

Marcin KAŁUŻA, Bogusław WIĘCEK
POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI

Zastosowanie pierścieni pośrednich w badaniach termowizyjnych

Dr inż. Marcin KAŁUŻA

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. Prowadzi badania nad spiralnymi cewkami scalonymi oraz nad zastosowaniami kamer termowizyjnych do badań układów scalonych i struktur półprzewodnikowych. Zainteresowania naukowe: modelowanie i zastosowania spiralnych cewek scalonych, termowizja, sensory. Od 2008 roku pracuje w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej.



e-mail: marcin.kaluza@p.lodz.pl

Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Bogusław Więcek specjalizuje się w dziedzinie termografii komputerowej i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermogrametry oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczewieni” – TTP.



e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

Streszczenie

Kamery termowizyjne są od lat jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanych do badań zjawisk termicznych w wielu różnych dziedzinach nauki i techniki. Ze względu na wykorzystywane długości fal, najczęściej 3-5 μm lub też 7-14 μm , kamery termowizyjne nie mogą korzystać ze standardowych obiektywów ze szkła krzemowego. Konieczne jest stosowanie drogich elementów optycznych, wykonywanych np. z germanu lub też szafiru. Chcąc stosować kamerę termowizyjną do zróżnicowanych zadań, począwszy od obserwacji odległych przedmiotów, poprzez badania stanu izolacji termicznej budynków, badania maszyn i urządzeń, a kończąc na mikroskopowych badaniach elementów elektronicznych, konieczne staje się wyposażenie kamery termowizyjnej w cały zestaw obiektywów, począwszy od obiektywów teleskopowych, aż po obiektywy mikroskopowe. Celem badań opisanych w niniejszym artykule było sprawdzenie możliwości zastosowania w badaniach termowizyjnych pierścieni pośrednich.

Słowa kluczowe: pomiary termowizyjne, pierścieni pośredni, obiektyw.

Application of extension tubes to thermographic measurements

Abstract

Infrared cameras has been used for years as one of the main tools for temperature measurements. Because of wavelengths employed (3-5 μm or 7-14 μm), infrared cameras cannot use standard lenses made of silicon glass. It is necessary to rely on expensive optical materials such as germanium or sapphire. When using an infrared camera for different tasks, such as observation of distant objects, evaluation of buildings thermal insulation, thermal measurements of transformers, power lines, thermal investigations of electronic circuits, one has to use a wide range of lenses, from telescopic to microscopic. The goal of the research was to investigate the possibility of using extension tubes for thermography for imaging objects of sizes comparable to the detector matrix pixel pitch. The general problems of macrophotography are presented in the introduction. The second section describes the physical phenomena and effects to be taken into account when adding an extension tube to infrared camera lens which are the modification of the imaged object – lens – detector matrix geometry leading to the changes of the configuration factor; the influence of the radiation coming from the extension tube itself and finally, the problem of the imaged detail size becoming comparable to the wavelength used by the detector matrix. Next, in the third section, there are presented the results of measurements taken with a MWIR camera, using various combinations of 4 extension tubes. The fourth section contains the conclusions based on the presented measurement results. Extension tubes are an interesting alternative to microscopic lenses, especially in case of measurements for which only the signal phase is of interest. In general, extension tubes appear to be an interesting tool but it should be noted that the additional camera calibration may be needed when using them, depending on the tube length, the imaged object placement in relation to the lens axis and the measured object temperature in order to avoid temperature measurement errors.

Keywords: thermographic measurements, extension tube, camera lens.

1. Wstęp

Makrofotografia to dział fotografii, w której fotografowany obiekt zostaje odwzorowany w naturalnych rozmiarach lub też jest powiększony. Na ogół przyjmuje się, że zakres powiększenia dla makrofotografii waha się w granicach od 1:1 do 10:1. Większe powiększenia uzyskuje się stosując mikroskopy i mówimy wtedy o mikrofotografii.

