudziesięciu mK (średnio 40 mK). Na tym tle wybija się kamera VarioCam HD Research 900 (20 mK), kamery firmy FLIR z serii SC7000 (20-30 mK) czy też FLIR SC660 i FLIR T540 (30 mK), jednak różnica w wartościach NEDT nie jest aż tak znacząca [14-16, 21].

Tabela 1. Wybrane parametry kamer termowizyjnych dostępnych na rynku [12-21, 24, 26, 28].

Parametr	Typ detektora	Zakres spektralny [μm]	Zakres pomiarowy [°C]	Czułość termiczna na NEDT	FOV [°]	I FOV [mrad]	Niepewność pomiaru
Kamera FLIR T1020	Mikrobolometr 1024x768	7,5–14	od -40 do +2000	0,02°C	28x21 (12x9)	0,47 (0,24)	±1°C lub 1%
FLIR TitaniumSC770 0L	QWIP	8,1–8,7	od +5 do +300	40 mK	11x8,8 (5,5x4,4)	-	±2°C lub 2%
VarioCam HD Research 900	Mikrobolometr 1024x768	7,5–14	od -40 do +2000	20 mK	30x23 (18x14/12x9/7x5)	0,8 (0,5/0,3/0,2)	±1°C lub 1%
DIAS PY-ROVIEW 640L	Mikrobolometr 640x480	8–14	od -20 do +500	80 mK	34x26 (25x19/12x9)	0,93 (0,7/0,3)	±2°C lub 2%
FLIR ETSS20	Mikrobolometr 640x480	7,5–13	od -20 do +250	0,06°C	45x34	-	±3°C lub 3%
FILIR TIX560	Mikrobolometr 640x480	7,5–14	od -20 do +1200	0,05°C	24x17 (12x9/6x4,5)	1,31 (0,65/0,33)	±2°C lub 2%
VigoCam v5	Mikrobolometr 384x288	8–14	od -20 do +1500	65 mK	15x11 (31x23/9x7)	0,7 (1,4/0,4)	±2°C lub 2%
Testo 890	Mikrobolometr 640x480	7,5–14	od -30 do +650	40 mK	30x32 (15x11/6,5x5)	1,13 (0,42/0,8)	±2°C lub 2%
Fluke 480PRO	Mikrobolometr 640x480	7,5–14	od -10 do +1000	0,05°C	34x24 (12x9/6x4,5)	0,93 (0,65/0,33)	±2°C lub 2%

Zakres pomiarowy dla kamer z matrycami mikrobolometrycznymi jest dość szeroki, obejmuje temperatury od -40°C do nawet $+2000^{\circ}\text{C}$. Warto tu zwrócić uwagę na kamerę firmy FLIR ETS320, która ma mniejszy zakres pomiarowy (od -20°C do $+250^{\circ}\text{C}$), ale jest dedykowana do pomiaru rozkładu temperatury układów elektronicznych – na wyposażeniu jest specjalny statyw z regulacją odległości obiektu od obiektywu [24].

Obecnie produkowane kamery termowizyjne mają możliwość wymiany obiektywu, stąd wartości FOV i IFOV będą zmieniać się wraz z zastosowanym obiektywem. Producenci i dystrybutorzy nie zawsze podają, jakiego rodzaju soczewka jest zamontowana obiektywie, czy też jakiego typu materiału użyto do jej produkcji. Jednak najczęściej jest to szkło germanowe. W przypadku kamer firmy Fluke, stosowane w nich soczewki są pokryte warstwą o strukturze diamentu [17, 18].

Niepewność pomiaru dostępnych kamer najczęściej przyjmuje wartość $\pm 2^{\circ}\text{C}$ lub 2% wartości zmierzonej (w zależności od tego, która wartość jest większa), rzadziej $\pm 1^{\circ}\text{C}$ lub 1% wartości zmierzonej, co na chwilę obecną jest pewnym standardem w zakresie dokładności pomiaru kamerą termowizyjną.

5. PODSUMOWANIE

W celu wykonania obserwacji rozkładu temperatur na powierzchni obudów SMD należy wybrać kamerę termowizyjną zawierającą obiektyw oraz matrycę detektorów cechujące się odpowiednimi parametrami. Z punktu widzenia użytkownika wiedza o zjawiskach wykorzystywanych do detekcji promieniowania podczerwonego nie należy do najważniejszych. Istotna jest natomiast informacja o zakresie spektralnym, w którym odbierają promieniowanie detektory wchodzące w skład matrycy. Powinien on w jak największym stopniu pokrywać się z zakresem spektralnym promieniowania emitowanego przez powierzchnię obudów elementów SMD. Ponadto, wraz ze wzrostem liczby detektorów zmniejsza się fragment powierzchni przypadającej na pojedynczy detektor. Im mniejsze będą wymiary obserwowanego elementu, tym więcej detektorów powinna zawierać zastosowana matryca. Należy również zwrócić uwagę na wartość NEDT. Jej niewielka wartość może być przydatna do rozróżniania temperatur na obszarach obudowy, które znajdują się blisko siebie.

