

Grzegorz GRALEWICZ  
Grzegorz OW CZAREK  
Janusz KUBRAK

## INTERFERENCYJNE FILTRY BLOKUJĄCE PROMIENIOWANIE PODCZERWONE

**STRESZCZENIE** *W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat możliwości blokady szkodliwego promieniowania podczerwonego na gorących stanowiskach pracy metodami optyki cienkowarstwowej. Obliczono i przeanalizowano konstrukcje cienkowarstwowe pod kątem efektywności blokowania szkodliwego promieniowania. Opracowano technologie wykonywania wybranych konstrukcji filtrów technikami parowania próżniowego.*

*Ponadto porównano właściwości filtrów obecnie dostępnych z nowymi prezentowanymi rozwiązaniami.*

**Słowa kluczowe:** *optyka cienkowarstwowa, filtr interferencyjny, promieniowanie podczerwone*

### 1. WSTĘP

---

Na gorących stanowiskach pracy wyposażonych w źródła intensywnego promieniowania podczerwonego poza częstymi zagrożeniami mechanicznymi

---

**dr inż. Grzegorz GRALEWICZ, dr inż. Grzegorz OW CZAREK**  
e-mail: grgra@ciop.lodz.pl, growc@ciop.lodz.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

**dr Janusz KUBRAK**  
e-mail: jkubrak@vigo.com.pl

Vigo SL Sp. z o.o.

(wywołanymi np. odpryskami stopionego metalu i żużlu), iskrami oraz bezpośrednim kontaktem z płomieniem występują zagrożenia ze strony promieniowania optycznego. Zagrożenia termiczne są przyczyną wysuszenia śluzówek, oparzeń gałki ocznej, a także powstawania katarakty. Do ochrony przed promieniowaniem podczerwonym służą filtry montowane w okularach, goglach lub osłonach twarzy. Filtry chroniące przed podczerwienią powinny chronić użytkownika przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym, umożliwiając dobre widzenie przedmiotu pracy, a także rozpoznawanie sygnałów bezpieczeństwa [14]. W szczególności należy dbać o to, aby współrzędne chromatyczności filtrów odpowiadały warunkom dobrego rozpoznawania barw, zwłaszcza dla prawidłowej oceny temperatury (np. temperatury w piecu, w którym odbywa się topienie). Jeśli poziom szkodliwego promieniowania podczerwonego jest bardzo wysoki, zalecane jest użycie filtrów odbijających to promieniowanie, gdyż zmniejsza to wzrost temperatury samego filtru [6].

Filtry chroniące przed promieniowaniem podczerwonym są dobierane w zależności od temperatury źródła promieniowania podczerwonego. Najczęściej stosowane są filtry o oznaczeniach: 4-3, 4-5 i 4-7, gdzie cyfra 4 jest kodem dla filtru chroniącego przed podczerwienią, a cyfry: 3,5,7 – oznaczają stopnie ochrony filtra (im wyższy stopień ochrony tym wyższy jest poziom blokowanego promieniowania podczerwonego i odpowiedni niższy współczynnik przepuszczania promieniowania widzialnego). Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania dla filtrów chroniących przed promieniowaniem podczerwonym o stopniu ochrony: 4-3, 4-5, 4-7 przedstawiono w tabeli 1 [14].

**TABELA 1**

Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania dla filtrów chroniących przed promieniowaniem podczerwonym o oznaczeniu: 4-3, 4-5, 4-7

Oznaczenie filtru	Współczynnik przepuszczania światła $\tau_V$ [%]	
	Maksymalny	Minimalny
4-3	17,8	8,5
4-5	3,2	1,2
4-7	0,44	0,126

Nowym rozwiązaniem przy projektowaniu tego typu filtrów ochronnych jest wykorzystanie zjawiska interferencji zachodzących w wielowarstwowych powłokach dielektrycznych lub metaliczno-dielektrycznych. Odpowiedni dobór konstrukcji cienkowarstwowej, materiałów ich grubości i sekwencji pozwala na uzyskanie filtru o bardzo wysokiej efektywności tłumienia podczerwieni przy

jednoczesnej możliwości sterowania charakterystyką spektralną transmitancji w zakresie widzialnym. Zaletami takiego rozwiązania są: podwyższenie trwałości filtrów, wysokie współczynniki odbicia filtrów dla zakresu bliskiej podczerwieni, a zatem bardzo wysoki poziom tłumienia szkodliwego promieniowania przy niskich poziomach absorpcji [7, 8].