Aby uzyskać wystarczająco duże powiększenie, konieczne jest najczęściej duże przybliżenie aparatu do fotografowanego obiektu. W makrofotografii, odległość ta nie przekracza zazwyczaj 30 cm. Uzyskanie tak dużego zbliżenia można uzyskać na kilka sposobów. Można zastosować specjalny obiektyw do makrofotografii. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie standardowego obiektywu, zamocowanego odwrotnie za pomocą tzw. pierścienia odwrotnego mocowania. Kolejnym sposobem jest użycie soczewek nasadkowych (soczewki dodatnie), skracających ogniskową obiektywu. Soczewki te są mocowane bezpośrednio na przedniej soczewce obiektywu. Ostatnim ze stosowanych rozwiązań jest zamontowanie pomiędzy korpusem aparatu oraz standardowym obiektywem regulowanego mieszka wyciągowego lub też pierścieni pośrednich, nazywanych potocznie pierścieniami makro.

Podstawowym problemem, jaki występuje przy makrofotografii jest mała głębia ostrości. Z tego względu bardzo ważne jest precyzyjne ustawienie ostrości układu optycznego i odległości obrazowanego przedmiotu od obiektywu aparatu. Stosowanie mieszek wyciągowych lub też pierścieni pośrednich prowadzi zawsze do zmniejszenia ilości światła padającego na błonę światłoczułą lub też detektor, a więc do zwiększenia przesłony. Należy również liczyć się z wystąpieniem zjawiska winietowania.

W ramach badań opisanych w niniejszym artykule, postanowiono sprawdzić, czy możliwe jest zastosowanie mieszka wyciągowego lub też pierścieni pośrednich w badaniach lub też pomiarach termowizyjnych. Z przyczyn technicznych, czyli braku dostępności mieszka o wystarczająco dużej średnicy i trudności z jego wykonaniem, badania ograniczono wyłącznie do pierścieni pośrednich.

2. Współczynnik konfiguracji

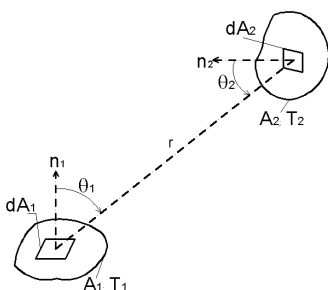
Dla dwóch izotermicznych powierzchni oddzielonych niepochlaniającym medium, wymianę ciepła q_{12} pomiędzy nimi, zachodzącą w wyniku promieniowania, można opisać za pomocą równania [1-4]:

$$q_{12} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

gdzie: T_1 – temperatura pierwszej powierzchni, T_2 – temperatura drugiej powierzchni, $F_{1 \rightarrow 2}$ bezwymiarowy współczynnik konfiguracji, A_1 – pole powierzchni emitującej, natomiast σ jest stałą Stefana-Boltzmann. Współczynnik konfiguracji dla dwóch skończonych powierzchni można zdefiniować za pomocą ogólnego wzoru [1]:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2, \quad (2)$$

gdzie: A_1 – pole powierzchni A_1 widziane przez powierzchnię A_2 , A_2 – pole powierzchni A_2 widziane przez powierzchnię dA_1 , r – długość linii łączącej powierzchnie cząstkowe dA_1 oraz dA_2 , θ_1 – kąt pomiędzy linią r oraz wektorem normalnym do powierzchni cząstkowej dA_1 , θ_2 – kąt pomiędzy linią r oraz wektorem normalnym do powierzchni cząstkowej dA_2 .



Rys. 1. Współczynnik konfiguracji; na podstawie [2]
Fig. 1. Configuration factor; based on [2]

Współczynnik konfiguracji $F_{1 \rightarrow 2}$ (ang. *configuration factor*, *view factor* lub też *shape factor*) określa, jaka część promieniowania cieplnego, emitowanego przez powierzchnię 1, pada na powierzchnię 2. Podobnie, współczynnik konfiguracji $F_{2 \rightarrow 1}$ określa, jaka część promieniowania cieplnego, emitowanego przez powierzchnię 2, pada na powierzchnię 1. Współczynniki są zależne od geometrii układu i wzajemnego usytuowania powierzchni. Dodatkowo w celu określenia energii jaka jest przenoszona między ciałami wymagana jest znajomość emisyjności powierzchni oraz ich zdolności do pochłaniania promieniowania. Wzory na współczynniki konfiguracji dla różnych geometrii układów powierzchni A_1 oraz A_2 zostały zebrane w [1, 2]. Dla współczynników $F_{1 \rightarrow 2}$ oraz $F_{2 \rightarrow 1}$ spełniona jest zależność:

