

Nowatorskie pokrycia powierzchni ciał czarnych dla zakresu dalekiej podczerwieni

Andrzej Ligienza, Grzegorz Bieszczad, Tomasz Sosnowski, Bartosz Bartosewicz, Krzysztof Firmanty
Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Streszczenie: Źródła promieniowania ciała doskonale czarnego są powszechnie stosowanymi urządzeniami w dziedzinach związanych z obrazowaniem termicznym i radiometrią. Stanowią najbliższe fizyczne przybliżenie teoretycznego emitera ciała doskonale czarnego wyprowadzonego z prawa Plancka. Większość takich urządzeń jest kosztowna, a informacje o technologii ich wytwarzania, w tym o powierzchni emitera, są ograniczone. Wybrano kilka stosunkowo łatwo dostępnych powłok mających potencjalne zastosowanie w tego typu urządzeniach i zmierzono ich emisyjność. W pracy przedstawiono pomiary, które dostarczają informacji niezbędnych do określenia, czy wśród wybranych istnieją powłoki zdatne do emitowania lub powierzchni odniesienia.

Słowa kluczowe: ciało czarne, termowizja, emisyjność

1. Wprowadzenie

W technice podczerwieni i termowizji bardzo często w opisie zjawisk oraz ocenie parametrów urządzeń stosuje się pojęcie ciała doskonale czarnego, które emituje promieniowanie zgodnie z prawem Plancka. Rozkład widmowy egzytancji energetycznej (emitancji) ciała czarnego w funkcji długości fali λ można przedstawić za pomocą wzoru [15, 17–19]:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (1)$$

gdzie: T – temperatura, λ – długość fali, h – stała Plancka, c – prędkość światła w próżni, k – stała Boltzmanna.

Ciało doskonale czarne w rzeczywistości nie istnieje, jednak potrzeba pomiaru parametrów kamer termowizyjnych i urządzeń podczerwieni [8, 12–14, 17, 18] spowodowała, że opracowano techniczne ciała doskonale czarne, o parametrach zbliżonych do wyidealizowanego wzorca. Techniczne ciało doskonale czarne jest ważnym przyrządem w pomiarach parametrów urządzeń w zakresie średniej MWIR (3–5 μm) i dalekiej LWIR (8–14 μm) podczerwieni.

Autor korespondujący:

Tomasz Sosnowski, tsosnowski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 16.06.2021 r., przyjęty do druku 14.10.2021 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

2. Budowa technicznego ciała doskonale czarnego

W technice podczerwieni i termowizji stosuje się różnego rodzaju techniczne ciała doskonale czarne [8, 13–15, 17]. Najczęściej stosowane ciała czarne to ciała wnękowe oraz ciała powierzchniowe. Ciało wnękowe najczęściej stosowane jest jako wysokotemperaturowe ciało czarne charakteryzujące się dużą stabilnością temperatury, jednorodnością promieniowania oraz względnie niewielką powierzchnią promieniującą [7, 18, 19]. Powierzchniowe ciała czarne są stosowane w przypadku, gdy temperatura ciała jest z zakresu temperatury otoczenia (najczęściej od -40 °C do 60 °C) oraz niezbędna jest większa powierzchnia promieniująca. Powierzchniowe ciała czarne są powszechnie stosowane do oceny i pomiaru parametrów kamer termowizyjnych oraz do kalibracji i wyznaczania wartości współczynników korekcji niejednorodności w zakresie bliskiej (SWIR), średniej (MWIR) i dalekiej podczerwieni (LWIR) [8, 13–15, 17].

