

**Henryk POLAKOWSKI, Tadeusz PIĄTKOWSKI, Rafał DULSKI,
Krzysztof FIRMANTY, Mirosław MORAWSKI**
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

Wielosektorowy promiennik podczerwieni

Dr inż. Henryk POLAKOWSKI

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1976). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1987 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 100 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.

e-mail: hpolakowski@wat.edu.pl



Dr inż. Krzysztof FIRMANTY

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 30 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.

e-mail: kfirmanty@wat.edu.pl



Dr inż. Tadeusz PIĄTKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej i Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1985). Od 1995 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 roku. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się zdalnymi pomiarami temperatury, projektowaniem układów optycznych i elektronicznych oraz systemów mikroprocesorowych. Jest autorem i współautorem ponad 30 publikacji.

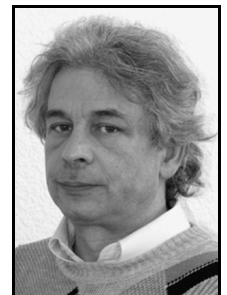
e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl



Dr inż. Mirosław MORAWSKI

Absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej (1982). Od 1996 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT na stanowisku specjalisty. Zajmuje się projektowaniem układów optycznych, mechanicznych i urządzeń podczerwieni. Jako autor i współautor opublikował ponad 20 prac, w tym artykuły, patenty, wzory użytkowe i wdrożenia.

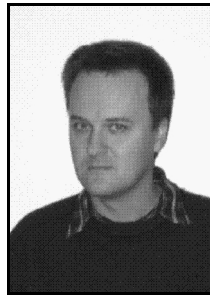
e-mail: mmorawski@wat.edu.pl



Dr inż. Rafał DULSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od roku 1994 pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT, obecnie na stanowisku adiunkta w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji. W roku 1998 uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w specjalności optoelektronika. Autor i współautor ponad 90 publikacji. Zajmuje się głównie komputerowym modelowaniem i przetwarzaniem obrazu w podczerwieni oraz techniką termowizyjną.

e-mail: rdulski@wat.edu.pl

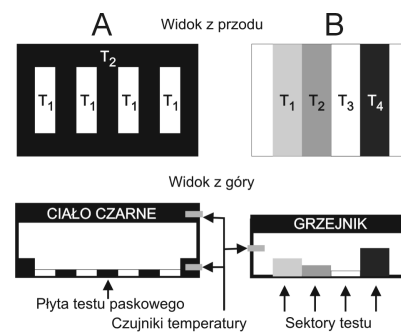


effective emissivity and the shape coefficient of a microstructure were determined. The designed IR source has the uniform radiative temperature distribution across its surface.

Keywords: emissivity, thermal radiation, gray body radiation, thermal contrast.

1. Wstęp

Nowoczesne kamery termowizyjne mają rozdzielczość temperaturową mniejszą niż 100mK. Standardowo parametr ten wyznacza się na podstawie pomiaru charakterystyki MRTD [1]. Do pomiaru MRTD stosuje się powierzchniowe ciała czarne oraz płyty z zestawem testów paskowych. Przykładowe rozwiązanie testu paskowego o dwu różnych temperaturach T_1 i T_2 przedstawiono na rys. 1A.



Rys. 1. Schemat konstrukcji powierzchniowego promiennika z testem paskowym stosowanego w pomiarach MRTD-A, wielosektorowy promiennik podczerwieni z ekwiwalentnymi temperaturami T_1 , T_2 , T_3 i T_4 - B
Fig. 1. A) Standard layout of a test pattern for MRTD measurement; B) IR multisector test pattern with with equivalent temperatures T_1 , T_2 , T_3 and T_4

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wielosektorowy, promiennik podczerwieni, który może być wykorzystany przy badaniach rozdzielczości temperaturowej kamer termowizyjnych. Powierzchnia promieniująca zawiera sektory o różnych współczynnikach emisyjności wykonane z mikrownęk. Umieszczenie wielosektorowego promiennika podczerwieni w odpowiednio zaprojektowanej osłonie termicznej umożliwia przestrajanie kontrastu sąsiadujących ze sobą sektorów z rozdzielczością bliską 100mK.