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}, \quad (3)$$

W standardowej konfiguracji, tj. w przypadku kamery wyposażonej w obiektyw bez pierścieni pośrednich mamy do czynienia ze skalibrowanym przyrządem pomiarowym. Dodanie pierścieni pośrednich powoduje zmianę geometrii całego układu. Zmniejszeniu ulegnie odległość pomiędzy obiektywem i obrazowanym obiektem, a równocześnie zwiększona zostanie odległość pomiędzy obiektywem i matrycą detektorów. Ponadto, umieszczenie metalowych pierścieni w przestrzeni pomiędzy matrycą i obiektywem kamery spowoduje, że na detektor będzie padało nie tylko promieniowanie podczerwone przechodzące przez obiektyw, ale i dodatkowo, promieniowanie emitowane bezpośrednio przez same pierścienie. Współczynnik konfiguracji dla układu pierścieni – piksel detektora (patrz rys. 2) można w przybliżeniu opisać wzorem [1]:

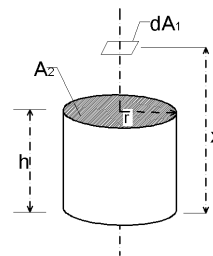
$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{1 + R^2} \frac{(1 - H)^2}{(1 - H)^2 + R^2}, \quad \text{dla } H < 1 \quad (4)$$

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{1 + R^2}, \quad \text{dla } H \geq 1 \quad (5)$$

gdzie:

$$H = h / x, \quad (6)$$

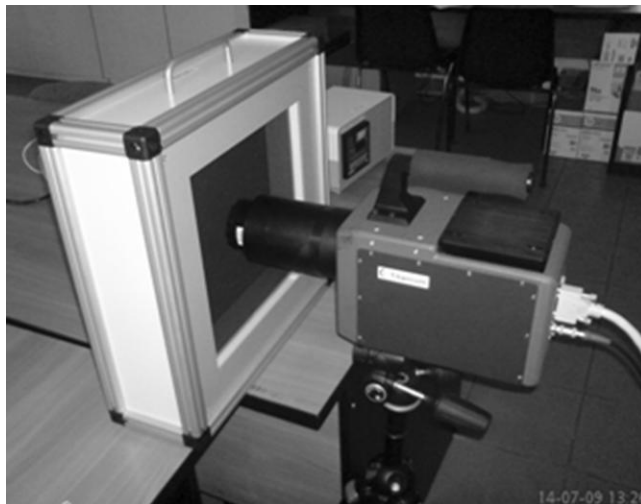
$$R = r / x. \quad (7)$$



Rys. 2. Współczynnik konfiguracji: układ pierścieni - detektor
Fig. 2. Configuration factor: cylinder – detector configuration

3. Pomiary

Do badań wykorzystano kamerę Cedip Titanium (rys. 3), wyposażoną w chłodzoną matrycę InSb o rozdzielczości 640 x 512 pikseli, o rozmiarze piksela wynoszącym 15 μm . Kamera była wyposażona w obiektyw o ogniskowej $f = 50$ mm i przesłonie $F=2$, umożliwiającą „ostrzenie” od 30 cm do nieskończoności. Średnica zewnętrznej soczewki obiektywu wynosiła 48 mm, natomiast średnica wewnętrznej soczewki obiektywu wynosiła 34 mm. Przy maksymalnym wysunięciu obiektywu, płaszczyzna matrycy znajdowała się 52 mm od powierzchni wewnętrznej soczewki obiektywu. Skok regulacji obiektywu wynosił 13 mm. Z aluminium wykonano 3 pierścienie pośrednie o średnicy zewnętrznej 89 mm, średnicy wewnętrznej 75 mm i długości odpowiednio, pierścien nr 2 – 30 mm, pierścien nr 3 – 30 mm, pierścien nr 4 – 60 mm. Dostępny był również fabryczny pierścien nr 1 o długości 12 mm. W celu zapewnienia maksymalnej wartości współczynnika emisyjności, wszystkie pierścienie zostały poddane procesowi anodowania (rys. 4).