Zasadniczymi parametrami ciała doskonale czarnego jest wartość współczynnika emisyjności, jednorodność generowanego promieniowania oraz stabilność rozkładu promieniowania i temperatury w czasie. Stabilność rozkładu promieniowania w czasie uzyskuje się poprzez stabilizację temperatury powierzchni, najczęściej za pomocą kontrolerów typu PID (ang. *Proportional Integral Derivative*) oraz przez odpowiednią konstrukcję powierzchni zapewniającą dużą pojemność cieplną. Jednym z najbardziej istotnych parametrów ciała czarnego jest wartość współczynnika emisyjności ε . Teoretycznie ciało doskonale czarne pochłania całkowicie padające na nie promieniowanie, a więc wartość współczynnika ciała doskonale czarnego wynosi 1. W rzeczywistości techniczne ciało czarne nie pochłania całości padającego nań promieniowania ($\varepsilon < 1$). W związku z tym, zgodnie z prawem Kirchhoffa, część promieniowania odbija się od powierzchni ciała (dla ciał nieprzezroczystych wartość współczynnika odbicia ρ wynosi $\rho = 1 - \varepsilon$).

Generalnie na wartość mocy promieniowania emitowanego przez ciało czarne wpływ ma bardzo wiele czynników. Do najważniejszych należy zaliczyć: emisyjność powierzchni ciała ε (w

ogólności emisyjność jest funkcją długość fali oraz kąta, pod którym jest oglądany mierzony obiekt), temperaturę ciała T_{bb} , transmisję τ_{atm} i temperaturę T_{atm} atmosfery (powietrza) oraz temperaturę otoczenia T_a . Badania i pomiary w warunkach laboratoryjnych realizuje się z niewielkiej odległości, co pozwala pominać transmisję τ_{atm} i temperaturę T_{atm} atmosfery. Jednak przy tak niewielkiej liczbie parametrów i założeniu, że ciało czarne ma egzytancję $M(T_{bb})$, temperaturę T_{bb} oraz emisyjność ϵ , to uproszczony wzór określający wartość natężenia promieniowania emitowanego z powierzchni ciała czarnego ma postać:

$$M_{tot} = \epsilon M(T_{bb}) + (1 - \epsilon)M(T_a). \tag{2}$$

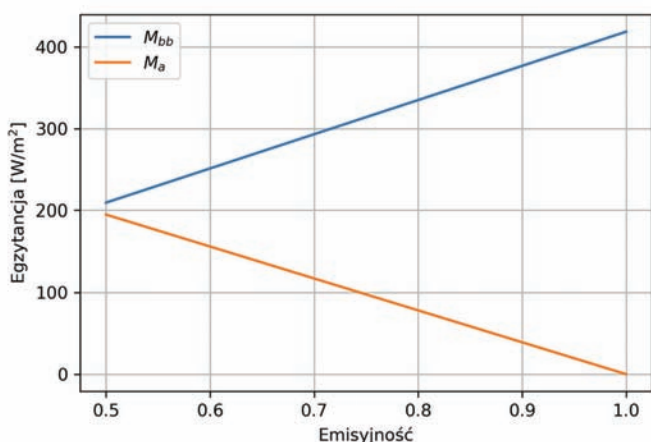
Ze wzoru (2) wynika, że promieniowanie emitowane przez ciało czarne zależy od dwóch głównych składników promieniowania własnego ciała czarnego

$$M_{bb} = \epsilon M(T_{bb}) \tag{3}$$

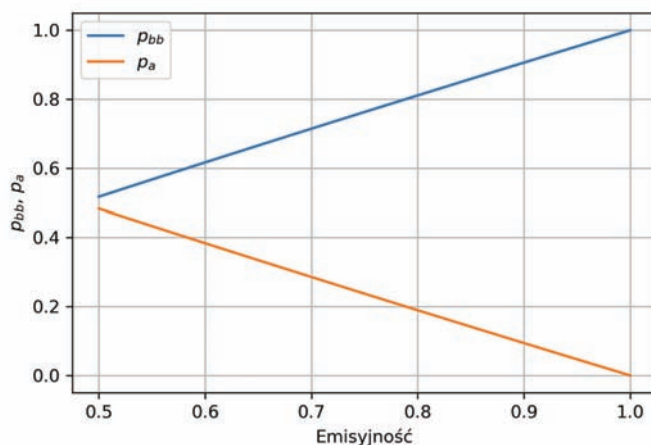
oraz promieniowania odbitego od ciała czarnego

$$M_a = (1 - \epsilon)M(T_a). \tag{4}$$

Na Rys. 1 przedstawiono, jak zmieniają się M_{bb} oraz M_a w funkcji emisyjności ciała czarnego, zaś na Rys. 2 został przedstawiony