Słowa kluczowe: współczynnik emisyjności, promieniowanie ciepłe, promieniowanie ciała szarego, kontrast termiczny.

Multisector IR surface emitter

Abstract

The paper presents a multi-sector, highly stable IR source that can be used for (MRTD) testing thermal cameras. The proposed solution is based on a single, monolithic multi-sector IR source with areas of different emissivity. As a result of the emissivity difference, the particular sectors are imaged by thermal camera as areas of different temperatures. The sectors exhibit the radiative properties of a gray body. They are manufactured as micro-cavity structures in a solid metal plate. The desired value of emissivity is achieved by adjusting the geometric parameters of microstructure. The thermal contrast between adjacent sectors is obtained by selecting different effective emissivity values for particular sectors. By placing the multi-sector source inside a thermally insulated case it is possible to tune the thermal contrast between the adjacent sectors with 100 mK resolution. The emissivity of microstructure comb patterns was measured by a thermal camera. The temperature characteristics as well as the relation between the

W standardowej metodzie pomiaru [1] zmianę kontrastu termicznego uzyskuje się poprzez zmianę różnicy temperatur płyty testu paskowego T_2 i temperatury powierzchni ciała czarnego T_1 .

Najważniejsze ograniczenie standardowej metody pomiaru charakterystyk MRTD wynika z trudności utrzymania stałej w czasie różnicy temperatury pomiędzy testem czteropaskowym a ciałem

czarnym. Wymienna cienka płyta testu paskowego znajduje się w pewnej odległości od promiennika, technicznego modelu ciała doskonale czarnego rys. 1A, nazywanego dalej w skrócie „ciałem czarnym”. Konsekwencją takiej konstrukcji jest ustalanie się temperatury testu w wyniku radiacyjnej wymiany energii pomiędzy otoczeniem płytki, a ciałem czarnym [2]. Na temperaturę testu ma również wpływ konwekcyjna wymiana ciepła związana z oddziaływaniem powietrza atmosferycznego [3]. W standardowej metodzie wizualizowany przez kamerę termowizyjną obraz jest wynikiem złożenia obrazów termicznych dwóch oddzielnych elementów konstrukcyjnych. Jednym z nich jest powierzchnia płyty testu paskowego, a drugim powierzchnia promiennika ciała doskonale czarnego. Temperaturę ciała doskonale czarnego ustala regulator temperatury, natomiast temperatura testu paskowego ustala się samoczynnie w wyniku wymiany ciepła z otoczeniem z udziałem zarówno promieniowania jak i konwekcji. Dodatkowym problemem jest pomiar temperatury obu elementów w dwóch oddzielnych układach pomiarowych, z których każdy obarczony jest określoną niepewnością. Istnieją oczywiście metody obejścia wad i minimalizacji błędów pomiarowych metody standardowej [4, 5], ale nie są one w stanie całkowicie wyeliminować opisanych wyżej problemów [6].

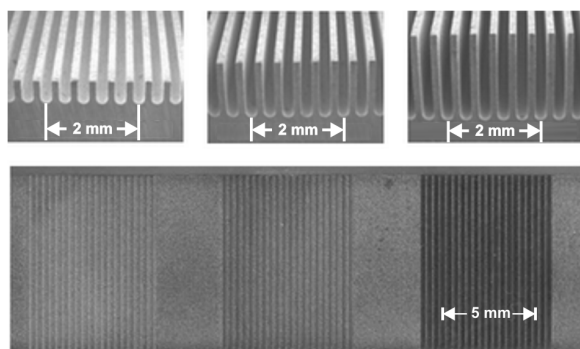
2. Wielosektorowy promiennik podczerwieni

Proponowane w artykule rozwiązanie polega na zastosowaniu zamiast dwóch elementów konstrukcyjnych stanowiska pomiarowego, jednego elementu – tzn. monolitycznej płyty wielosektorowego promiennika podczerwieni, która zawiera sektory o odpowiednio dobranej efektywnej emisyjności. W rezultacie poszczególne sektory obserwowane są przez kamerę termowizyjną jako powierzchnie o zróżnicowanych temperaturach np. T_1, T_2, T_3, T_4 – rys. 1B.

