

# Analiza właściwości optycznych materiałów typu smart glass w zakresie możliwości zastosowania do cieniowania wnętrz budynków oraz ograniczenia zanieczyszczenia światłem

*Analysis of the optical properties of smart glass materials in terms of their applicability for shading building interiors and reducing light pollution*

**Streszczenie.** Regulację transparentności przegród szklanych można uzyskać stosując technologie smart glass wykorzystujące film LCD o sterowanym polem elektrycznym przepuszczaniu, pochłanianiu i odbiciu światła. Artykuł przedstawia wyniki badań elementów typu smart glass oraz analizę możliwości zastosowania takich elementów w regulacji transmisji strumienia świetlnego oraz w funkcji dyfuzorów poprawiających równomierność oświetlenia.

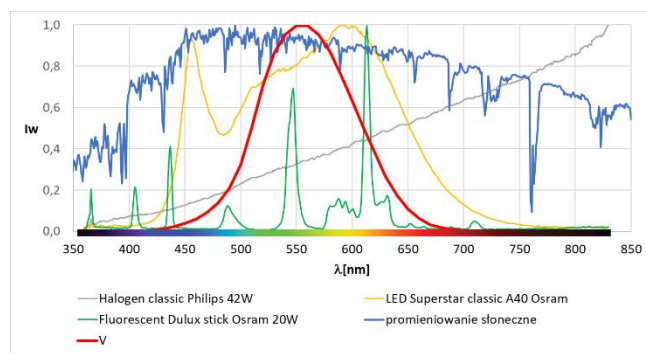
**Abstract.** Regulation of the transparency of glass partitions can be achieved using smart glass technologies using LCD film with electric field-controlled light transmission, absorption and reflection. This paper presents the results of research on smart glass elements and an analysis of the feasibility of using such elements in the regulation of light transmission and as diffusers to improve lighting uniformity.

**Słowa kluczowe:** Smart glass, optoelektronika, technika świetlna, pomiary optyczne.

**Keywords:** Smart glass, optoelectronics, lighting technique, optical measurements.

## Wstęp

Światło jest jednym z najważniejszych czynników, które tworzy środowisko w jakim żyjemy. Promieniowanie słoneczne jest głównym źródłem energii na Ziemi. Światło jest konieczne do tego, by mógł poprawnie działać zmysł wzroku. Odpowiada on za ponad 80% informacji spośród łącznie docierających do naszego mózgu. Światło jest też czynnikiem, który reguluje naturalny rytm naszej aktywności dobowej. Z uwagi na wymienione procesy, chcąc przedłużyć okres aktywności szczególnie jesienią i zimą korzystamy ze światła sztucznego. Promieniowanie generowane przez elektryczne źródła światła ma jednak inny charakter widmowy i nie jest w stanie w pełni zastąpić naturalnego światła słonecznego w oświetleniu ogólnym jak również scenicznym – zapewniając najwyższą jakość odwzorowania barw (rys. 1) [1-3].



Rys. 1. Charakterystyki widmowe promieniowania słonecznego, widmowej skuteczności świetlnej w widzeniu fotonowym oraz wybranych elektrycznych źródeł światła

Na rys. 1 linią niebieską została przedstawiona charakterystyka widmowa promieniowania słonecznego oraz zmierzone charakterystyki wybranych elektrycznych źródeł światła białego (halogenu, źródła LED o barwie ciepłobiałej i świetlówki). Dodatkowo linią czerwoną została oznaczona charakterystyka względnej czułości widmowej w widzeniu dziennym (fotonowym) zdefiniowana przez CIE (Międzynarodową Komisję Oświetleniową). Każdy z przedstawionych przebiegów charakteryzuje się odmiennym

kształtem. Dodatkowo promieniowanie słoneczne w zależności od pory dnia, pory roku oraz warunków atmosferycznych charakteryzuje się inną wartością natężenia napromienienia i nieco innym kształtem charakterystyki widmowej. Ze względu na uzyskiwanie innych efektów w każdym z przypadków w analizie zjawisk związanych z przepuszczaniem (transmisją), pochłanianiem (absorbpcją), rozpraszaniem i odbiciem należy uwzględnić zależności widmowe.

Budynki zawierają okna, fasady lub poszycia dachowe wykonane ze szkła. Pozwalają one na wykorzystanie w oświetleniu światła słonecznego, które charakteryzuje się najwyższymi parametrami jakościowymi w zakresie potrzeb oświetleniowych oraz pozwala na poprawienie efektywności energetycznej obiektu.

