

Grzegorz Owczarek

Grzegorz Gralewicz

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

Metody indukowania zmian przepuszczania promieniowania widzialnego dla optycznych filtrów ochronnych blokujących szkodliwe promieniowanie podczerwone

Methods of induction of visible radiation leak changes for optical protective filters against harmful infrared radiation

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono metody indukowania zmian przepuszczania promieniowania widzialnego, które mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcji optycznych filtrów ochronnych blokujących szkodliwe promieniowanie podczerwone. Opisano metody wykorzystujące efekty fotochromowy i termochromowy, zjawiska polaryzacji światła oraz zmian gęstości optycznej w układzie zawierającym substancje ciekłokrystaliczne. Dla wymienionych metod wskazano mocne i słabe strony w ich zastosowaniu do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniących przed podczerwienią. Na podstawie przeprowadzonej analizy wybrano zjawisko polaryzacji światła oraz zmian gęstości optycznej w układzie zawierającym substancje ciekłokrystaliczne, jako efekty mające potencjalne zastosowanie do konstrukcji filtrów ochronnych. Dla tych efektów zbadano, w jaki sposób zmiana transmisji promieniowania widzialnego koreluje ze zmianami przepuszczania promieniowania podczerwonego w kontekście spełnienia wymagań stawianym filtrom optycznym chroniącym przed podczerwienią.

Słowa kluczowe: *filtry do ochrony przed promieniowaniem podczerwonym, efekt fotochromowy, polaryzacja światła, filtry ciekłokrystaliczne*

Abstract

Methods of induction of visible radiation leak changes that may be used in optical protective filters against harmful infrared are presented. Methods that use photochromic and thermochromics effects, the phenomenon of light polarization and changes of optical density in a system that contains liquid crystal substances are described. For the aforementioned methods, advantages and disadvantages of their use for constructing automatic protective filters against infrared were presented. Based on the carried out analysis, the method of the light polarization phenomenon and changes of optical density in a system that contains liquid crystal substances were chosen as the effects that potentially may be used for constructing protective filters. For these effects the way of how changes of light transmittance correlates with changes of infrared transmittance in the context of meeting the requirement of optical protective filters against infrared were analyzed.

Keywords: *infrared protective filters, photochromic effect, light polarization, liquid crystal filters*

1. Wprowadzenie

Na gorących stanowiskach pracy ochronę oczu przed zagrożeniami termicznymi zapewniają optyczne filtry ochronne montowane w okularach, gogłach lub osłonach twarzy [1]. Są to filtry chroniące przed podczerwienią. Filtry te powinny zapewnić również dobre widzenie obrabianych elementów, środowiska pracy lub nadzorowanego procesu technologicznego. W związku z tym, że praktycznie wszystkie stanowiska emitujące szkodliwe promieniowanie podczerwone emitują również promieniowanie widzialne na poziomie, który dla zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu obserwacji musi zostać ograniczony [2], filtry chroniące przed podczerwienią muszą również tłumić promieniowanie widzialne. Z grupy filtrów chroniących przed podczerwienią wyłączone są filtry spawalnicze. Na spawalniczych stanowiskach pracy występuje również zagrożenie promieniowaniem podczerwonym. Jednak z uwagi na charakter promieniowania emitowanego podczas spawania (promieniowanie nadfioletowe, intensywne promieniowanie widzialne powodujące oślepienie, promieniowanie podczerwone), filtry spawalnicze stanowią odrębną grupę filtrów ochronnych.

Aktualnie w środkach ochrony oczu, przeznaczonych do zastosowania na gorących stanowiskach pracy, stosowane są filtry optyczne, które działają na zasadzie filtrów absorpcyjnych lub metaliczno-odbiciowych. Pierwszy z wymienionych rodzajów filtrów absorbuje większość promieniowania, drugi rodzaj to filtry pokryte warstwą metaliczną odbijającą promieniowanie podczerwone [3]. Są to konstrukcje pasywne, dla których poziom przepuszczania promieniowania podczerwonego oraz transmisja w zakresie widzialnym nie ulegają zmianie.

Nowym podejściem w projektowaniu filtrów ochronnych są konstrukcje tzw. filtrów aktywnych (automatycznych). W filtrach tego typu wykorzystywane są technologie pozwalające na zmianę gęstości optycznej filtru podczas jego użytkowania. Gęstość optyczna dla filtrów ochronnych, może być określona dla danej długości fali ($OD(\lambda)$). Będzie ona wtedy definiowana jest następującym wzorem:

$$OD(\lambda) = -\log(\tau(\lambda)), \text{ gdzie} \quad (1)$$

$\tau(\lambda)$ – widmowy współczynnik przepuszczania.

Podobnie, jak dla omówionych poniżej współczynników (patrz wzory od (2) do (4)) gęstość optyczna może być również wyznaczana dla określonego zakresu długości fali.