Wymaganą emisyjność sektorów uzyskuje się poprzez wytworzenie mikrowętek o kształcie grzebieniowym i odpowiednio dobranym współczynniku kształtu. Poszczególne obszary odpowiadające paskom w klasycznym teście wytworzone są na fragmentach powierzchni monolitycznej płasko-równoległej płyty metalowej. Obszary te składają się ze struktur grzebieniowych w kształcie prostokątnych rowków o zadanej głębokości h i szerokości w . Ich iloraz definiuje współczynnik kształtu $\chi = h/w$

Częstość przestrzenną struktury dobrano w taki sposób, aby jej wartość była wyższa od zdolności rozdzielczej badanych kamer termowizyjnych. Dzięki takiej budowie promiennika właściwości promienne jego obszarów są uśrednione przez detektor kamery termowizyjnej.

Fotografie mikroskopowe przykładowych struktur grzebieniowych wytworzonych metodą obróbki elektroerozyjnej WEDM (ang. Wire Electrical Discharge Machining) przedstawia rys. 2.



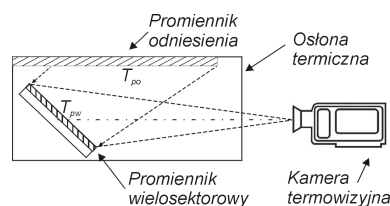
Rys. 2. Mikrowętki o różnych współczynnikach kształtu.
Fig. 2. Micro-cavities of different shapes and shape coefficient

Temperatura radiacyjna poszczególnych sektorów promiennika podczerwieni odpowiada ściśle określonym wartościom. Zależą one wyłącznie od efektywnej emisyjności struktur grzebieniowych promiennika. Dzięki temu można uzyskać znacznie większą do-

kładność ustawienia kontrastu termicznego oraz znacznie wyższą stabilność czasową ustawionej wartości kontrastu dla sektorów testu paskowego. Proponowane rozwiązanie pozwala również na wytworzenie równocześnie kilku obszarów o skokowej zmianie kontrastu termicznego przy jednej nastawie temperatury promiennika.

Ponieważ sektory płyty promiennika podczerwieni są promiennikami termicznymi o cechach zbliżonych do ciała szarego, wielkość kontrastu termicznego obserwowanego przez kamerę termowizyjną zależy zarówno od temperatury płyty promiennika, jak i od promieniowania tła odbitego od jej powierzchni. Jeżeli płyta wielosektorowego promiennika podczerwieni zostanie umieszczona w odpowiedniej osłonie termicznej o kontrolowanej temperaturze to można uzyskać dodatkową możliwość przestawiania kontrastu termicznego poprzez zmianę temperatury tej osłony.

Schemat budowy wielosektorowego promiennika podczerwieni w osłonie termicznej umożliwiającej wytwarzanie powierzchni o zróżnicowanym kontraście termicznym przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wielosektorowy promiennik podczerwieni (widok z boku)
Fig. 3. Multisector IR surface emitter

Płyta promiennika wielosektorowego o temperaturze T_{pw} jest umieszczona w osłonie termicznej. Górna ściana tej osłony jest utrzymywana w stabilizowanej temperaturze T_{po} i spełnia rolę promiennika odniesienia. Powierzchnia płyty wielosektorowego promiennika została umieszczona pod kątem do kierunku osi optycznej układu obserwacji. Takie ustawienie zapewnia dominujący udział odbicia od powierzchni płyty promiennika promieniowania cieplnego, emitowanego z górnej stabilizowanej termicznie ściany osłony, a niewielkie odbicie od pozostałych jej ścian [7].

Zaproponowane rozmieszczenie elementów konstrukcyjnych oraz pozioma orientacja nacięć mikrostruktury grzebieniowej zapewnia zmniejszenie wpływu chłodzenia konwekcyjnego powierzchni promienników. Takie rozwiązanie wpływa korzystnie na równomierność rozkładów temperatury na powierzchniach sektorów opisywanego promiennika.