Z kolei dobór odpowiedniego układu optycznego wpływa, zarówno na czułość i zakres spektralny kamery, jak i na jej rozdzielczość obrazową. Od materiałów, z jakich wykonane są soczewki oraz warstwy antyrefleksyjne, zależy wielkość transmitancji promieniowania IR i absorpcji promieniowania VIS, co ma wpływ na czułość spektralną w danym zakresie. Natomiast ogniskowa, wartość parametrów FOV i IFOV określają minimalną wielkość obrazowanego obszaru oraz rozmiar najmniejszego obiektu, jaki może rozróżnić kamera termowizyjna.

LITERATURA

- [1] Chrzanowski K., Firmanty K., Bareła J., Krótkofalowe kamery podczerwieni, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 7-8/2005, s. 34-36.
- [2] Kałuża M., Problem nagrzewania pierścieni pośrednich w badaniach termowizyjnych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 10/2011, s. 1238-1241.
- [3] Kałuża M., Więcek B., Zastosowanie pierścieni pośrednich stosowanych w badaniach termowizyjnych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 11/2009, s. 988-901.
- [4] Klipstein P.C., Avnon E., Benny Y. i inni, Type-II superlattice detector for long-wave infrared imaging, Israel MOD.
- [5] Krewski A., Sanecki J., Sacha P., Nowe rozwiązania techniki termalnej zastosowane do diagnostyki urządzeń, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, Nr 1(73), 2004, s. 323-332.
- [6] Madura H., Sosnowski T., Bieszczad G., Termowizyjne kamery obserwacyjne budowa, zastosowania i krajowe możliwości realizacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr9/2014, s. 5-8.
- [7] Minkina W., Podstawy pomiarów termowizyjnych cz.3 - Problemy metrologiczne, interpretacja wyników, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 11/2001, s. 5-8.
- [8] Minkina W., Rutkowski P., Wild W.A., Podstawy pomiarów termowizyjnych cz.2 - Współczesne rozwiązania systemów termowizyjnych, błędy metody, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 1/2000, s. 11-14.
- [9] Vollmer M., Möllmann K-P., *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications*, Willey-VCH, 2018.
- [10] Więcek B., Wybrane zagadnienia współczesnej termowizji w podczerwieni, *Poli-technika Łódzka, Instytut Elektroniki*, 2010.
- [11] <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38815.pdf>, dostęp [07.01.2016].
- [12] http://www.dias-infrared.com/pdf/pyroview640l_eng_mail.pdf, dostęp [19.01.2017].
- [13] http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND_025/IND_025_US.pdf, dostęp [19.01.2017].
- [14] http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_017/RND_017_US.pdf, dostęp [19.01.2017].
- [15] <http://www.flir.com/uploadedFiles/Store/Products/Instruments/T-Series/T500-Series/T500-Series-brochure.pdf>, dostęp [19.01.2017].
- [16] [http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/SC660_Datasheet%20APAC\(1\).pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/SC660_Datasheet%20APAC(1).pdf), dostęp [19.01.2017].
- [17] <http://www.fluke.com/fluke/plpl/kamery-termowizyjne/fluke-ti480-pro.htm?pid=82257>, dostęp [19.01.2017].
- [18] <http://www.fluke.com/fluke/plpl/kamery-termowizyjne/fluke-tix560.htm?PID=79229>, dostęp [19.01.2017].
- [19] <http://www.fluke.com/fluke/plpl/akcesoria/thermal-imaging-accessories/flk-lens-4xtele2.htm?PID=79690>, dostęp [19.01.2017].
- [20] http://www.hoskinscientifique.com/uploadpdf/Instrumentation/FLIR%20Systems/hoskin_Titanium_4e71fe0eab47e.pdf, dostęp [19.01.2017].

- [21] <http://www.infratec-infrared.com/thermography/infrared-camera/variocamr-high-definition.html>. dostęp [19.01.2017].
- [22] <http://www.ir-nova.se/t2sl/>, [07.01.2016].
- [23] <https://media.testo.com/media/2b/ae/3b53c279ec40/Katalog-testo-890.pdf>,
dostęp [19.01.2017].
- [24] https://www.mouser.com/catalog/specsheets/FLIR_ET320.pdf,
dostęp [19.01.2017].
- [25] <http://www.scd.co.il/All-Cooled-Products>, [07.01.2016].
- [26] <https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2017/09/Pelican-D-LW-640x512-15um-T2SL-based-1.pdf>, dostęp [19.01.2017].
- [27] <http://slideplayer.pl/slide/433883/>, dostęp [07.01.2016].
- [28] <https://www.vigo.com.pl/produkty/kamery-termograficzne/vigocam-v5>,
dostęp [19.01.2017].

OPTICAL SYSTEM IN LONG WAVE INFRARED CAMERAS FOR MICROELEMENTS OBSERVATION

This article presents solutions available on the market used in long-wave infrared cameras that allow observation of elements enclosed in housings designed for SMD (Surface Mounted Device). The basic parameters of the applied infrared radiation detector matrices and their influence on the measurement are discussed. The matrices and the phenomena used by them are written. The optical system used in modern long-wave thermovision cameras is also presented. The settings of optical system that will allow obtain a sufficient image sharpness have been proposed.

(Received: 29.01.2018, revised: 12.03.2018)