Poprawa efektywności energetycznej poprzez zastosowanie elementów smart glass jest możliwa w dwóch obszarach: możliwości zwiększenia poziomu wykorzystania światła słonecznego lub ograniczenia możliwości przegrzewania pomieszczeń w okresie letnim.

Trudnością w efektywnym wykorzystaniu światła słonecznego jest jego zmienność obserwowana zarówno w cyklu rocznym, dobowym oraz związana z warunkami atmosferycznymi. W polskich warunkach w okresie jesienno-zimowym występuje niedobór światła naturalnego, natomiast w okresie letnim często konieczne jest jego ograniczenie. Dodatkowo elementy takie mogą pełnić funkcję dyfuzorów pozwalając na uzyskanie większej równomierności oświetlenia.

Regulację transparentności przegród szklanych można uzyskać stosując technologie smart glass wykorzystujące film LCD o sterowanym polem elektrycznym przepuszczaniu, pochłanianiu i odbiciu.

## Rola naturalnego światła słonecznego we współczesnej technice

Najlepsze dla naszego zmysłu wzroku jest naturalne światło słoneczne. Nasz organizm jest przystosowany do codziennych zmian jego natężenia oraz widma. Zmiany te są głównymi czynnikami regulującymi naturalny rytm aktywności dobowej naszego organizmu poprzez wpływanie na gospodarkę hormonalną w zakresie wydzielania

melatoniny, kortyzolu i serotoniny. Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi dzięki atmosferze, w wyniku absorpcji jest pozbawione większości promieniowania w nadfiolecie (w większych dawkach szkodliwego dla organizmów żywych). Kwestia zagrożeń związanych z promieniowaniem UV [4], które może być również generowane w czasie niektórych procesów technologicznych może zostać rozwiązana poprzez stosowanie odpowiednich przegród szklanych i filtrów o wysokiej absorpcji w tym również w technologiach z wykorzystaniem specjalnych powłok i elementów smart glass.

Światło słoneczne charakteryzuje się bardzo wysoką wartością wskaźników oddawania barw. Dodatkowo nie występuje również w jego przypadku zjawisko tętnienia w przeciwieństwie do większości elektrycznych źródeł zasilanych prądem przemiennym. Z uwagi na ograniczenia technologiczne i kosztów wytwarzania oraz jednocześnie dążenie do uzyskania możliwie wysokiej skuteczności świetlnej sztucznych źródeł światła ich widmo promieniowania zwykle nie jest ciągłe i nie pokrywa całego zakresu widzialnego. Wykorzystanie w oświetleniu naturalnego światła słonecznego w możliwie maksymalnym stopniu zapewnia najwyższą jakość widzenia (charakteryzowaną za pomocą parametrów jakościowych, jak np. wskaźniki oddawania barw: Ra, Rf, Rg, TLCl-2012) oraz pozwala na uzyskanie wysokiej efektywności energetycznej budynków.

Nasz organizm jest przystosowany do światła słonecznego zarówno w zakresie jego widma jak również rytmu zmian dobowych. Charakteryzuje się ono jednocześnie wysoką jakością, pomaga zachować nasze zdrowie w dobrej kondycji oraz nie obciąża środowiska emisją zanieczyszczeń.

Wadą światła naturalnego jest trudność w precyzyjnym przewidzeniu jego dostępności. Promieniowanie słoneczne zarówno w zakresie ilościowym jak również jakościowym podlega rytmom rocznym i dobowym oraz szybkim zmianom związanym z warunkami atmosferycznymi [5]. Obserwowany ruch Słońca na nieboskłonie każdego dnia przebiega po innej drodze. Powoduje to zarówno zmianę długości dnia jak również ciągłą zmianę kąta padania światła. Podobny problem dotyczący zmienności promieniowania słonecznego jest również analizowany w zakresie sterowania pracą elektrowni fotowoltaicznych w celu maksymalizacji ilości generowanej energii [6, 7]. Opracowane na te potrzeby mechanizmy szacowania dostępności promieniowania i prognozowania jego zmian można wykorzystać w sterowaniu oświetleniem. Efektywna współpraca oświetlenia sztucznego ze światłem naturalnym możliwa jest z wykorzystaniem systemów smart lighting [8, 9] i elementów smart glass [10, 11]. Pozwalają one na regulację wartości emitowanego przez źródła strumienia świetlnego jak również charakteru widmowego światła (zmiany temperatury barwowej). Umożliwia to w pewnym stopniu dopasowanie pracy źródeł sztucznych do chwilowych potrzeb i śledzenia naturalnych zmian obserwowanych w przypadku światła słonecznego. W mechanizmach predykcji i sterowania coraz częściej jest wykorzystywane uczenie maszynowe [12, 13] oraz analiza prowadzona z użyciem sztucznej inteligencji [14].