Prace nad aktywnymi filtrami optycznymi, działającymi na zasadzie innej niż efekt fotochromowy prowadzone są od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Inspiracją do badań w tym zakresie były m.in. zjawiska związane z oddziaływaniem promieniowania laserowego z materią [4].

Opracowanie optycznego filtru ochronnego, służącego do ochrony przed promieniowaniem podczerwonym, dla którego charakterystyka transmisji (transmisja promieniowania optycznego przechodzącego przez filtr w funkcji długości fali) w zakresie widzialnym i/lub podczerwonym może się zmieniać w zależności do warunków użytkowania, wymaga skorelowania właściwości tłumienia takiego filtru dla zakresów promieniowania widzialnego i podczerwieni. Korelacja ta polega na dostosowaniu określonego (wymaganego na danym stanowisku pracy) poziomu tłumienia promieniowania podczerwonego do poziomu przepuszczania promieniowania widzialnego, pozwalającego na komfortową obserwację nadzorowanych procesów technologicznych, obserwowanego przedmiotu lub stanowiska pracy.

Przepuszczanie promieniowania widzialnego i podczerwonego dla filtrów chroniących przed podczerwienią jest definiowane poprzez współczynnik przepuszczania światła (transmitancję świetlną) oraz średnie widmowe współczynniki przepuszczania podczerwieni dla dwóch zakresów widmowych: od 780 do 1400 nm i do 780 do 2000 nm. Promieniowanie podczerwone z tego zakresu dociera do siatkówki oka i może stanowić dla niej poważne zagrożenie [5]. Współczynniki te określone są następującymi wzorami.

$$\tau_v = \frac{\int_{380nm}^{780nm} \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot S_{D65\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \cdot S_{D65\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2)$$

$$\tau_A = \frac{1}{620nm} \int_{780nm}^{1400nm} \tau(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

$$\tau_N = \frac{1}{1220\text{nm}} \int_{780\text{nm}}^{2000\text{nm}} \tau(\lambda) \cdot d\lambda, \text{ gdzie} \quad (4)$$

- $\tau(\lambda)$ – widmowy współczynnik przepuszczania,
 τ_v – współczynnik przepuszczania światła (dla iluminantu D65 ($S_{D65}(\lambda)$) i rozkładu względnej czułości widzenia dziennego ($V(\lambda)$),
 τ_A – średni widmowy współczynnik przepuszczania podczerwieni dla zakresu od 780 nm do 1400 nm,
 τ_N – średni widmowy współczynnik przepuszczania podczerwieni dla zakresu od 780 nm do 2000 nm.

Czynniki: (1/620 nm) i (1/1220 nm) we wzorach na średnie wartości współczynników przepuszczania (τ_A i τ_N) zostały wprowadzone z uwagi na uśrednienie wyniku.

W zależności od wartości zdefiniowanych powyżej współczynników (patrz wzory od (2) do (4)), filtry chroniące przed podczerwienią klasyfikuje się według tzw. oznaczeń. Wyróżniamy 13 oznaczeń filtrów: od 4-1,2 (filtry jasne o stosunkowo niskim poziomie ochrony przed promieniowaniem podczerwonym) do 4-10 (filtry ciemne o wysokim poziomie ochrony przed promieniowaniem podczerwonym). Zakresy współczynników przepuszczania światła (transmitancji świetlnej) oraz odpowiadające im graniczne wartości średnich współczynników przepuszczania promieniowania podczerwonego przedstawiono w tabeli 1 [6].

Tabela 1. Wymagania odnoszące się do współczynników przepuszczania.
 Table 1. Requirements for the transmission coefficients.

Oznaczenie	Współczynnik przepuszczania światła (transmitancja świetlna) τ_v		Maksymalny średni widmowy współczynnik przepuszczania promieniowania podczerwonego	
	Maksymalny (%)	Minimalny (%)	τ_A od 780 nm do 1400 nm (%)	τ_N od 780 nm do 2000 nm (%)
4 – 1,2	100	74,4	5,5	52,9
4 – 1,4	74,4	58,1	4,8	47,2
4 – 1,7	58,1	43,2	4,1	42,2
4 – 2	43,2	29,1	3,6	37,9
4 – 2,5	29,1	17,8	2,9	32,3
4 – 3	17,8	8,5	1,9	22,9
4 – 4	8,5	3,2	1,2	15,9
4 – 5	3,2	1,2	0,71	10,6
4 – 6	1,2	0,44	0,43	7,1
4 – 7	0,44	0,126	0,23	4,4
4 – 8	0,126	0,061	0,14	2,9
4 – 9	0,061	0,023	0,075	1,8
4 – 10	0,023	0,0085	0,050	1,3