Rys. 3. Układ pomiarowy. Ciało doskonale czarne opracowane i wypożyczone przez Instytut Optoelektroniki WAT
Fig. 3. Measurement setup. Black body designed and made available by the Institute of Optoelectronics MUT

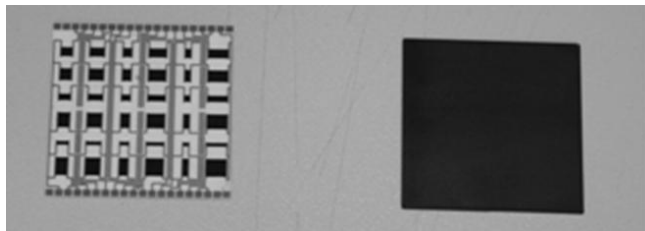


Rys. 4. Pierścienie pośrednie
Fig. 4. Extension tubes

Tab. 1. Zastosowane w trakcie pomiarów kombinacje pierścieni pośrednich
Tab. 1. Configuration of extension tubes used for measurements

| Lp. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------------------|------|----|----|-----|----|-----|-----|-------|-------|---------|
| Pierścienie | brak | 1 | 2 | 1+2 | 4 | 1+4 | 2+4 | 1+2+4 | 2+3+4 | 1+2+3+4 |
| Sumaryczna długość pierścieni [mm] | 0 | 12 | 30 | 42 | 60 | 72 | 90 | 102 | 120 | 132 |

Wykorzystując ciało doskonale czarne jako źródło promieniowania, przeprowadzono pomiary temperatury widzianej przez kamerę dla 9 kolejnych kombinacji pierścieni montowanych pomiędzy obiektywem i obudową kamery (tabela 1) oraz dla układu bez pierścieni. Dla każdej kombinacji pierścieni zmierzono także odległość od obiektywu do powierzchni ciała doskonale czarnego, dla której możliwe było uzyskanie ostrego obrazu (patrz tabela 2). Zgodnie z oczekiwaniami, wydłużanie pierścienia powodowało zmniejszenie głębi ostrości, a co za tym idzie, coraz mniejszy był zakres odległości, dla których możliwe było poprawne ustawienie ostrości. W krańcowym przypadku – komplet 4 pierścieni – wymagana dokładność ustawienia odległości nie przekraczała 1 mm. Uzyskanie ostrego obrazu dodatkowo utrudniał fakt, że obserwowana powierzchnia była jednorodna. Problem ten rozwiązano, stosując jako wzorzec małą ceramiczną płytkę, zawierającą na swojej powierzchni metalowe ścieżki (rys. 5). Płytkę tą wykorzystano również jako element wzorcowy do obliczenia rozdzielczości na piksel, uzyskiwanej dla poszczególnych kombinacji pierścieni pośrednich (tabela 3).



Rys. 5. Ceramiczna płytka wzorcowa (z lewej) oraz gładka ceramiczna płytka pokryta czarnym, matowym lakierem
Fig. 5. Ceramic gauge plate (left) and smooth ceramic plate covered with black mate paint (right)

Tab. 2. Odległość obiektyw – ciało doskonale czarne, dla której uzyskano ostry obraz
Tab. 2. Distance camera lens – black body, for which a sharp image was obtained