## 2. KONSTRUKCJE FILTRÓW CHRONIĄCYCH PRZED SZKODLIWYM PROMIENIOWANIEM PODCZERWONYM

---

Wyróżnia się dwa rodzaje filtrów optycznych blokujących promieniowanie podczerwone. Pierwszy to konstrukcja składająca się z podłoża mineralnego lub organicznego z naniesioną specjalną powłoką blokującą promieniowanie podczerwone. Drugi to filtry absorpcyjne, gdzie charakterystyka spektralna podłoża jest modyfikowana w procesie wytwarzania przez wprowadzenie substancji absorbujących promieniowanie w określonych zakresach spektralnych. Proces ten określany jest jako barwienie w masie i stosowany jest zarówno dla podłoży mineralnych, jak i organicznych (głównie poliwęglanu). Filtr optyczny, który powstał w wyniku procesu barwienia w masie materiału podłoża działa w oparciu o zasadę absorpcji części promieniowania optycznego. Zastosowany czynnik absorpcyjny przy ekspozycji na promieniowanie cieplne powoduje wzrost temperatury filtru. Jest to zjawisko niepożądane i przyczyniające się do pogorszenia komfortu użytkownika filtrów [12].

Nałożenie na powierzchnie podłoża odpowiednio dobranych warstw metalicznych czy interferencyjnych dielektrycznych lub metaliczno-dielektrycznych, może zniwelować to niekorzystne zjawisko.

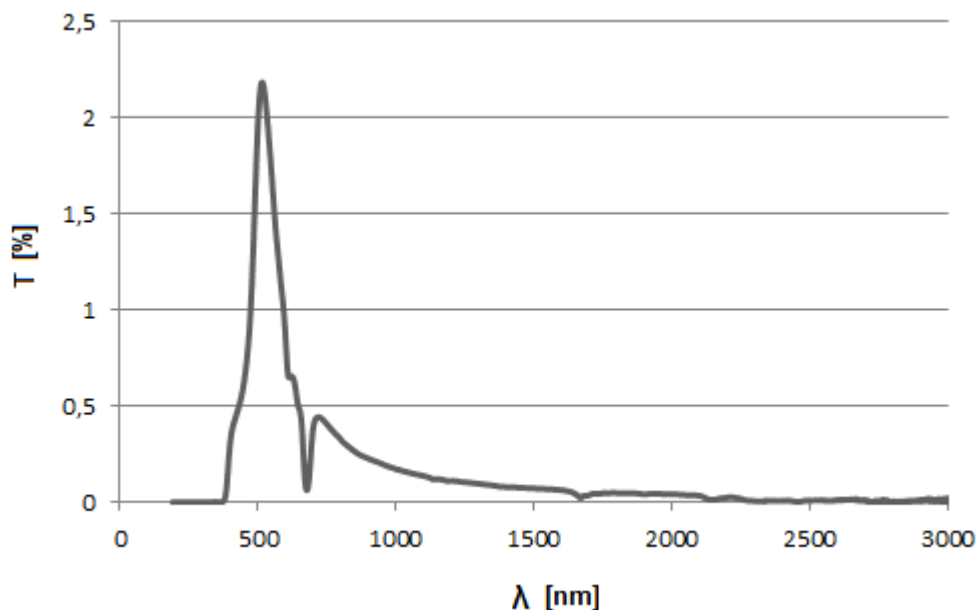
### 2.1. Filtry metaliczne Cu

---

Filtry pokryte pojedynczą warstwą metaliczną miedzi- Cu, wykorzystują charakterystyczne właściwości metali stosowanych do ich produkcji, czyli wysoki współczynnik odbicia promieniowania w zakresie podczerwieni i znaczący współczynnik przepuszczania w zakresie widzialnym (rys. 1).