Rys. 1. Wykres wartości składników promieniowania ciała czarnego w funkcji emisyjności dla $T_{bb} = 20\text{ °C}$ i $T_a = 15\text{ °C}$
 Fig. 1. The plot of the black body radiation constituents values depending upon emissivity value for $T_{bb} = 20\text{ °C}$ and $T_a = 15\text{ °C}$



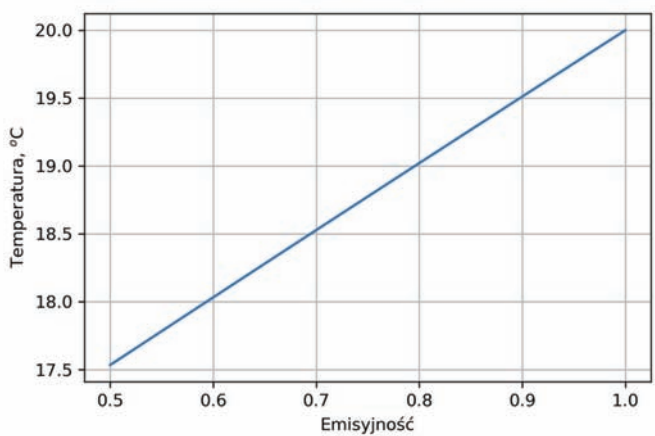
Rys. 2. Wykres względnego udziału składników promieniowania ciała czarnego w funkcji emisyjności dla $T_{bb} = 20\text{ °C}$ i $T_a = 15\text{ °C}$
 Fig. 2. The plot of the black body radiation constituents relative participation depending upon emissivity value for $T_{bb} = 20\text{ °C}$ and $T_a = 15\text{ °C}$

względny udział danego rodzaju promieniowania w odniesieniu do całkowitej mocy emitowanego promieniowania M_{tot} .

Gdyby przy wyznaczaniu temperatury ciała czarnego na podstawie promieniowania pominięto wpływ promieniowania otoczenia, to zostałaby popełniony znaczny błąd. Taką sytuację przedstawiono na Rys. 3.

W rzeczywistych pomiarach bardzo trudno ilościowo wyznaczyć, jaka moc promieniowania odbija się od powierzchni ciała czarnego. W związku z tym ciało czarne musi charakteryzować się powierzchnią o jak największej wartości emisyjności. Jednocześnie powierzchniowe ciała doskonale czarne powinny cechować się dużą jednorodnością promieniowania. W tym celu powierzchnie ciał czarnych pokrywa się specjalnymi powłokami, materiałami o wysokiej emisyjności. Istnieje wiele sposobów na wykonanie wysokoemisyjnej powłoki na powierzchni ciała czarnego. Powłoki o najwyższej jakości można osiągnąć stosując techniki powlekania próżniowego, takie jak PVD (ang. *Physical Vapor Deposition*), CVD (ang. *Chemical Vapor Deposition*), PECVD (ang. *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) [1, 5, 16, 20]. Jednak zastosowanie takich powłok jest bardzo kosztowne, w szczególności w konstrukcji powierzchniowych ciał czarnych charakteryzujących się większymi wymiarami powierzchni emitujących. Innym sposobem konstrukcji ciał czarnych jest zastosowanie powlekanych arkuszy metalu mocowanych do powierzchni emitujących. Zastosowanie tej technologii jest jednak ograniczone do powierzchni o prostej geometrii. Najbardziej uniwersalną i względnie niedrogą metodą wykonania powierzchni emitujących jest jej malowanie. Jednak najczęściej metoda ta wymaga dodatkowej obróbki mechanicznej powierzchni, np. w celu zwiększenia chropowatości, powodującej podwyższenie wartości współczynnika emisyjności.