3. Podstawy teoretyczne

Emisyjność ekwiwalentna mikrostruktury grzebieniowej ε_i zależy od emisyjności powierzchni ε_s i współczynnika kształtu χ , który można zdefiniować jako iloraz głębokości h do szerokości w wnęki prostokątnej, oznaczenie takie wprowadzono dla odróżnienia tej wielkości od współczynnika konfiguracji F :

$$\varepsilon_i = f(\varepsilon_s, \chi). \quad (1)$$

Przy detekcji promieniowania cieplnego w pełnym paśmie na podstawie prawa Stefana-Boltzmana ekwiwalentna temperatura i-tej mikrostruktury może być określona zależnością:

$$T_i = \sqrt[4]{\frac{W_i}{\sigma \varepsilon_i}}, \quad (2)$$

gdzie: W_i to gęstość mocy promieniowania docierająca od mikrostruktury, σ jest stałą Stefana-Boltzmana. Zależność (2) można przedstawić jako funkcję emisyjności efektywnej:

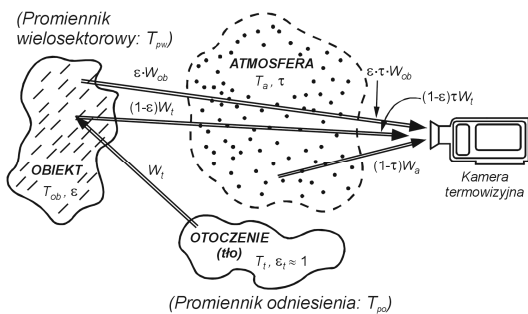
$$T_i = a \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_i}} = a \varepsilon_i^{-\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

gdzie a jest stałą.

Przy pomiarach temperatury obiektu T_{ob} za pomocą kamer termowizyjnych, w nastawach uwzględnia się wartość średnią emisyjności monochromatycznej w kierunku normalnym do powierzchni w przedziale widmowym, w którym pracuje dana kamera, czyli tzw. emisyjność efektywną w zdefiniowanym przedziale długości fal $\lambda \in (\lambda_1, \lambda_2)$. M_B oznacza gęstość widmową ciała czarnego.

$$\varepsilon_{eff}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \cdot M_B(\lambda, T_{ob}) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_B(\lambda, T_{ob}) \cdot d\lambda} \quad (4)$$

Podczas pomiaru temperatury obiektu T_{ob} do kamery termowizyjnej dociera, bezpośrednio lub w wyniku wielokrotnych odbić, promieniowanie z całego jej otoczenia. Uwzględnienie w algorytmie pracy kamery wszystkich możliwych źródeł wpływających na sumaryczny strumień promieniowania docierający do obiektywu kamery jest praktycznie niemożliwe. W pierwszym przybliżeniu można jednak przyjąć, że do kamery dociera głównie promieniowanie ze źródeł pokazanych na rys. 4.



Rys. 4. Źródła promieniowania podczerwonego uwzględniane w algorytmie wyznaczenia temperatury w kamerach termograficznych firmy FLIR Systems AB

Fig. 4. Sources of thermal radiation taken into account by thermal camera algorithm

Zakładając, że odbierana przez kamerę moc promieniowania W pochodzącego z ciała czarnego o temperaturze T_{ob} znajdującego się w niewielkiej odległości, powoduje wygenerowanie sygnału U_{ob} , który jest proporcjonalny do mocy W (kamera o charakterystyce liniowej), powstały sygnał elektryczny w zależności od temperatury, możemy opisać równaniem:

$$U_{ob} = cW(T_{ob}), \quad (5)$$

gdzie c jest stałą.