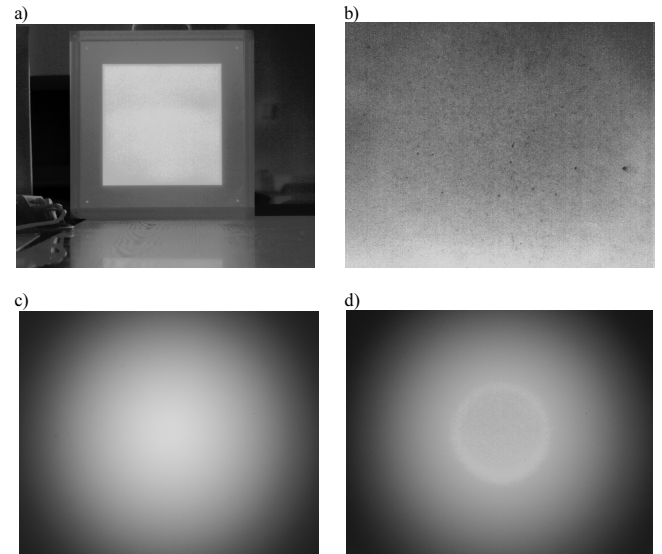
| Lp. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|--------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|---------|
| Pierścienie | brak | 1 | 2 | 1+2 | 4 | 1+4 | 2+4 | 1+2+4 | 2+3+4 | 1+2+3+4 |
| Odległość obiektyw – ciało doskonale czarne [cm] | min 30 | 21,5 | 10,8 | 7,5 | 5,5 | 4,5 | 3,9 | 3,5 | 3,1 | 2,8 |

Tab. 3. Obliczona rozdzielczość uzyskana po założeniu pierścieni pośrednich
Tab. 3. Calculated resolution when using extension tubes

| Lp. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------|------|----|----|-----|----|-----|-----|-------|-------|---------|
| Pierścienie | brak | 1 | 2 | 1+2 | 4 | 1+4 | 2+4 | 1+2+4 | 2+3+4 | 1+2+3+4 |
| Rozdzielczość [µm/piksel] | 88 | 44 | 22 | 17 | 13 | 11 | 9 | 8 | 7 | 6 |

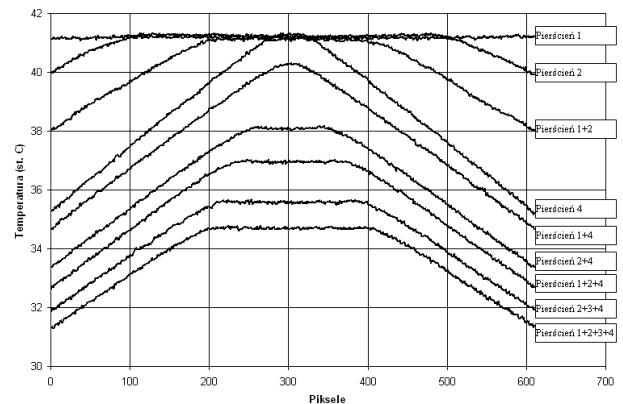
Pomiary przeprowadzono dla różnych temperatur. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe termogramy uzyskane dla temperatury ciała doskonale czarnego, wynoszącej 41°C. Dla każdej kombinacji pierścieni pośrednich i uzyskanego termogramu wykreślono przebieg temperatury wzdłuż poziomej linii biegnącej przez śro-

dek obrazowanej powierzchni. Uzyskane w ten sposób przekroje przedstawiono na rysunku 6.

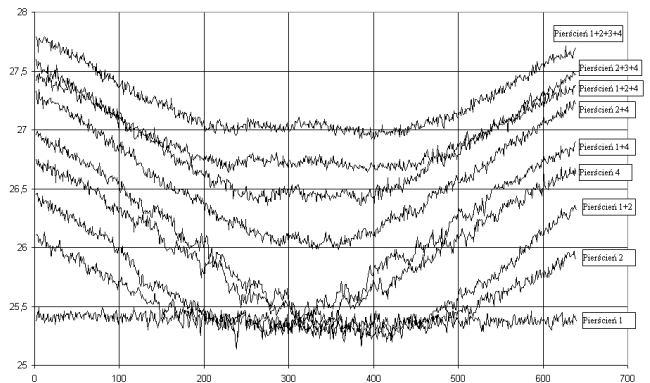


Rys. 6. Przykładowe termogramy ciała doskonale czarnego (41°C).
a) bez pierścieni; b) pierścień nr 1; c) pierścień nr 4;
d) pierścieni nr 1+2+3+4;

Fig. 6. Infrared images of black body (41°C).
a) without tubes; b) extension tube no 1; c) extension tube no 4;
d) extension tube no 1+2+3+4;