Na rynku dostępne są powłoki i materiały silnie pochłaniające i tłumiące odbicia padającego na nie promieniowania. Materiały te wydają się człowiekowi nienaturalnie czarne i znajdują zastosowanie głównie w obszarze działań artystycznych. Ze względu na zakres stosowania materiały te były w większości badane jedynie w zakresie promieniowania widzialnego. Jednak ciała doskonale czarne stosowane są jako wzorcowe źródła promieniowania podczas badań i testowania kamer termowizyjnych, ich kalibracji lub precyzyjnych pomiarów radiometrycznych. Kamery termowizyjne pracują zazwyczaj w trzech zakresach widmowych: SWIR (1–3 μm), MWIR (3–5 μm) i LWIR (8–14 μm). W związku z tym niezbędne jest przeprowadzenie prac badawczych dotyczących wybranych materiałów w celu oceny możliwości ich zastosowania w budowie ciał czarnych dla zakresu podczerwieni.



Rys. 3. Wykres temperatury ciała czarnego wyznaczonego na podstawie promieniowania z pominięciem wpływu promieniowania otoczenia dla $T_{bb} = 20\text{ °C}$
 Fig. 3. The plot of black body temperature based on radiation measurement with omission of the environment's influence for $T_{bb} = 20\text{ °C}$

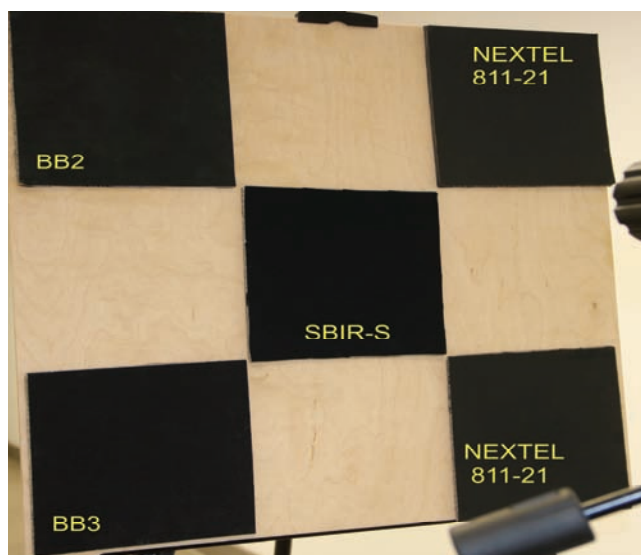
W wyniku badań przeprowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej zmierzono parametry i oceniono właściwości czterech materiałów:

- BLACK 2.0 [3] (próbka BB2),
- BLACK 3.0 [4] (próbka BB3),
- NEXTEL-Velvet-Coating 811-21 [9] (próbka NEXTEL 811-21),
- Shibuya Optical Light Exclusion Sheet Super Black IR [11] (próbka SBIR-S).

Podstawowym kryterium wyboru badanych materiałów była, deklarowana przez producenta, wysoka wartość współczynnika pochłaniania promieniowania w zakresie widzialnym. Celem prowadzonych badań była ocena wartości współczynnika emisyjności w zakresie dalekiej podczerwieni i porównania jej z innymi materiałami. Nie bez znaczenia jest, że materiał NEXTEL 811-21 został zbadany i porównany z niektórymi innymi powłokami, takimi jak Acttar Fractal Black [1]. Daje to pewien punkt odniesienia do oceny jakości powłok.

3. Stanowisko i metodyka pomiaru wartości współczynnika emisyjności

W celu przeprowadzenia badań porównawczych przygotowano znormalizowane powierzchnie, na które naniesiono powłoki z wybranych materiałów. Powierzchnie zostały wykonane ze standardowego papieru drukarskiego o gramaturze 80 g/m² naklejonego na tekturowy podkład. Wymiary przygotowanych powierzchni zostały dostosowane do spektroskopowych przyrządów pomiarowych. Powłoki o postaci płynnej farby zostały nałożone na przygotowane powierzchnie za pomocą identycznych pędzli gąbkowych w taki sposób, aby zapewnić równomierne ich rozprowadzenie na całej powierzchni. Każdą powierzchnię pokryto trzema warstwami farby, nakładanych kolejno po całkowitym wyschnięciu poprzedniej warstwy. Wyjątkiem od tej procedury przygotowania próbek badawczych był materiał SBIR-S. Powłoka SBIR-S występuje w postaci arkuszy materiału z warstwą kleju na spodniej powierzchni materiału. W związku z tym, materiał ten został naklejony na podłożu przygotowanym w taki sam sposób, jak w przypadku pozostałych próbek. Na Rys. 4 został przedstawiony widok badanych materiałów pokryć powierzchni ciała czarnego podczas pomiaru współczynników emisyjności.