Przy odpowiednio dobranej grubości metalu można uzyskać, wymagania zawarte w normach z zakresu ochrony przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym – poziomy przepuszczania promieniowania widzialnego i jednocześnie

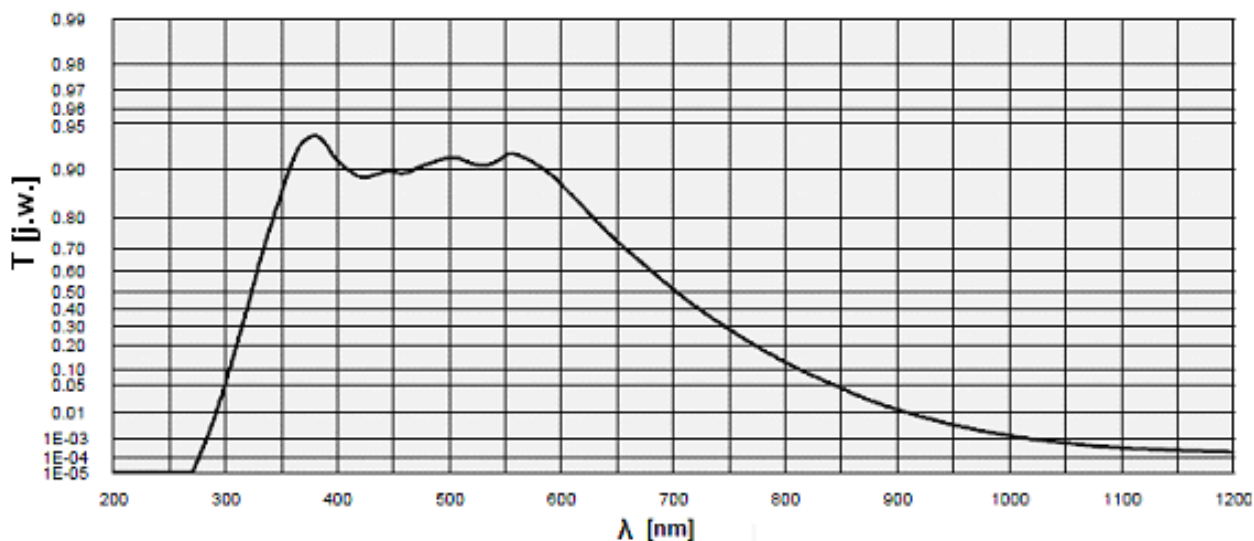
wysokie tłumienie promieniowania podczerwonego. Istotną wadą tych filtrów jest bardzo mała odporność na ścieranie wynikająca zarówno ze słabej adhezji metali do stosowanego podłoża, jak i naturalnej miękkości tych metali [11, 14].



Rys. 1. Charakterystyka spektralna transmitancji filtru z warstwą miedzi Cu stopień ochrony 4-5

## 2.2. Filtry absorpcyjne

Obecnie dostępne filtry chroniące przed promieniowaniem podczerwonym stosowane np. w technikach oświetleniowych, powstają w wyniku procesu barwienia w masie materiału podłoża. Filtr taki działa w oparciu o zasadę absorpcji części promieniowania optycznego i jedynie znikoma część promieniowania padającego na filtr ulega odbiciu (ok. 8 %). Zastosowany czynnik absorpcyjny powoduje wzrost temperatury filtru. Jest to zjawisko niepożądane i przyczyniające się do pogorszenia komfortu użytkowania filtrów. Należy również zaznaczyć, że filtry absorpcyjne chroniące przed promieniowaniem podczerwonym charakteryzują się wysoką przepuszczalnością w paśmie widzialnym. Na rysunku 2 zamieszczono przykładową spektralną charakterystykę filtru KG3 Schott.



Rys. 2. Spektralna charakterystyka transmitancji  $T(\lambda)$  filtru KG3 Schott [18]

### 2.3. Filtry dielektryczne

W optyce cienkowarstwowej znane są szerokopasmowe wielowarstwowe konstrukcje interferencyjnych filtrów odbijających podczerwień (np. wielowarstwowe powłoki wykonane z tlenków tytanu i krzemu –  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ) [1]. Aby uzyskać szerokie pasmo odbicia w zakresie bliskiej podczerwień (NIR), w pierwszym przybliżeniu wzięto pod uwagę dwa odpowiednio przesunięte spektralnie wielowarstwowe stosy  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ . Pozwala to skrócić pracochłonny proces optymalizacji konstrukcji filtrów. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę spektralną prostego złożenia omawianych wielowarstwowych powłok  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  (dla stosów bezabsorbujących);