Źródło: PN-EN 166:2005

Source: Norm: PN-EN 166:2005 "Ochrona indywidualna oczu. Wymagania"

Analizując wartości przedstawione w tabeli 1 widać, że wraz ze zmianą ilości światła przechodzącego przez filtr chroniący przed podczerwienią (wyrażoną wartością współczynnika przepuszczania światła) w sposób znaczący zmieniają się wymagania odnoszące się do przepuszczania promieniowania podczerwonego. Różnice wartości maksymalnego średniego widmowego współczynnika przepuszczania podczerwieni pomiędzy najjaśniejszym (dla oznaczenia 4-1,2 wartość 5,5% dla zakresu od 780 do 1400 nm i wartość 52,9% dla zakresu od 780 do 2000 nm) a najciemniejszym filtrem (dla oznaczenia 4-10 wartość 0,050% dla zakresu od 780 do 1400 nm i wartość 1,3 dla zakresu od 780 do 2000 nm) wynoszą dla odpowiednio 5,45% oraz 51,6%.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę możliwości wykorzystania zjawisk indukujących zmianę gęstości optycznej w tzw. materiale aktywnym, który może być wykorzystany w konstrukcji automatycznych filtrów ochronnych przeznaczonych do ochrony przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym. Indukowane zmiany gęstości optycznej powinny umożliwić taką zmianę przepuszczania promieniowania widzialnego, aby zmieniające się w trakcie użytkowania filtru współczynniki przepuszczania światła (transmitancji świetlnej) oraz średnie widmowe współczynniki przepuszczania podczerwieni odpowiadały wartościom podanym w tabeli 1. Tylko takie zmiany gwarantują spełnienie wymagań stawianym filtrom optycznym chroniącym przed podczerwienią [7].

2. Stan zagadnienia

Zmiany gęstości optycznej w elemencie aktywnym mogą być indukowane promieniowaniem optycznym, termicznym, polem elektromagnetycznym lub w wyniku osłabienia części promieniowania poprzez wykorzystanie zjawiska polaryzacji światła. Wielkość/natężenie czynnika indukującego zmianę gęstości optycznej elementu aktywnego zależy od zasady, na jakiej oparty jest efekt tej zmiany. Do podstawowej grupy filtrów aktywnych zaliczamy aktualnie soczewki fotochromowe (powszechnie stosowane w optyce oftalmicznej oraz okularach chroniących przed oślepieniem słonecznym) oraz automatyczne filtry spawalnicze z ekranami ciekłokrystalicznymi. Znane są również prace nad zastosowaniem barwników fotochromowych do konstrukcji automatycznych filtrów spawalniczych [8]. W przypadku soczewek lub filtrów fotochromowych stosowanych w okularach poziom przepuszczania promieniowania widzialnego przechodzącego przez filtr jest regulowany w wyniku zmian natężenia promieniowania nadfioletowego (UV), które zachodzą w środowisku użytkowania okularów. Dla automatycznych filtrów spawalniczych zaciemnienie filtra może być wywołane również poprzez promieniowanie podczerwone (IR) lub skokową zmianę natężenia promieniowania widzialnego (światła) w wyniku zainicjowania łuku spawalniczego.

Nowością są również doniesienia o zastosowaniu technologii ciekłokrystalicznej także do okularów przeciwsłonecznych. Okulary tego typu wyposażone są w zasilane akumulatorami ekrany ciekłokrystaliczne LCD (ang. *Liquid Crystal*

Display) oraz miniaturową kamerę analizującą obraz otoczenia. W wyniku analizy obrazu otoczenia wykrywane są na filtrze obszary wymagające lokalnego zaciemnienia. Konstrukcja aktywnych przeciwsłonecznych okularów ciekłokrystalicznych wykorzystuje również rozwiązania stosowane w okularach migawkowych przeznaczonych do oglądania obrazów trójwymiarowych (3D). Rozwiązana te są ciągle w fazie prototypów, a ich konstrukcja z uwagi na możliwość zainicjowania zaciemnienia jedynie na niewielkim obszarze (około 40 mm²) nie pozwala jeszcze na zastosowanie tej technologii w konstrukcjach okularów ochronnych.