Rys. 4. Zdjęcie badanych materiałów pokryć podczas pomiaru współczynnika emisyjności

Fig. 4. Photography of examined coating materials during emissivity measurement procedure

Pomiaru wartości współczynnika emisyjności powierzchni badanych przygotowanych próbek materiałów dokonano w Akredytowanym Laboratorium Badawczym w Instytucie Optoelektroniki WAT. Przygotowane próbki poddano serii pomiarów emisjometrem ET100 [10]. Widok przyrządu pomiarowego został przedstawiony na Rys. 5. Za pomocą emisjometru ET100 zmierzono bezwzględny współczynnik odbicia promieniowania podczerwonego w sześciu zakresach widmowych:

- 1,5–2,0 μm ,
- 2,0–3,5 μm ,
- 3,0–4,0 μm ,
- 4,0–5,0 μm ,
- 5,0–10,5 μm ,
- 10,5–21 μm .

Emisjometr ET100 jest zgodny z normą ASTM E408 [2] i ma dokładność $\pm 0,03$ [10].



Rys. 5. Widok emisjometru ET100

Fig. 5. The view of ET100 emissometer

W celu wykonania pomiaru emisyjności oświetla się powierzchnię badanej próbki promieniowaniem termicznym emitowanym przez żarnik Kanthala. Próbkę oświetla się pod kątem 20° i 60°. Następnie za pomocą emisjometru ET100 rejestrowane jest promieniowanie odbite od badanej próbki i na tej podstawie wyznaczane są wartości współczynników odbicia. Na podstawie dokonanych rejestracji z emisjometru ET100 można odczytać informacje o kierunkowej emisyjności termicznej przy kącie zbliżonym do normalnego (20°), przy kącie 60° oraz o całkowitej emisyjności hemisferycznej.

4. Wyniki

Dla każdej próbki materiału przeprowadzono serię pomiarów emisyjności za pomocą emisjometru ET100 w stabilnych warunkach temperaturowych przy temperaturze otoczenia 20 °C. W celu minimalizowania wpływu potencjalnych niejednorodności powierzchni próbek, każdy pomiar serii był realizowany dla innego położenia emisjometru ET100. Tym samym przyrządem mierzono emisyjność materiału dla innego obszaru próbki. Następnie wykonane w serii pomiary wartości współczynnika odbicia zostały uśrednione dla każdego kąta padania promieniowania. Uśrednione wartości kierunkowego odbicia promieniowania dla materiałów przy kącie 20° zostały przedstawione w Tabeli 1, zaś w Tabeli 2 zostały przedstawione uśrednione współczynniki odbicia kierunkowego dla kąta 60°.

Na podstawie zmierzonych współczynników odbicia zostały wyznaczone średnie kierunkowe wartości emisyjności dla kątów

Tabela 1. Zestawienie wartości współczynnika odbicia kierunkowego dla kąta 20°

Table 1. Juxtaposition of directional reflectance values for 20° angle

Zakres widmowy, μm	Pokrycie			
	NEXTEL 811-21	SBIR-S	BB2	BB3
1,5–2,0	0,051	0,013	0,045	0,064
2,0–3,5	0,052	0,014	0,054	0,059
3,0–4,0	0,044	0,015	0,066	0,034
4,0–5,0	0,059	0,016	0,072	0,048
5,0–10,5	0,042	0,012	0,081	0,029
10,5–21,0	0,041	0,018	0,106	0,025