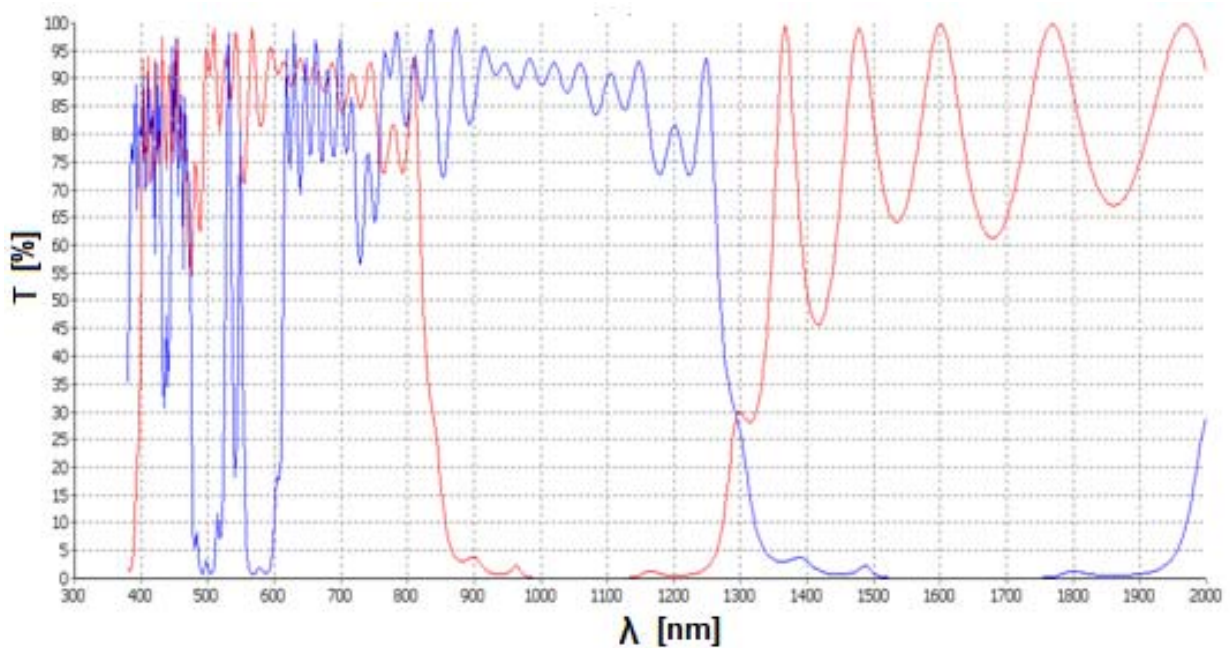
$$R = 1 - T,$$

gdzie:

- $R$  – współczynnik odbicia,
- $T$  – współczynnik przepuszczania).

Konstrukcja ta mogłaby stanowić podstawę wyjściową do ewentualnego procesu optymalizacji, ale skomplikowana charakterystyka spektralna w zakresie widzialnym wynika z pojawiania się wyższych rzędów interferencji – widoczne na rysunku 3 wąskie obszary wysokiego odbicia (małe współczynniki przepuszczania) – oraz konieczność uzupełnienia dodatkowymi warstwami w celu poszerzenia pasma odbicia nie rokuje sukcesu.

Zatem niezbędna przy takim rozwiązaniu bardzo duża liczba warstw i trudności związane z kontrolą poziomu przepuszczania w zakresie widzialnym, dyskwalifikują konstrukcje bazujące na warstwach tylko dielektrycznych.



Rys. 3. Spektralne charakterystyki transmitancji  $T(\lambda)$  złożenia dwóch stosów odbijających w zakresie NIR – 64 warstwy  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

## 2.4. Filtry metaliczno – dielektryczne

Kolejną konstrukcją, którą wzięto pod uwagę, to filtry metaliczno dielektryczne o indukowanej transmisji typu - ITF (Induced Transmission Filters) [3, 9, 13]. W metalicznych warstwach absorpcyjnych można doprowadzić do podwyższenia współczynników przepuszczania dla wybranego pasma spektralnego, nakładając odpowiednio dobrane warstwy dielektryczne. Problem taki był rozważany i opublikowany przez P.H. Berninga i A.F. Turnera [3]. Autorzy wprowadzili tam pojęcie potencjalnej transmitancji:

$$\Psi = \frac{I_{wyj}}{I_{wej}} = \frac{T}{1-R} \quad (1)$$

gdzie:

$\frac{I_{wyj}}{I_{wej}}$  to stosunek natężeń promieniowania wychodzącego i padającego,

$R$  – współczynnik odbicia,

$T$  – współczynnik transmisji.