W polskich warunkach geograficznych w okresie jesiennie-zimowym występuje niedobór światła naturalnego, natomiast latem w oświetleniu często konieczne jest jego ograniczanie. Może być w tym celu wykorzystywana technika smart glass, która pozwala na regulację ilości przepuszczanego przez okna promieniowania optycznego. Promieniowanie nadfioletowe powinno być tłumione, zaś światło widzialne i promieniowanie podczerwone w zależności od potrzeby przepuszczane lub rozpraszane i

pochłaniane. Ilość przepuszczanego przez okna światła zależy od wielkości odbicia na powierzchniach szyby oraz stopnia rozpraszania i pochłaniania w szkło. Całkowite wartości zależą od liczby i grubości szyb oraz powłok jakie zostały na nie naniesione. Technika smart glass pozwala dodatkowo na zmianę funkcjonalności na przykład poprzez przemianę okna na ekran oraz tworzenie ekranów przeziernych [15, 16].

Omawiane elementy dzięki możliwym zmianom właściwości transmisyjnych dają możliwość regulacji poziomu emisji co można wykorzystać również do ograniczenia zanieczyszczenia światłem w otoczeniu budynków z elewacjami szklanymi. Jest to coraz większy problem we współczesnym świecie, który nie znalazł jeszcze pełnego rozwiązania. Zanieczyszczenie światłem wpływa istotnie na funkcjonowanie ludzi, zwierząt i całego otoczenia oraz stanowi koszt związany z koniecznością produkcji i dystrybucji dodatkowej energii oraz generacji światła, z którego nie korzystamy, a które obciąża system [17, 18].

Głównym wyzwaniem pozostaje obecnie uzyskanie możliwie wysokiej efektywności energetycznej gospodarki oraz budynków. W słonecznym letnim dniu należy zadbać o ograniczenie możliwości przegrzania pomieszczeń, co daje oszczędności w zakresie zasilania systemów klimatyzacji.

### Właściwości elementów typu smart glass

Strumień świetlny padający na powierzchnię szyby dzieli się na strumień wnikający (załamany) i odbity (rys. 2). Strumień wnikający dzieli się natomiast na pochłonięty, przepuszczony i ponownie odbity na drugiej powierzchni szyby.

Wartość współczynnika odbicia na granicy dwóch ośrodków optycznych o różnych wartościach współczynników załamania zależy od kąta padania [19]:

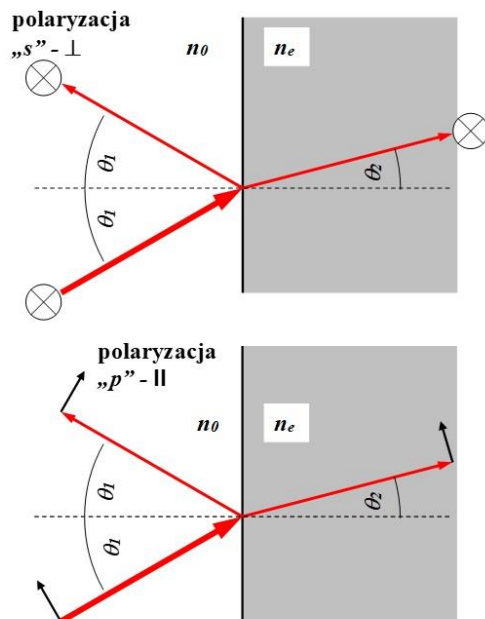
$$(1) \quad \rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right]$$

gdzie:

$\rho$  – współczynnik odbicia od powierzchni granicznej ośrodków 1 i 2,

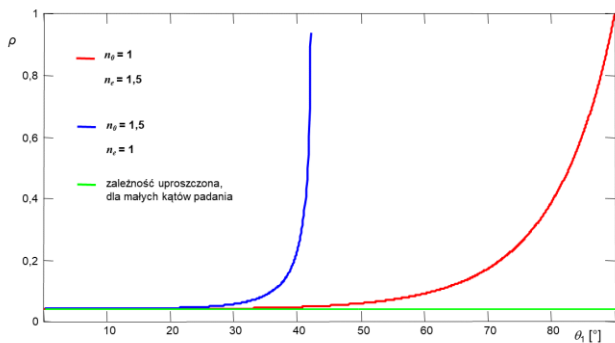
$\theta_1$  – kąt padania na powierzchnię graniczną,

$\theta_2$  – kąt załamania (kąt załamania związany jest z kątem padania prawem Snelliusa).