Tabela 2. Zestawienie wartości współczynnika odbicia kierunkowego dla kąta 60°

Table 2. Juxtaposition of directional reflectance values for 60° angle

Zakres widmowy, μm	Pokrycie			
	NEXTEL 811-21	SBIR-S	BB2	BB3
1,5–2,0	0,075	0,022	0,067	0,092
2,0–3,5	0,077	0,024	0,077	0,085
3,0–4,0	0,074	0,026	0,091	0,054
4,0–5,0	0,086	0,028	0,095	0,078
5,0–10,5	0,072	0,023	0,107	0,051
10,5–21,0	0,074	0,029	0,131	0,051

Tabela 3. Zestawienie wartości emisyjności kierunkowej i hemisferycznej dla zakresu spektralnego 1,5–21 μm Table 3. Juxtaposition of directional and hemispherical emissivity values for 1.5–21 μm spectral range

Pokrycie	ϵ_{20}	ϵ_{60}	ϵ_H
NEXTEL 811-21	0,958	0,927	0,905
SBIR-S	0,985	0,973	0,944
BB2	0,904	0,879	0,850
BB3	0,973	0,948	0,924

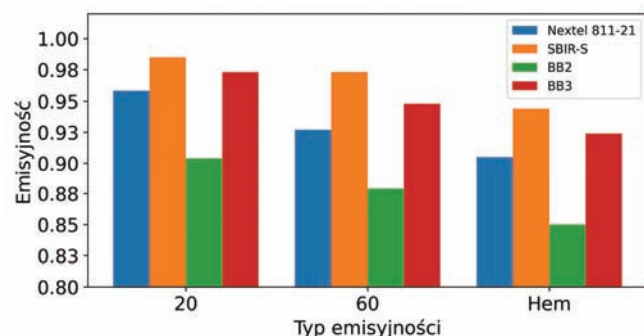
**Rys. 6. Wykres wartości emisyjności kierunkowej i hemisferycznej dla badanych materiałów**

Fig. 6. The bar plot of directional and hemispherical emissivity values of examined materials

padania promieniowania 20° i 60° oraz średnie wartości emisyjności hemisferycznej dla zakresu spektralnego 1,5–21 μm . Uzyskanie wartości emisyjności kierunkowej i hemisferycznej zostały przedstawione w Tabeli 3, zaś na Rys. 6 zestawiono graficznie uzyskane wyniki.

Na podstawie zrealizowanych pomiarów można stwierdzić, że powłoka wykonana z materiału SBIR-S ma najwyższą wartość

emisyjności spośród wszystkich badanych materiałów w zakresie widmowym 1,5–21,0 μm . Emisyjność tego materiału jest stosunkowo jednolita w zakresie widmowym oraz nie zmniejsza się znacząco przy pomiarze pod większym kątem. Oznacza to, że materiał SBIR-S cechuje duża dyspersyjność powierzchni. Właściwość ta implikuje, że powierzchnia wykonana z materiału SBIR-S dobrze przybliża teoretyczną powierzchnię Lamberta, która rozprasza promieniowanie równomiernie w półsfery [6]. Powierzchnie o wysokiej emisyjności i wysokich wartościach dyfuzji są najbardziej odpowiednie do zastosowania jako powierzchnia wzorcowa dla promieniowania w podczerwieni lub w konstrukcji technicznego ciała doskonale czarnego.

5. Wnioski

Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że wszystkie badane materiały charakteryzują się wysoką wartością emisyjności w zakresie widmowym podczerwieni. Ponadto z pomiarów wynika, że zarówno materiał SBIR-S, jak i BB3 cechują się wyższą emisyjnością niż materiał NEXTEL 811-21, który jest powszechnie stosowany w konstrukcjach ciał czarnych. Wartość współczynnika emisyjności dla materiału NEXTEL 811-21 można zwiększyć przez natryskiwanie podkładu przed natryskiwaniem powłoki, a następnie przez jej wygrzewanie w temperaturze 120 °C [1]. Jednak taka obróbka znacząco komplikuje, wydłuża oraz zwiększa koszt konstrukcji takich powierzchni.