Potencjalna transmitancja reprezentuje przepuszczalność jaką miałby układ warstw, gdyby odbicia zredukować do zera. Tak więc jeśli parametry optyczne warstwy metalu są ustalone, potencjalna transmitancja określona jest przez admitancję współpracującego stosu dielektrycznego. Optyczną admitancję dowolnego układu warstwowego  $Y$  definiujemy jako stosunek składowych stycznych natężeń pola magnetycznego i elektrycznego:

$$Y = \frac{H}{E} \quad (2)$$

Maksimum potencjalnej transmitancji jest funkcją grubości warstwy metalicznej. Poprzez dobór admitancji współpracujących stosów dielektrycznych, można uzyskać obniżenie odbicia pozwalające na drastyczne podwyższenie potencjalnej transmitancji dla wybranego pasma spektralnego, szczególnie dla metali o wysokim stosunku  $\frac{k}{n}$ , gdzie:  $k$  – współczynnik ekstynkcji określający absorpcję dla promieniowania optycznego przenikającego materiał,  $n$  – współczynnik załamania promieniowania optycznego [1, 10].

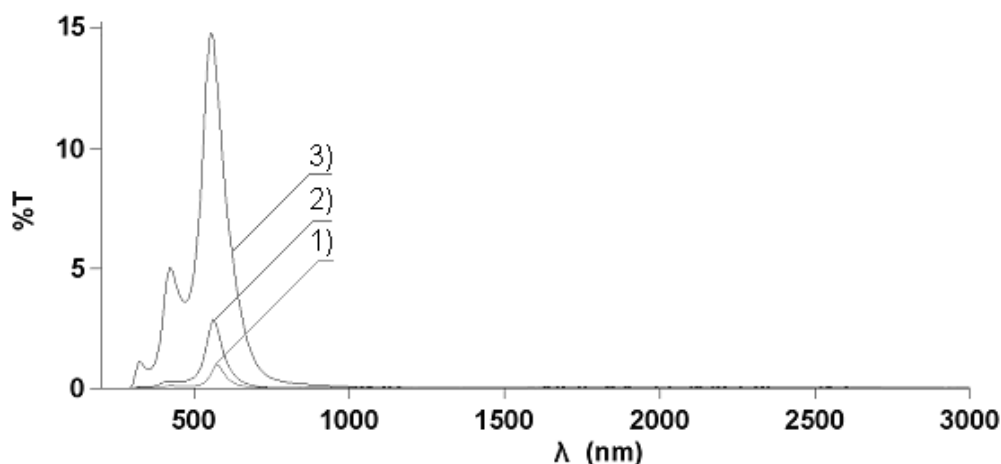
Zasadę indukowanej transmisji zastosowano do skonstruowania filtrów interferencyjnych blokujących promieniowanie podczerwone. Pozwoliło to na zastosowanie oryginalnych konstrukcji 5 i 7-warstwowych, a zatem na znaczące uproszczenie procesu technologicznego.

### 3. PORÓWNANIE WŁASNOŚCI OPTYCZNYCH FILTRÓW

Wykonano modelowe interferencyjne filtry na podłożu szklanym o oznaczeniu: 4-3, 4-5, 4-7. W konstrukcji tej zastosowano materiały dielektryczne o wysokim i niskim współczynniku załamania i warstwy metaliczne z aluminium (Al). Właściwości przepuszczania wytworzonych filtrów porównano z dostępnymi obecnie na rynku filtrami z pojedynczą warstwą miedzi (Cu) rysunek 1. Filtry interferencyjne zachowują podobny poziom przepuszczania w paśmie widzialnym, jak filtry z pojedynczą warstwą metaliczną miedzi (Cu). Należy zaznaczyć, że filtry interferencyjne mają charakterystykę bardziej stromą i głębszą w zakresie blokowania promieniowania podczerwonego niż filtry z pojedynczą warstwą miedzi. Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę spektralną transmitancji wytworzonych filtrów interferencyjnych.