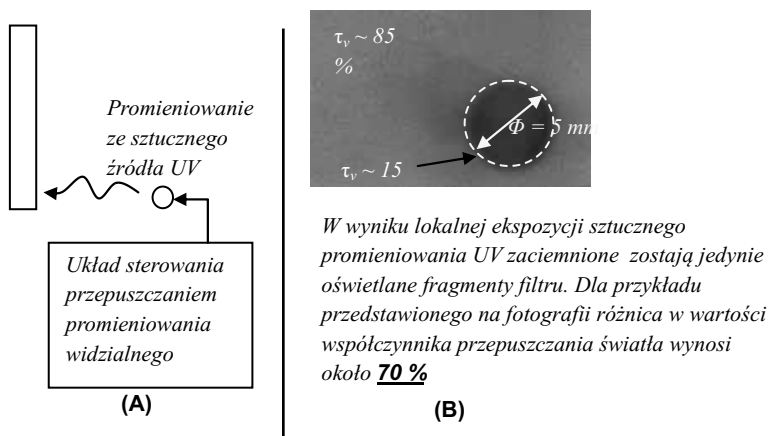
3. Analiza metod indukowania zmian przepuszczania promieniowania widzialnego

3.1. Efekt fotochromowy

Najbardziej znanym efektem pozwalającym na zmianę gęstości optycznej filtrów optycznych jest efekt fotochromowy. Efekt ten jest indukowany promieniowaniem optycznym z zakresu nadfioletu (UV). W wyniku padania promieniowania nadfioletowego na materiały fotochromowe materiały te ulegają zaciemnieniu, a więc zwiększa się również ich gęstość optyczna. Efekt fotochromowy występuje dla szerokiego zakresu widmowego nadfioletu. Materiały fotochromowe stosowane w optyce oftalmicznej ulegają zaciemnieniu zarówno pod wpływem promieniowania nadfioletowego z zakresu UV-B (280-315 nm) i UV-A (315-400 nm) występującego w atmosferze, jak również w wyniku oddziaływania promieniowania ze źródeł sztucznych UV-C (100-280 nm). Przykładem filtru, dla którego efekt fotochromowy wykorzystywany jest także dla zakresu sztucznego promieniowania nadfioletowego jest konstrukcja fotochromowego automatycznego filtra spawalniczego [8].

Szeroki zakres zmian w transmisji promieniowania widzialnego (zmiany w zaciemnieniu do 90%), jaki uzyskiwany jest w powszechnie stosowanych fotochromowych materiałach optycznych, jak również relatywnie krótki czas przejścia ze stanu jasnego (stanu, w którym filtr jest niezaciemniony) do ciemnego (stanu, w którym filtr uległ maksymalnemu zaciemnieniu) rzędu kilku sekund wskazywałby na możliwość wykorzystania efektu fotochromowego również do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniącego przed podczerwienią. Jak wykazano poniżej, efekt fotochromowy nie może być jednak brany pod uwagę przy projektowaniu tego typu filtrów. W warunkach pracy, dla których występuje wysokie narażenie na promieniowanie podczerwone oraz wymagane jest zabezpieczenie oczu filtrami o wysokim tłumieniu promieniowania podczerwonego, promieniowanie nadfioletowe z reguły nie występuje. Brak jest więc „naturalnego” czynnika indukującego zmianę gęstości optycznej w materiale fotochromowym. Ponadto, aby filtr fotochromowy uległ jednolitemu zaciemnieniu cała jego powierzchnia musi być wystawiona na działanie promieniowania nadfioletowego.

W przypadku, gdy zmiana gęstości optycznej zostałaby wymuszona przy wykorzystaniu np. dodatkowego układu optycznego, którego zadaniem byłoby sterowanie przepuszczaniem promieniowania widzialnego poprzez lokalne oświetlenie powierzchni filtra promieniowaniem UV (np. dioda UV), to zmiana gęstości optycznej filtra będzie miała również jedynie charakter lokalny. Teza ta została potwierdzona w badaniach własnych, co schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Efekt zobrazowany na rysunku 1 sprawdzono dla dostępnych na rynku polskim fotochromowych materiałów oftalmicznych. Dla przedstawionego na rysunku przykładu filtr fotochromowy oświetlano rozproszonym promieniowaniem diody UV z odległości około 10 mm. W wyniku lokalnej ekspozycji sztucznego promieniowania UV zaciemnione zostają jedynie oświetlane fragmenty filtra czyli obszar kołowy o średnicy wynoszącej około 5 mm. Różnica w wartości współczynnika przepuszczania światła dla obszarów naświetlonego i nienaświetlonego wynosiła około 70%.



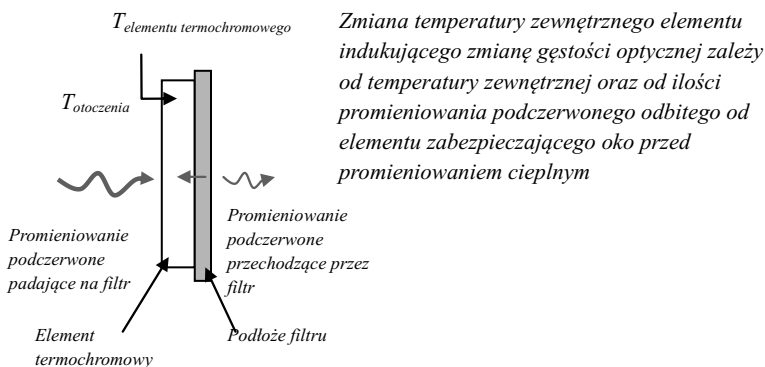
Rys. 1. Wykorzystanie źródła sztucznego promieniowania UV jako optycznego układu sterowania przepuszczaniem promieniowania widzialnego. (A) – schemat działania. (B) – częściowe zaciemnienie filtra chromowego typu Transitions (JZO) w wyniku lokalnej ekspozycji sztucznego promieniowania UV.