Gdy źródło promieniowania jest ciałem szarym o emisyjności ε , to wypromieniowana moc przez obserwowaną powierzchnię jest równa εW . Zgodnie z oznaczeniami na rys. 3, można wyróżnić trzy składniki mocy promieniowania docierającego do obiektywu kamery:

1. Promieniowanie powierzchni obiektu $\varepsilon \tau W_{ob}$, gdzie ε jest emisyjnością obiektu, a τ jest współczynnikiem przepuszczalności atmosfery. Temperatura obiektu wynosi T_{ob} .
2. Promieniowanie odbite od obiektu, pochodzącego ze źródeł będących w jego otoczeniu $(1-\varepsilon) \tau W_t$, gdzie $(1-\varepsilon)$ jest współczynnikiem odbicia powierzchni. Temperatura źródeł w otoczeniu wynosi T_t . W rozważaniach emisyjność otoczenia przyjęto równą 1. Założenie takie jest poprawne, bowiem ośrodek jest nieograniczony.
3. Promieniowanie własne atmosfery $(1-\tau)W_a$, gdzie $(1-\tau)$ jest emisyjnością atmosfery. Temperatura atmosfery wynosi T_a . Całkowitą gęstość moc promieniowania odbieraną przez kamerę można więc zapisać w postaci:

$$W_c = \varepsilon \tau W_{ob} + (1-\varepsilon) \tau W_t + (1-\tau) W_a. \quad (6)$$

Po wymnożeniu przez stałą c i zastąpieniu iloczynów cW odpowiednimi wartościami odpowiednich napięć U uzyskujemy:

$$U_c = \varepsilon \tau U_{ob} + (1-\varepsilon) \tau U_t + (1-\tau) U_a, \quad (7)$$

gdzie: U_c to całkowity sygnał a U_{ob} , U_t , U_a to składowe sygnały całkowitego wywołane promieniowaniem obiektu, tła i atmosfery.

Rozwiązując powyższe równanie ze względu na U_{ob} otrzymamy:

$$U_{ob} = \frac{1}{\varepsilon \tau} U_c - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_t - \frac{1-\tau}{\varepsilon \tau} U_a. \quad (8)$$

W przypadku małych odległości można przyjąć $\tau=1$ i w takim przypadku wyrażenie (8) redukuje się do:

$$U_{ob} = \frac{1}{\varepsilon} U_c - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_t. \quad (9)$$

Obliczone napięcie można przekształcić w wartość rzeczywistej temperatury obiektu. Zależność (9) można także określić jako charakterystykę statyczną toru pomiarowego kamery termowizyjnej, według której przeprowadzana jest kalibracja kamery. Charakterystyka ta w rzeczywistości jest nieliniowa i może być inna dla każdego egzemplarza kamery termowizyjnej.

W przypadku pomiaru temperatury powierzchni o małej wartości współczynnika emisyjności oraz w temperaturach zbliżonych do temperatury otoczenia, szczególnego znaczenia nabiera promieniowanie odbite zależne od temperatury T_t . Istotnym warunkiem wykonania poprawnego pomiaru jest więc wpisanie, w nastawach kamery, właściwej temperatury referencyjnej (otoczenia). Znajomość temperatury atmosfery jest natomiast istotna w przypadku pomiarów przy dużych odległościach kamery od powierzchni mierzonej.

W czasie pomiarów temperatury sektorów badanego promiennika wartości temperatury referencyjnej szacowano poprzez termowizyjny pomiar temperatury powierzchni cienkiej folii aluminiowej, ustawionej pod identycznym do kierunku pomiaru kątem, jak powierzchnia mierzona. Powierzchnia folii była nieregularna, aby odbite od tej powierzchni promieniowanie nie miało charakteru odbicia kierunkowego. Pomiaru temperatury sektorów promiennika dokonywano przy ustawieniu w kamerze wartości emisyjności równej 1.

Uśrednioną emisyjność powierzchni sektorów promiennika obliczono za pomocą oprogramowania ThermagramPro, wprowadzając wartości temperatury zmierzone metodą stykową.