Na podstawie charakterystyk spektralnych transmitancji filtrów wyznaczono współczynniki przepuszczania światła oraz średnie widmowe współczyn-

niki przepuszczania podczerwieni. Współczynniki te pozwalają a ocenę, czy poziom blokowania szkodliwego promieniowania podczerwonego jest wystarczający do spełnienia wymagań określonych w normach przedmiotowych przy zachowaniu wymaganego poziomu przepuszczania światła [14, 15]. W tabeli 2 zaprezentowano zestawienie współczynników przepuszczania światła oraz średnich współczynników przepuszczania w podczerwieni (dla dwóch zakresów 780-1400 oraz 780-2000 nm) dla wytworzonych filtrów interferencyjnych oraz dostępnych na rynku filtrów z warstwą miedzi. Wykonane filtry interferencyjne spełniają wymagania zawarte w normach [14, 15]. Należy zaznaczyć, że wartości współczynników przepuszczania tych filtrów w zakresie podczerwieni 780 nm do 2000 nm są niższe nawet o rząd wielkości w stosunku do wartości wykazywanych przez aktualnie produkowane filtry z pojedynczą warstwą metaliczną. Znaczące podwyższenie poziomu blokowania promieniowania podczerwonego obserwowane w filtrach interferencyjnych przy tym samym poziomie współczynnika przepuszczania w zakresie widzialnym prowadzi do skuteczniejszego blokowania szkodliwego promieniowania podczerwonego przez wytworzone filtry interferencyjne.



**Rys. 4. Charakterystyka spektralna transmitancji filtrów interferencyjnych:**

- 1) próbka 125THMG – filtr o oznaczeniu 4-7,
- 2) próbka 123THMG – filtr o oznaczeniu 4-5,
- 3) próbka 120THMZ – filtr o oznaczeniu 4-3

Przeprowadzono pomiary wzrostu temperatury filtrów interferencyjnych i z warstwą miedzi w wyniku ekspozycji na źródło promieniowania podczerwonego. W skład stanowiska pomiarowego wchodziła następująca aparatura: żarówka halogenowa o mocy 50 W z filtrem modyfikującym widmo emitowanego promieniowania (temperatura barwowa 1500 K), kamera termalna Flir P620 o zakresie widmowym 7,5 do 13  $\mu\text{m}$  i czułości termicznej 0,06 $^{\circ}\text{C}$  oraz uchwyt na próbki.

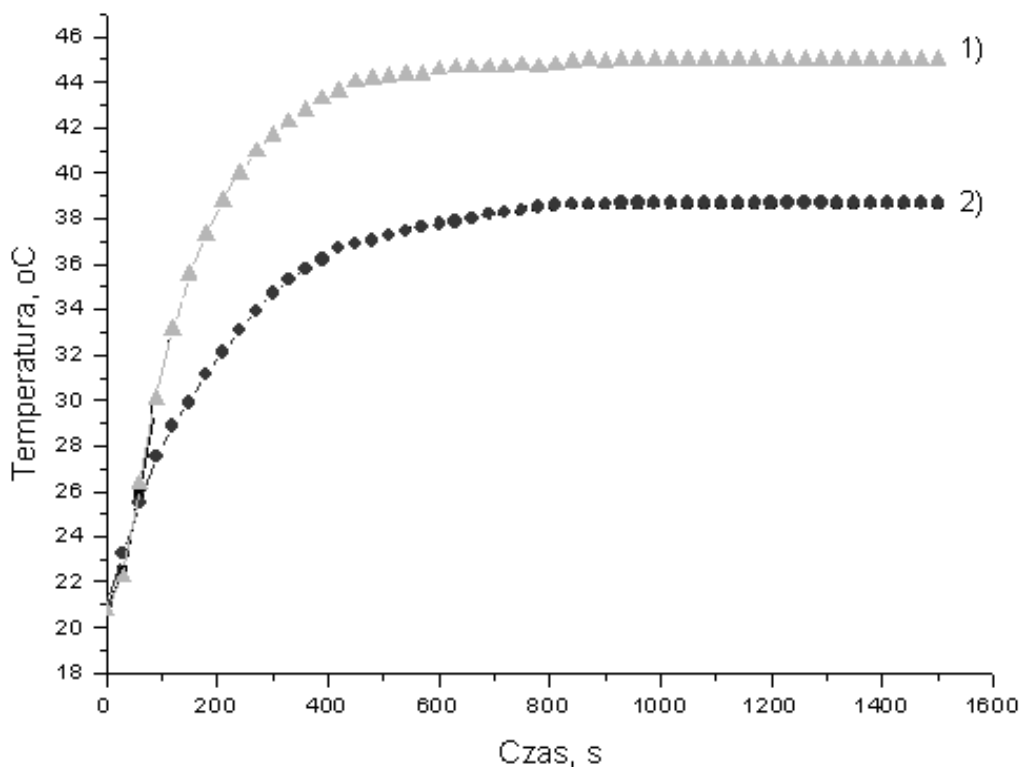


**TABELA 2**

Zestawienie współczynników przepuszczania światła oraz średnich współczynników przepuszczania w podczerwieni dla dwóch zakresów 780-1400 oraz 780-2000 nm. Próbki wykonanych filtrów interferencyjnych: 120THMZ 4-3, 123THMG 4-5, 125THMG 4-7; Próbki dostępne na rynku z warstwą miedzi: Cu 4-3, Cu 4-5, Cu 4-7