Fig. 1. The use of artificial radiation UV as an optical system of controlling light transmission (A) – a scheme of working (B) – a partly dark state of a chrome filter Transitions type (JZO) as a result of a local exposition to the artificial radiation UV.

Niemożliwe jest więc w tym przypadku zaprojektowanie układu sterowania przepuszczaniem promieniowania widzialnego tak, aby w rzeczywistych warunkach użytkowania filtra ochronnego możliwa była indukowana zmiana gęstości optycznej na całej jego powierzchni.

3.2. Efekt termochromowy

Kolejnym efektem, który analizowano pod kątem wykorzystania do indukowania zmian gęstości optycznej dla filtrów chroniących przed podczerwienią jest efekt termochromowy. W efekcie termochromowym – w odróżnieniu od opisanego powyżej efektu fotochromowego – wraz ze zmianą temperatury zmienia się nie tylko zaciemnienie materiału lecz również jego barwa. Efekt termochromowy jest wykorzystywany m.in. w konstrukcji termochromowych sensorów temperatury [9]. Czas zabarwienia materiałów termochromowych, który jest rzędu minut, stanowi pierwszą przeszkodę w wykorzystaniu efektu termochromowego do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniących przed podczerwienią. Kolejnym argumentem praktycznie wykluczającym zastosowanie tego efektu do konstrukcji filtrów ochronnych jest konieczność zabezpieczenia oczu przed podwyższoną temperaturą, która może być wytworzona w przestrzeni między okiem o filtrem. Ochrona ta jest realizowana głównie poprzez wykorzystanie warstw odbijających promieniowanie podczerwone nanoszonych przede wszystkim na zewnętrzną powierzchnię filtra. Dzięki temu powierzchnia filtra mniej się nagrzewa, a co za tym idzie ilość promieniowania podczerwonego docierającego do oka jest mniejsza [3]. Zastosowanie warstw odbijających promieniowanie podczerwone eliminuje więc dostęp „naturalnego” czynnika indukującego zmianę gęstości optycznej materiału termochromowego. Nawet jeśli założylibyśmy, że warstwa odbijająca promieniowanie podczerwone zostałaby umieszczona od strony oka (patrz rysunek 2) to temperatura, jaka indukuje zmianę gęstości optycznej zależałaby zarówno od temperatury otoczenia, jak również od ilości promieniowania odbitego od warstwy odbijającej naniesionej na filtr. Schematycznie sytuację taką przedstawiono na rysunku 2.



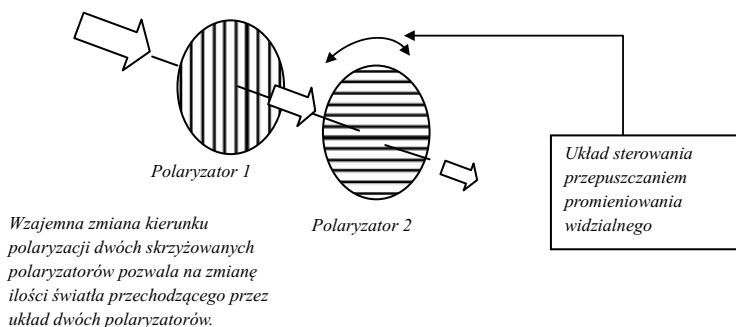
Rys. 2. Potencjalne wykorzystanie efektu termochromowego do konstrukcji modelu filtra ochronnego o zmiennej charakterystyce transmisji w zakresie widzialnym.

Fig 2. Potential use of a thermochromic effect for constructing a protective filter model with a variable characteristic of transmission in the visible range.

Przedstawiony na rysunku 2 schemat obrazujący potencjale wykorzystanie efektu termochromowego do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniących przed podczerwienią zakłada, że czynnikiem odpowiedzialnym za proces sterowania przepuszczaniem promieniowaniem widzialnym są wyłącznie zmiany temperatury, jakie występują w samym elemencie termochromowym. W takim przypadku dokonanie ścisłej korelacji pomiędzy transmisją promieniowania widzialnego i podczerwieni (zgodnie z wymaganiami normy [6]) dla rzeczywistych warunków użytkowania filtra, jest praktycznie niemożliwe. Dla tak wolnych procesów filtr nie byłby w stanie reagować m.in. na fluktuacje temperatury otoczenia.