Z pomiarów wynika, że najbardziej obiecującym materiałem jest powłoka SBIR-S. Dodatkowym atutem jest fakt, że jest dostarczana w postaci arkuszy z klejem na odwrocie. Powoduje to, że powłoka jest łatwa do nakładania na płaskie lub cylindryczne powierzchnie oraz nie wymaga wstępnego przygotowywania powierzchni. Sposób nałożenia materiału nie wpływa na wynikową wartość emisyjności ani jednorodność powierzchni. Jednak jej zastosowanie może być ograniczone i niewygodne przy pokrywaniu bardziej złożonych kształtów geometrycznych. Wydaje się również, że materiał ten może przyciągać cząsteczki kurzu, co może powodować problemy z utrzymaniem powierzchni w czystości.

Drugim co do wartości emisyjności materiałem w zakresie widmowym podczerwieni jest BB3. Jest dostarczany w postaci płynnej farby, którą można nakładać pędzlem w postaci nierozcieńczonej. Jednak ze względu na wysoką lepkość może być trudno zapewnić jednorodność powierzchni przy nakładaniu na powierzchnie o większych wymiarach. Możliwe jest nałożenie powłoki za pomocą aerografu, jednak wymagałoby to pewnego stopnia rozcieńczenia, co może wpłynąć niekorzystnie na jego właściwości emisyjne. Ocena wpływu różnych rodzajów rozcieńczalników i sposobów aplikacji wymaga dalszych badań.

Wszystkie badane powłoki można niezawodnie wykorzystać jako tymczasową powierzchnię odniesienia podczas jakościowych pomiarów terenowych różnych obiektów o niskiej emisyjności. Jednak do zastosowania jako promiennik do ciała czarnego najlepszym rozwiązaniem jest SBIR-S. Łatwość aplikacji, wysoka wartość współczynnika emisyjności i jednolitość powierzchni sprawiają, że jest to dobra, tania alternatywa dla komercyjnych grzejników z czarnym ciałem.

Podziękowania

Praca współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach grantu: DOB-2P/02/09/2018.

Bibliografia

- Adibekyan A., Kononogova E., Monte C., Hollandt J., *High-Accuracy Emissivity Data on the Coatings Nextel 811-21, Herberts 1534, Aeroglaze Z306 and Aktar Fractal Black*. "International Journal of Thermophysics", Vol. 38, 2017, DOI: 10.1007/s10765-017-2212-z.

2. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. ASTM E408-13(2019), Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques.
3. CULTUREHUSTLE Stuart Semple. BLACK 2.0 – THE WORLD’S MATTEST, FLATTEST, BLACK ART MATERIAL BY STUART SEMPLE.
4. CULTUREHUSTLE Stuart Semple. BLACK 3.0 – THE WORLD’S BLACKEST BLACK ACRYLIC PAINT.
5. Falz M., Leonhardt G., *PVD coatings with high IR emissivity for high temperature applications of Co-based alloys*. “Surface and Coatings Technology”, Vol. 61, No. 1–3, 1993, 97–100, DOI: 10.1016/0257-8972(93)90209-7.
6. Gogler S., Bieszczad G., Zarzycka A., *Model of an optical system’s influence on sensitivity of microbolometric focal plane array*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Vol. 8541, 2012, DOI: 10.1117/12.976039.
7. Gross H., *Handbook of Optical Systems. Volume 1: Fundamentals of Technical Optics*. Wiley-VCH, 2005:826.
8. Krupiński M., Bieszczad G., Sosnowski T., Madura H., Gogler S., *Non-uniformity correction in microbolometer array with temperature influence compensation*. “Metrology and Measurement Systems”, Vol. 21, No. 4, 2014, 709–718, DOI: 10.2478/mms-2014-0050.
9. NEXTEL. NEXTEL Velvet Coating 811-21 – 9218 black.
10. PRO-lite TECHNOLOGY. TECHNICAL SPECIFICATIONS ET100 HANDHELD THERMAL EMISSOMETER.
11. SHIBUYA OPTICAL CO., LTD. Light Exclusion Sheet Super Black IR.
12. Sosnowski T., Bieszczad G., Kastek M., Madura H., *Digital image processing in high resolution infrared camera with use of programmable logic device*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Vol. 7838, 2010, DOI: 10.1117/12.865026.
13. Sosnowski T., Bieszczad G., Madura H., Kastek M., Firmanty K., *The calibration stand for thermal camera module with cooled infrared focal plane array*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Vol. 7660, 2010, DOI: 10.1117/12.851144.
14. Sosnowski T., Madura H., Firmanty K., Bareła J., Bieszczad G., Kubicki J., *Zautomatyzowane stanowisko do wyznaczania wartości parametrów i kalibracji obserwacyjnych kamer termowizyjnych*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, R. 59, Nr 9, 2013, 962–965.
15. Vollmer M., Möllmann K.P., *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim, Germany: Wiley Blackwell, 2017.
16. Wang F., Cheng L., Xiang L., Zhang Q., Zhang L., *Effect of SiC coating and heat treatment on the thermal radiation properties of C/SiC composites*. “Journal of the European Ceramic Society”, Vol. 34, No. 7, 2014, 1667–1672, DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.012.
17. Więcek B., Pacholski K., Olbrycht R. i in. *Termografia i spektrometria w podczerwieni. Zastosowania przemysłowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
18. Willers C.J., *Electro-Optical System Analysis and Design: A Radiometry Perspective*. SPIE, 2013.
19. Wolfe W.L., *Introduction to Radiometry*. SPIE Press, 1998:200.
20. Yi J., He X., Sun Y., Li Y., *Electron beam-physical vapor deposition of SiC/SiO₂ high emissivity thin film*. “Applied Surface Science”, Vol. 253, No. 9, 2007, 4361–4366, DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.09.063.

Novelty Surface Coatings for Far Infrared Spectrum Black Body Radiators

Abstract: Black body radiation sources are commonly used devices in areas related to thermal imaging and radiometry. They are the closest physical approximation of theoretical black body emitter derived from the Planck’s law. Majority of such devices are costly with restricted information about their production technology, including their emitter surface. A few relatively easily accessible coatings with potential application in such devices have been chosen and their emissivity measured. The paper presents measurements that provides information necessary to determine whether there are coatings viable for black body emitter or reference surface.

Keywords: black body, thermography, emissivity

mgr inż. Andrzej Ligienza

andrzej.ligienza@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5789-8531

Tytuł inżyniera otrzymał w 2014 r. po ukończeniu kierunku mechatronika ze specjalizacją inżynierii systemów mechatronicznych. Tytuł magistra otrzymał w 2016 r. po ukończeniu kierunku optoelektronika ze specjalizacją inżynieria systemów optoelektronicznych. W 2018 r. objął stanowisko starszego inżyniera w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT.



dr inż. Grzegorz Bieszczad

grzegorz.bieszczad@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8048-2609

Ukończył w 2008 r. Wojskową Akademię Techniczną na Wydziale Elektroniki. Stopień doktora otrzymał w 2012 r. Obecnie zajmuje się zagadnieniami związanymi z projektowaniem systemów cyfrowych, programowaniem mikroprocesorów i układów FPGA związanych z cyfrowym przetwarzaniem obrazu, w tym obrazów termicznych.



dr inż. Tomasz Sosnowski

tsosnowski@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4082-8366

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów cyfrowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych i programowalnych w technice podczerwieni.



dr inż. Krzysztof Firmanty

krzysztof.firmanty@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9124-6561

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1993 r. pracownik Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Zajmuje się problematyką detekcji obiektów w systemach podczerwieni oraz analizą sygnałów i algorytmami detekcji zaimplementowanymi w urządzeniach podczerwieni. Autor i współautor ponad 60 publikacji. Pracuje jako adiunkt w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej.



mgr inż. Bartosz Bartosewicz

bartosz.bartosewicz@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-8053-6563

W 2014 r. ukończył studia na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej. Obecnie pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Optoelektroniki WAT. Specjalność – synteza i badanie nanocząstek, detekcja materiałów niebezpiecznych.