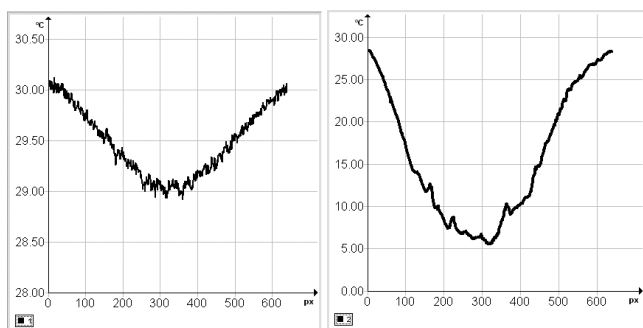


Rys. 7. Przebiegi temperatury dla poziomych przekrojów przez obrazowaną powierzchnię ciała doskonale czarnego (41°C)
Fig. 7. Temperature diagrams for horizontal cross-sections across the imaged black-body surface (41°C)



Rys. 8. Przebiegi temperatury dla poziomych przekrojów przez obrazowaną powierzchnię czarnej ceramicznej płytki (temperatura pokojowa)
Fig. 8. Temperature diagrams for horizontal cross-sections across the imaged black ceramic plate surface (ambient temperature)

Na zakończenie przeprowadzono, w temperaturze pokojowej, pomiary temperatury materiałów o różnej emisyjności, m.in. ceramicznej płytki pokrytej czarną matową farbą (patrz rys. 5) oraz dla aluminiowej płytki. Komplet uzyskanych przebiegów temperatury dla płytki ceramicznej przedstawiono na rysunku 8. Widoczne na rysunku zaszumienia są wynikiem niewidocznej gołym okiem struktury (niejednorodności) nałożonej na płytkę powłoki lakierniczej, która ujawniła się w obrazie termograficznym jej powierzchni.



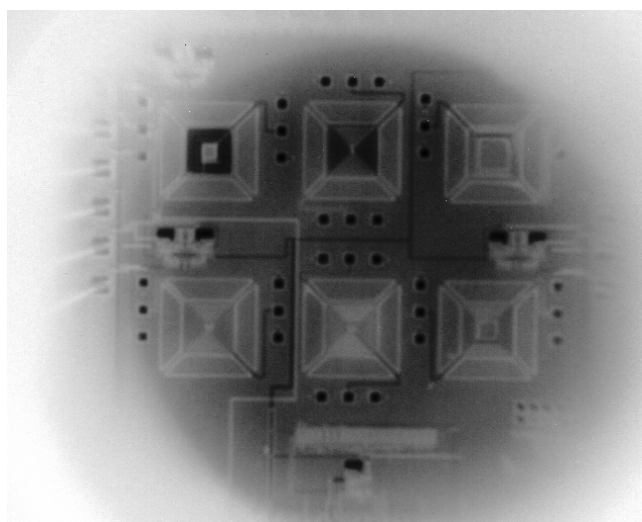
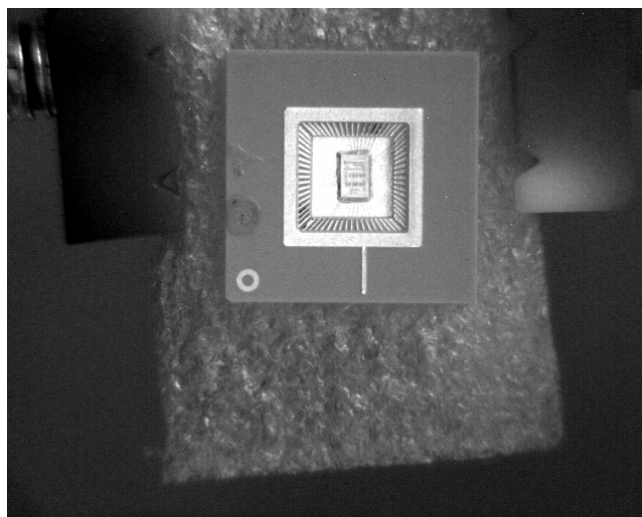
Rys. 9. Przebiegi temperatury w temperaturze pokojowej dla czarnej ceramicznej płytki (z lewej strony) oraz dla płytki aluminiowej (z prawej strony); użyto pierścieni nr 4