3.3. Polaryzacja światła

Promieniowanie optyczne emitowane z większości źródeł naturalnych i sztucznych jest zdepolaryzowane. Powszechnie stosowaną metodą ograniczenia ilości światła (np. techniki wykorzystywane w fotografii) jest wycięcie części promieniowania widzialnego poprzez wykorzystanie dwóch skrzyżowanych polaryzatorów. Wykorzystanie efektu polaryzacji światła do konstrukcji filtra o zmiennej transmisji przedstawiono schematycznie na rysunku 3.



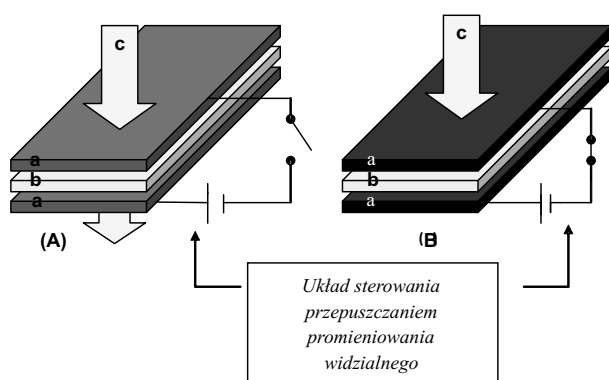
Rys. 3. Filtr polaryzacyjny
Fig 3. Polarization filter

Przedstawiony na rysunku 3 schemat potencjalnego wykorzystania efektu polaryzacji światła do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniących przed podczerwienią zakłada, że czynnikiem odpowiedzialnym za proces sterowania przepuszczaniem promieniowania widzialnego jest wzajemne położenie dwóch skrzyżowanych polaryzatorów. Sterowanie to może być łatwo realizowane zarówno manualnie lub poprzez zastosowanie elektronicznego układu sterowania wyposażonego w czujnik promieniowania widzialnego.

3.4. Zmiana gęstości optycznej w układzie zawierającym substancje ciekłokrystaliczne

Efekt polaryzacji wykorzystywany jest również pośrednio w konstrukcjach ekranów ciekłokrystalicznych zmieniających gęstość optyczną w wyniku zmian kierunku direktora substancji ciekłokrystalicznej wypełniającej tego typu ekran. Jeżeli między skrzyżowanymi polaryzatorami umieszczona zostanie struktura skręconego nematyka, która ma właściwości skręcania o 90 płaszczyzny drgań światła spolaryzowanego, to pole widzenia między skrzyżowanymi polaryzatorami będzie początkowo jasne. Strukturę skręconego nematyka (strukturę śrubową) można zazwyczaj uzyskać z prętopodobnych cząsteczek ciekłego kryształu nematycznego. Wymaga to jednak specjalnej obróbki powierzchni szklanych płytek, w których substancja ta się znajduje. W tym celu powierzchnię szklanych płytek pokrywa się cienką, przezroczystą warstwą polimeru i poleruje w jednym kierunku. Prętopodobne cząsteczki nematyka ustawiają się wówczas zgodnie z kierunkiem polerowania. Jeżeli dodatkowo powierzchnia płytek szklanych jest pokryta cienką warstwą przewodzącą, to istnieje możliwość doprowadzenia napięcia i przepływu prądu przez taką warstwę. Po włączeniu napięcia molekuly nematyka orientują się równoległe do kierunku wytworzonego pola elektrycznego, tekstura śrubowa nematyka zostaje zniszczona i zmieniona w teksturę hemeotropową. Znika zdolność skręcania płaszczyzny drgań fali świetlnej i pole widzenia ulega zaciemnieniu. Opisaną zasadę przedstawiono schematycznie na rysunku 4 [10].

Technologia wykorzystująca ciekłe kryształy nematyczne jest powszechnie stosowana do konstrukcji automatycznych filtrów spawalniczych. Pozwala ona na uzyskanie zmian gęstości optycznej filtra spawalniczego, dla której poziom przepuszczania promieniowania widzialnego zmienia się od kilku procent do tysięcznych części procenta [11].



Rys. 4. Zasada zaciemniania ekranów ciekłokrystalicznych. (A) – ekran w stanie jasnym, (B) – ekran w stanie ciemnym. Płytki szklane z elektrodami – a, ciekły kryształ – b, promieniowanie optyczne – c.

Fig 4. The principle of obfuscation of liquid crystal displays (A) – displayer in a light state, (B) – displayer in a dark state. Glass plates – a, liquid crystal – b, optical radiation – c.