Próbka	Współczynnik przepuszczania światła $\tau_V$ [%]	Średnie współczynniki przepuszczania podczerwieni w zakresie 780-1400 nm $\tau_A$ [%]	Średnie współczynniki przepuszczania podczerwieni w zakresie 780-2000 nm $\tau_N$ [%]
120THMZ 4-3	10,097	0,075	0,058
Cu 4-3	8,560	0,630	0,402
123THMG 4-5	1,583	0,007	0,006
Cu 4-5	1,453	0,162	0,109
125THMG 4-7	0,461	0,003	0,003
Cu 4-7	0,390	0,010	0,007

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany temperatury w czasie dla filtrów interferencyjnych oraz filtrów z warstwą miedzi.

**Rys. 5. Zmiany temperatury w czasie:**

1) filtru z warstwą miedzi (próbka Cu 4-5) w wyniku ekspozycji na źródło promieniowania podczerwonego, 2) filtru interferencyjnego (próbka 123THMG 4-5) w wyniku ekspozycji na źródło promieniowania podczerwonego

Filtry z pojedynczą warstwą metaliczną (próbka Cu 4-5) nagrzewał się do 45°C natomiast filtr interferencyjny (próbka 123THMG 4-5) do 38°C w wyniku ekspozycji na to samo źródło promieniowania podczerwonego (temperatura źródła wynosiła 130°C). W obu przypadkach wartości te uzyskiwane są po czasie ok. 500 s. Następnie temperatura filtrów stabilizuje się i pozostaje na tym poziomie. Różnica temperatury pomiędzy filtrem interferencyjnym a z warstwą metaliczną miedzi wynosi ~7 °C.

## 4. PODSUMOWANIE

---

Pierwszą analizowaną konstrukcją optyczną mającą na celu wytworzenie filtrów o własnościach optycznych i fizyko-chemicznych odpowiednich do zastosowania w filtrach ochronnych chroniących przed podczerwienią były filtry dielektryczne. Niestety konstrukcje te charakteryzują się bardzo dużą liczbą warstw i trudnościami związanymi z kontrolą poziomu przepuszczania w zakresie widzialnym. Z tego względu konstrukcja ta została zdyskwalifikowana do zastosowania w środkach służących do ochrony oczu przed promieniowaniem podczerwonym.

Następną analizowaną konstrukcją były filtry metaliczno – dielektryczne, w których zastosowano zasadę indukowanej transmisji.

Przeprowadzono analizę konstrukcji optycznych pod kątem efektywności blokowania szkodliwego promieniowaniem podczerwonego. Doprowadziło to do wyboru konstrukcji pasmowych filtrów metaliczno-dielektrycznych o indukowanej transmisji. Pozwoliło to na zastosowanie konstrukcji 5- i 7-warstwowych, a zatem na znaczące uproszczenie procesu technologicznego wykonywania filtrów.

Następnie opracowano technologie nanoszenia powłok interferencyjnych przy zastosowaniu technik próżniowych. Wykonano modelowe filtry o oznaczeniach: 4-3, 4-5, 4-7. Filtry te zostały poddane wybranym badaniom laboratoryjnym zgodnie z wymaganiami norm przedmiotowych, a wyniki tych badań zostały zestawione z wynikami dostępnych filtrów z warstwami miedzi.

Opracowane i wytworzone filtry interferencyjne charakteryzują się bardzo wysokim poziomem blokowania promieniowania podczerwonego. Wartości współczynników przepuszczania światła oraz współczynników przepuszczania w zakresie podczerwieni dla dwóch zakresów (780-1400 oraz 780-2000 nm) wytworzonych filtrów interferencyjnych są w większości rozwiązań przynajmniej o rząd wielkości niższe niż w przypadku aktualnie produkowanych filtrów z pojedynczą warstwą metaliczną.