Fig. 9. Temperature diagrams at room temperature for: black ceramic (left) and aluminum (right) plate; extension tube no 4 was used

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie wyników pomiarów uzyskanych w temperaturze pokojowej dla czarnej ceramicznej płytki (duża wartość współczynnika emisyjności) oraz dla płytki wykonanej z aluminium (mała wartość współczynnika emisyjności), przy zastosowaniu pierścienia nr 4 (60 mm). Przedstawione wyniki stanowią dowód na wpływ promieniowania pierścienia na wynik pomiarów. Jest on tym większy, im mniejsza jest emisyjność badanego obiektu. Ponadto stwierdzono, że w przypadku użytej kamery wpływ ten jest dodatkowo potęgowany przez nieznaczne nagrzewanie się samego pierścienia w trakcie wykonywania pomiarów.

4. Wnioski

Podobnie, jak w przypadku makrofotografii, założenie pierścieni pośrednich pomiędzy obiektywem oraz obudowę kamery termowizyjnej pozwoliło na znaczne powiększenie obrazowanych przedmiotów i pomiary zjawisk mikroskopowych, bez konieczności stosowania obiektywu mikroskopowego. Zastosowanie pierścieni wpływa jednak na konfigurację układu pomiarowego. Dla kolejnych układów pierścieni, dla których odległość pomiędzy obiektywem oraz badanym obiektem była większa od ogniskowej użytego obiektywu pomiar temperatury w osi obiektywu pozwalała uzyskać wyniki zbliżone z wynikami pomiarów bez pierścieni. W miarę dodawania kolejnych pierścieni obszar w środku matrycy detektorów, w który uzyskiwano poprawny wynik pomiaru malał. Im bliżej krawędzi matrycy detektorów, tym błąd pomiaru był coraz większy. Dla odległości obiektyw – ciało doskonale czarne zbliżonej do wartości ogniskowej obiektywu przekrój mierzonej temperatury przyjął postać stożka (patrz rys. 7). W miarę dalszego zwiększania sumarycznej długości zastosowanego pierścienia, zaobserwowano wzrost różnicy pomiędzy ustawioną temperaturą ciała doskonale czarnego oraz temperatura zmierzona za pomocą kamery. Jeśli temperatura badanego obiektu była zbliżona do temperatury pokojowej i/lub też wartość jego współczynnika emisyjności była mała źródłem dodatkowych błędów było promieniowanie emitowane przez same pierścienie, które nakładało się na promieniowanie obrazowanego obiektu transmitowane przez obiektyw kamery (rys. 8-9).



Rys. 10. Widok testowego układu scalonego (góra – bez pierścieni, dół – komplet 4 pierścieni). Rozmiary struktury scalonej 2 x 3 mm. Rozmiar pojedynczej cewki scalonej 300 x 300 μm

Fig. 10. Image of test integrated circuit (upper - without extension tubes, lower - with the complete set of 4 tubes). Size of semiconductor circuit – x 3 mm. Size of a single spiral inductor 300 x 300 μm

Zastosowanie pierścieni pośrednich w pomiarach termowizyjnych stanowi interesującą alternatywę wobec obiektywów mikroskopowych, pozwalając uzyskać duże powiększenia i obrazować elementy o rozmiarach mikroskopowych (rys. 10). Korzystając z pierścieni, należy jednak pamiętać o tym, że wpływają one na konfigurację całego układu pomiarowego i same są źródłem dodatkowego promieniowania padającego na matrycę detektorów. Pierścienie można uznać za interesujące narzędzie, ale należy zachować ostrożność w ich wykorzystaniu i zrozumieć ich ograniczenia.

5. Literatura

- [1] J. R. Howell, „Catalog of radiation configuration factors”, wyd. Institute for Public Policy Research.
- [2] R. Siegel, J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Taylor and Francis, Hemisphere Publishing Corporation, ISBN 0-89116-271-2, 1992.
- [3] E. Kostowski, Promieniowanie ciepłe, PWN, Warszawa 1993, ISBN 83-01-10847-9.
- [4] G. Gaussorgues, Infrared Thermography, Microwave Technology Series 5, Chapman and Hall, London, 1994.