4. Mocne i słabe strony analizowanych metod

Z przedstawionej powyżej analizy metody indukowania zmian przepuszczania promieniowania widzialnego wynika, że efektami, które mogą być potencjalnie wykorzystane do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniących przed podczerwienią są efekty bazujące na zjawisku polaryzacji światła oraz zmian gęstości optycznej w układzie zawierającym ciekłe kryształy nematiczne. W tabeli 2 przedstawiono najistotniejsze mocne i słabe strony analizowanych efektów.

Tabela 2. Ocena możliwości zastosowania analizowanych efektów do konstrukcji automatycznych filtrów optycznych chroniących przed podczerwienią.

Table 2. Assessment of the possibility of use the analyzed effects to construct of automatic optical filters to protect against infrared radiation.

Lp.	Efekt	Ocena możliwości zastosowania	Uwagi	
			Mocne strony	Słabe strony
1	Fotochromowy	NIE	Możliwość zmiany przepuszczania promieniowania widzialnego w bardzo szerokim zakresie (zaciemnienie do około 90 %)	Brak możliwości sterowana przepuszczaniem promieniowania widzialnego na całym obszarze filtru w warunkach narażenia na promieniowanie podczerwone
2	Termochromowy	NIE	Duży wybór barwników fotochromowych	Brak możliwości sterowana przepuszczaniem promieniowania widzialnego w zakresie widzialnym w warunkach otoczenia o dużych fluktuacjach temperatury
3	Polaryzacja światła	TAK	Możliwość zastosowania manualnego układu do sterowania przepuszczania promieniowania widzialnego	Ograniczenie przepuszczania promieniowania widzialnego wynikające z gęstości optycznej polaryzatorów.
4	Zmian gęstości optycznej w układzie zawierającym ciekłe kryształy nematiczne	TAK	Możliwość zaciemnienia ekranu ciekłokrystalicznego dowolną barwą, co pozwala na szeroki zakres modyfikacji charakterystyki przepuszczania w zakresie widzialnym	Konieczność zastosowania elektronicznych układów do sterowania przepuszczania promieniowania widzialnego

5. Badanie przepuszczania

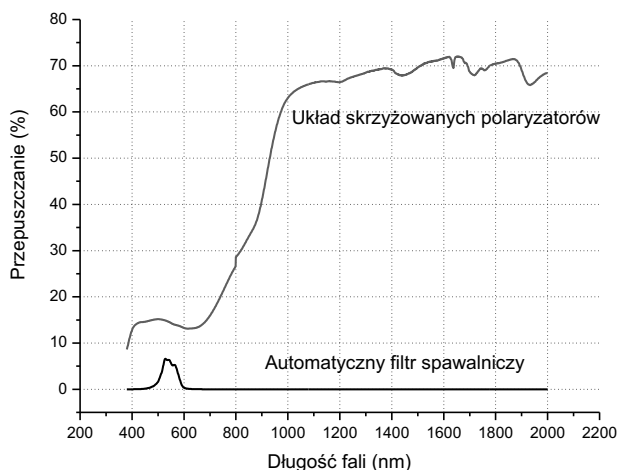
Dla wybranych efektów zbadano, w jaki sposób zmiana transmisji promieniowania widzialnego koreluje ze zmianami przepuszczania promieniowania podczerwonego w kontekście spełnienia wymagań stawianym filtrom optycznym chroniącym przed podczerwienią [6]. Badaniom poddano typowy ekran ciekłokrystaliczny

używany w konstrukcji automatycznych filtrów spawalniczych oraz układ skrzyżowanych polaryzatorów (filtry laboratoryjne POLARIZING). Charakterystyki widmowe zmierzono metodą spektrofotometryczną w zakresie długości fali od 380 do 2000 nm z wykorzystaniem dwuwiązkowego spektrometru Cary 5000 (Australia). Pomiary przeprowadzono dla stanu jasnego i ciemnego. Stan jasny oznacza maksymalną ilość światła, jaka jest przepuszczana przez ekran ciekłokrystaliczny lub układ skrzyżowanych polaryzatorów. W stanie ciemnym w ekranie ciekłokrystalicznym cząsteczki ciekłego kryształu nematycznego są ustawione prostopadle do kierunku polerowania płytek. W tym stanie przez ekran ciekłokrystaliczny przepuszcza minimalną ilość światła. Podobnie, dla układu skrzyżowanych polaryzatorów, w stanie ciemnym płaszczyzny polaryzacji obu polaryzatorów są względem siebie ustawione prostopadle.

Na podstawie zmierzonych charakterystyk widmowych wyznaczono współczynnik przepuszczania światła oraz średnie widmowe współczynniki przepuszczania podczerwieni dla zakresów od 780 do 1400 nm i od 780 do 2000 nm. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 5.

Tabela 3. Przepuszczanie światła i promieniowania podczerwonego.
Table 3. The passage of light and infrared radiation.