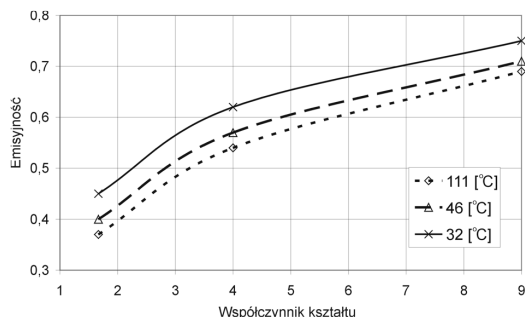
4. Badania laboratoryjne

Do wytworzenia struktury grzebieniowej promiennika podczerwieni zastosowano obróbkę elektroerozyjną WEDM. Jest to technologia polegająca na wycinaniu drutem o małej średnicy 100µm do 250µm. Obróbka jest wykonywana na materiałach przewodzących prąd elektryczny w ośrodku roboczym o właściwościach dielektryka (np. woda destylowana). Usuwanie materiału następuje przez okresowe wyładowania iskrowe lub wyładowania w łuku elektrycznym pomiędzy przedmiotem i narzędziem. Fotografie mikroskopowe struktury grzebieniowych wytworzonych metodą WEDM przedstawiono na rys. 2.

W celu opracowania odpowiedniego zestawu powierzchni promienników przeprowadzono badania emisyjności promienników wytworzonych w płytach ze stali nierdzewnej, duralu oraz miedzi. Zaobserwowano, że zmiany efektywnych emisyjności można dodatkowo regulować dobierając materiał stosowany do pasywacji powierzchni struktur grzebieniowych.

Przykładową rodzinę charakterystyk temperaturowych, w zakresie 32°C÷111°C, przedstawiającej zmiany efektywnego współ-

czynnika emisyjności w kierunku normalnym do powierzchni struktury grzebieniowej wykonanej ze stali nierdzewnej pokazano rys. 5.

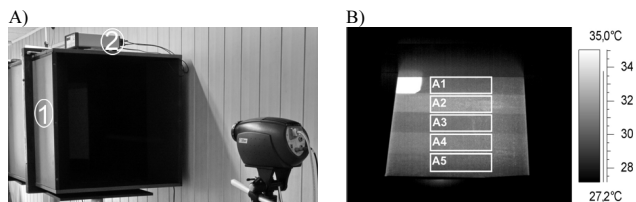


Rys. 5. Zmiana efektywnej emisyjności mikrowęglowych struktur promienników podczerwieni wykonanych w stali nierdzewnej w funkcji współczynnika kształtu i temperatury

Fig. 5. Emissivity of steel microcavity IR source vs. shape coefficient (for different temperatures)

Powierzchnia stali nierdzewnej po obróbce elektroerozyjnej staje się powierzchnią chropowatą o współczynniku emisyjności około 0.3, który jest istotnie większy od emisyjności płaskiej, wypolerowanej powierzchni metalu. Współczynnik efektywnej emisyjności mierzono kamerą termowizyjną. Jego wartość szybko rośnie ze wzrostem współczynnika kształtu $\chi=h/w$, i od wartości $\chi \approx 10$, asymptotycznie zmierza do jedności, niezależnie od temperatury struktury. Obserwowane obniżenie efektywnej emisyjności ze wzrostem temperatury promienników wynika z metody pomiaru tej wielkości. Następuje ono w wyniku spadku udziału odbitego promieniowania tła w całkowitej mocy wypromieniowanej przez badaną powierzchnię.

Dla potrzeb badania porównawczego kamer i celowników termowizyjnych zaprojektowano, zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3, pięciosektorowy promiennik podczerwieni do wytwarzania kontrastu termicznego- rys. 6A).



Rys. 6. Pięciosektorowy promiennik podczerwieni do wytwarzania kontrastu termicznego na stanowisku pomiarowym-A); osłona termiczna-1, różnicowy miernik temperatury-2, termogram wielosektorowego promiennika podczerwieni-B)

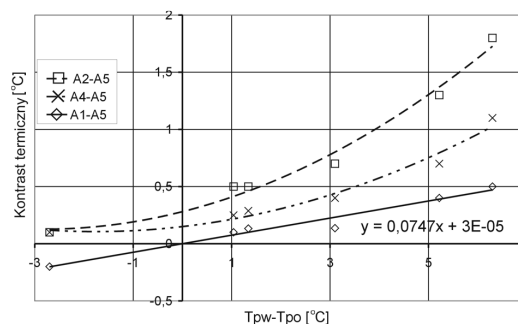
Fig. 6. A) Five-sector IR source on a test stand: 1-thermal insulation, 2- differential temperature sensor; B) Thermal image of multisector IR source