Dzięki zastosowanej nowych technologii uzyskano obniżenie końcowej temperatury do jakiej nagrzewa się filtr w wyniku ekspozycji na promieniowanie podczerwone. Filtry z pojedynczą warstwą metaliczną poddane ekspozycji na promieniowanie promiennika podczerwieni o temperaturze barwowej 2950 K obniżonej do 1500 K nagrzewały się do temperatury 45<sup>0</sup>C, natomiast filtr interferencyjny w wyniku oddziaływania tego samego promieniowania nagrzewał się do temperatury 38<sup>0</sup>C.

Nowo opracowana konstrukcja filtrów interferencyjnych zapewnia skuteczniejszą ochronę przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym przy jednoczesnej poprawie komfortu i wartości użytkowych filtrów.

---

Publikacja opracowana na podstawie wyników I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2008-2010 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

## LITERATURA

1. Angus MacLeod H.: Thin – Film Optical Filters 3-ed Edition. Institute of Physics Publishing, 2001.
2. Baumeister P.: Optical Coating Technology, SPIE, 2004.
3. Berning P.H., Turner A.F.: Induced Transmission In Absorbing Films Applied to Bandpass Filter Design. JOSA 3, pp. 230-239, 1957.
4. Epstein L.: Improvement in heat reflecting filters. J. Opt.Soc. Am., 45,360-2, 1995.
5. Epstein L.I.: Improvements in heat reflecting Filters. JOSA, 45,1360-2, 1995.
6. Koradecka D.: Handbook of Occupational Safety and Health. Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
7. Kubrak J., Włodarski L.: Interferencyjne sterowanie promieniowaniem UV. Materiały z konferencji UVR, 2002.
8. Kubrak J., Owczarek G.: Interference corrector of optical radiation. Proceedings of SPIE Systems of Optical Security, 2001.
9. Landau V., Lissberger, P.H.: Theory of Induced Transmission Filters in Terms of the Concept of Equivalent Layer. JOSA 62, 1972.
10. Maisel L.I, Glang R.: Handbook of Thin Film Technology. McGraw-Hill Book Company, 1970.
11. Marzec S.: Propozycje oceny narażenia pracowników na cyklicznie powtarzające się promieniowanie podczerwone. Przegląd Elektrotechniczny, rok LXXXV, 11, 226-228, 2009.
12. Marzec S.: Zagrożenie promieniowaniem podczerwonym na wybranych stanowiskach pracy w hutnictwie żelaza i stali. Praca-Zdrowie-Bezpieczeństwo, 2, 4-7, 2001.
13. Sytkkowa A.: Reliable Deposition of ITF with a Single Metal Layer. Applied Optics Vol. 50, 2011.
14. PN-EN 171: 2005 Ochrona indywidualna oczu – Filtry chroniące przed podczerwienią – Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecane stosowanie.

15. PN-EN 166: 2005 Ochrona indywidualna oczu – Wymagania.
16. PN-EN 167: 2005 Ochrona indywidualna oczu – Optyczne metody badań.
17. PN-EN 14458:2006 Sprzęt do indywidualnej ochrony oczu – Osłony twarzy i wizjery do użycia w hełmach strażackich o wysokiej skuteczności w zakresie bezpieczeństwa przemysłowego, używane przez strażaków, załogi karettek i służby ratownicze.
18. Schott, Data Sheet KG3, 2008.

*Rękopis dostarczono dnia 20.03.2012 r.*

## INTERFERENCE FILM OF BLOCKING THE INFRARED RADIATION

Grzegorz GRALEWICZ,  
Grzegorz OWCZAREK, Janusz KUBRAK

**ABSTRACT** *This article presents basic information on how to block harmful infrared radiation using optical filters with thin-film coating. Interference structures for efficient blocking of harmful radiation was calculated and analyzed. The construction of new interference optical filters against infrared radiation was compared with currently available filters.*

**Keywords:** *interference film, infrared radiation, thin film optics methods, infrared protection, eye and face protection*



**Dr inż. Grzegorz GRALEWICZ** absolwent Wydział Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej, od 2003r pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym. W 2009 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska.

**Dr inż. Grzegorz OWCZAREK** absolwent Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Obecnie pracownik CIOP-PIB – Kierownik Pracowni Ochrony Oczu i Twarzy.



**Dr Janusz KUBRAK** absolwent Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Prezes Zarządu firmy Vigo SL Sp. z o.o. – członka Polskiej Izby Gospodarczej Zaawansowanych Technologii.