Zastosowany efekt	Przepuszczanie w stanie jasnym			Przepuszczanie w stanie ciemnym		
	Współczynnik przepuszczania światła τ_V [%]	Średni widmowy współczynnik przepuszczania podczerwieni (780-1400) nm τ_A [%]	Średni widmowy współczynnik przepuszczania podczerwieni (780-2000) nm τ_N [%]	Współczynnik przepuszczania światła τ_V [%]	Średni widmowy współczynnik przepuszczania podczerwieni (780-1400) nm τ_A [%]	Średni widmowy współczynnik przepuszczania podczerwieni (780-2000) nm τ_N [%]
Zmiana gęstości optycznej w układzie zawierającym substancje ciekłokrystaliczne	3,07	0,00	0,00	0,001	0,00	0,00
Polaryzacja światła	14,0	58,2	63,82	0,04	57,6	61,3



Rys. 5. Przepuszczanie światła i promieniowania podczerwonego (stan jasny)
 Fig 5. Light transmission and infrared transmission (light state)

6. Podsumowanie

Wyniki przepuszczania badanego ekranu ciekłokrystalicznego wskazują, że konstrukcja tego typu może być wykorzystana również, jako automatyczny filtr optyczny chroniący przed podczerwienią. Znacznym ograniczeniem w zastosowaniu tego typu rozwiązania jest stosunkowo niewielka wartość współczynnika przepuszczania światła. Dla badanego filtra jest to wartość około 3%. Jest to poziom przepuszczania światła dla filtrów chroniących przed podczerwienią o oznaczeniu 4-5. We wszystkich dostępnych rozwiązaniach automatycznych filtrów spawalniczych wartości współczynników przepuszczania światła wahają się między 1,4 a 3,1%. Zakres ten wynika z wymagań, jakie są stawiane automatycznym filtrom spawalniczym dla stanu jasnego. Współczynnik przepuszczania w tym zakresie powinien mieścić się w przedziale do 1,2 do 3,2% [11]. Ekran ciekłokrystaliczny, którego wyniki badań przedstawiono powyżej został wybrany z dostępnego asortymentu tego typu filtrów również pod kątem spełnienia wymagań stawianych filtrom służącym do ochrony przed podczerwienią. Dla filtrów spawalniczych (pasywnych i aktywnych) wymagania przepuszczania promieniowania podczerwonego są znacznie zawężone w stosunku do wymagań określonych dla filtrów chroniących przed podczerwienią.

W przypadku zastosowania efektu polaryzacji zakres zmian przepuszczania promieniowania widzialnego jest dużo większy (około 14%). Typowe optyczne elementy polaryzacyjne przepuszczają jednak znaczną część promieniowania podczerwonego. Wykorzystane tego efektu wymaga więc, aby konstrukcja automatycznego filtra optycznego chroniącego przed podczerwienią posiadała dodatkowy element optyczny tłumiący (pochłaniający lub pochłaniająco – odbijający) promieniowanie podczerwone.

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

- [1] Koradecka D.: *Bezpieczeństwo i higiena pracy*, CIOP-PIB, Warszawa, 2010, s. 531-538.
- [2] Wolska A.: *Promieniowanie optyczne w środowisku pracy*, CIOP-PIB, Warszawa, 2013, s. 133-165.
- [3] Gralewicz G., Owczarek G., Kubrak J.: *Interferencyjne filtry blokujące szkodliwe promieniowanie podczerwone na gorących stanowiskach pracy*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 256, 2012, s. 23-35.
- [4] Glass A.J., Guenther A.H.: *Laser Inducted Damage In Optical Materials*, Applied Optics Vol. 18, Issue 13, 1979, s. 2112-2129.
- [5] Dyrektywa 2006/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (promieniowaniem optycznym).
- [6] PN-EN 166: 2005 Ochrona indywidualna oczu. Wymagania.
- [7] PN-EN 171: 2005 Ochrona indywidualna oczu. Filtry chroniące przed podczerwienią. Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecane stosowanie.
- [8] Pościk A., Kubrak J., Włodarski L.: *Barwniki fotochromowe, interferencja światła i automatyczne filtry spawalnicze*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 228, 2007, s. 155-166.
- [9] Owczarek G.: *Opracowanie polimerowych sensorów temperatury i rozciągania do zastosowani w konstrukcji materiałów barierowych*. Projekt nr V.B.07, CIOP-PIB, 2013.
- [10] Owczarek G.: *Opracowanie wytycznych dla optymalizacji konstrukcji automatycznych filtrów spawalniczych, uwzględniających rzeczywiste warunki użytkowania*. Projekt nr 03.8.18, CIOP-PIB, 2001.
- [11] PN-EN 379+A1: 2010 Ochrona indywidualna oczu. Automatyczne filtry spawalnicze.