Do stabilizacji temperatury płyty promiennika oraz temperatury osłony termicznej zastosowano regulatory PID z termometrycznymi czujnikami temperatury Pt100 klasy A. Termogram powierzchni sąsiadujących ze sobą struktur grzebieniowych monolitycznego promiennika podczerwieni z zaznaczonymi prostokątnymi obszarami, uwzględnianymi w obliczeniach kontrastu termicznego, pokazano na rys. 6B).

Aby ocenić możliwości przestrajania kontrastu termicznego zmieniano temperaturę promiennika T_{pw} i temperaturę osłony termicznej T_{po} w zakresie od 25 °C do 35 °C. Uzyskane przebiegi przestrajania kontrastu termicznego w zakresie zmian różnicy temperatur $T_{pw}-T_{po} \in (-3^{\circ}C, +6^{\circ}C)$ przedstawia rys. 7.

Z uzyskanych charakterystyk widać, że istnieje możliwość takiego doboru współczynników kształtów grzebieniowych struktur mikrowęglowych, która umożliwia przestrajanie kontrastu sąsiadujących ze sobą sektorów w pobliżu zera od wartości ujemnych do dodatnich. Jak wykazały badania [8], przy temperaturach pro-

mienników rzędu 40 °C można uzyskać nierównomierności rozkładów temperatury w obszarach sektorów promienników mikrowęglowych rzędu 70 mK.



Rys. 7. Przebiegi zmian kontrastu termicznego pięciosektorowego promiennika podczerwieni

Fig. 7. Thermal contrast between particular sectors vs. temperature difference between IR source and surroundings

5. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że korzystając z obróbki metali metodą elektroerozyjną WEDM można wytworzyć grzebieniowe mikrostruktury, przydatne do wytworzenia wielosektorowych promienników podczerwieni. Emisyjność wytworzonych tą metoda mikrostruktur grzebieniowych jest funkcją współczynnika kształtu. Dobierając jego wartość można zmieniać ich efektywną emisyjność w zakresie od 0.3 do 0.8.

Umieszczenie wielosektorowego promiennika podczerwieni w odpowiednio zaprojektowanej osłonie termicznej umożliwia przestrajanie kontrastu sąsiadujących ze sobą sektorów w pobliżu zera, od wartości ujemnych do dodatnich z rozdzielczością bliską 100mK.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 - 2010 jako projekt badawczy.

6. Literatura

- [1] Rock W., Roque L.: A new approach to FLIR MRTD testing, AUTOTESTCON apos; 92. IEEE Systems I. Readiness Technology Conference, Conference Record, Volume , Issue , 21-24 Sep 1992, 449 – 453.
- [2] Sala A.: Radiant properties of materials, Elsevier - PWN, 1986.
- [3] Modest M. F.: Radiative Heat Transfer, Academic Press/Elsevier Science, Oxford 2003.
- [4] Zhang H., Dai J. M., Sun X. G.: Research on radiant source for infrared image calibration”, J. of Physics: 2. Conference Series, 48, 1053÷1057.
- [5] Clausen S.: Spectral emissivity of surface black body calibrators, Int. J. Thermophysics, 28, 2145÷2154, 2007. 7.
- [6] Polakowski H., Hots N., Piątkowski T.: Multi-cavity grey body for testing and calibration of pyrometers, 3. Advanced Infrared Technology and Applications AITA 9, Leon (8-12.10.2007), conference proceedings 2008, 249 – 254.
- [7] Panas A. J., Sypek J.: Validation of the Thermal Diffusivity From Modified Monotonic Heating Regime Procedure. 11. Int. J. of Thermophysics, Vol. 27, November 2006, 1844,1858.
- [8] H. Polakowski, T. Piątkowski, Z. Zaranski, A. Panas: Structural Tests for IR Measurements, Advanced Infrared technology and Application, – Conference Abstracts, Florencia, Włochy 2009.