Rys. 2. Zastosowane oznaczenia kątów i kierunków polaryzacji względem płaszczyzny padania na granicę dwóch ośrodków optycznych

Przy dużych kątach padania współczynnik odbicia może przekraczać 50%. Jego wartość zależy zarówno od kąta padania jak również różnicy wartości współczynników załamania światła ośrodków, na których granicy zachodzi zjawisko (rys.3). Minimalna wartość współczynnika odbicia od jednej powierzchni powietrze-szkło wynosi około 4%. Uwzględniając odbicie strumienia świetlnego przechodzącego przez okno od dwóch powierzchni szyb wynosi to już około 8% na każdą szybę.



Rys. 3. Zależność wartości współczynnika odbicia od kąta padania światła zdepolaryzowanego na granicę ośrodków

Ponieważ wartość współczynnika odbicia zależy od stanu polaryzacji padającego światła możliwe jest zapisanie oddzielnych zależności dla kierunku polaryzacji równoległej i prostopadłej do płaszczyzny padania. Równania przyjmują wtedy postać [20]:

$$(2) \quad r_s = r_{\perp} = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n_0 \cos \theta_1 - \sqrt{n_e^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_0 \cos \theta_1 + \sqrt{n_e^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}$$

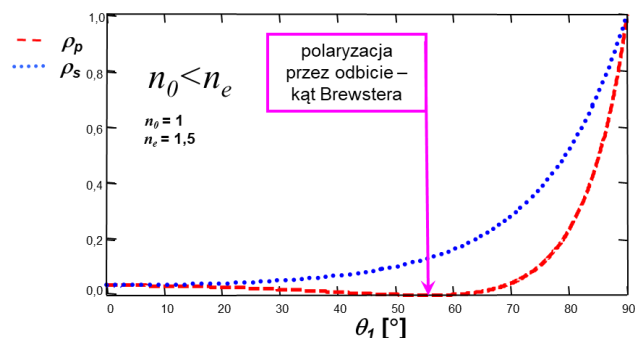
$$(3) \quad r_p = r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n_e^2 \cos \theta_1 - n_0 \sqrt{n_e^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_e^2 \cos \theta_1 + n_0 \sqrt{n_e^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}$$

$$(4) \quad \rho_s = r_s^2$$

$$(5) \quad \rho_p = r_p^2$$

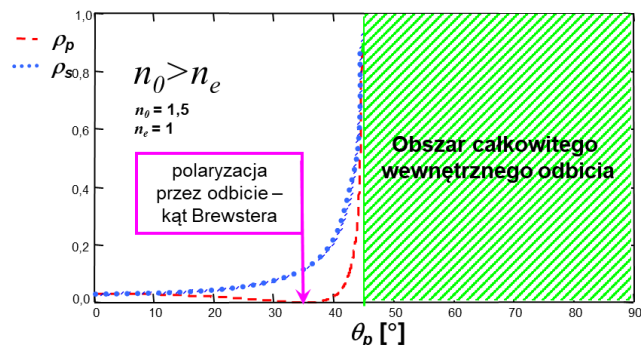
gdzie:

$r_p$  – współczynnik odbicia amplitudy fali z polaryzacją p (wektor  $E \rightarrow$  jest równoległy do padającej powierzchni promienia świetlnego),  
 $r_s$  – współczynnik odbicia amplitudy fali z polaryzacją s (wektor  $E \rightarrow$  jest prostopadły do padającej powierzchni promienia świetlnego),  
 $n_0$  – współczynnik załamania światła ośrodka z kierunku padania światła,  
 $n_e$  – współczynnik załamania światła ośrodka, na który pada światło.



Rys. 4. Zależność wartości współczynnika odbicia od kąta padania na granicę ośrodków przy padaniu fali z kierunku ośrodka o mniejszej wartości współczynnika załamania światła (padanie z kierunku powietrza  $n_0$  na szkło  $n_e$  - odbicie na powierzchni szyby)

W przypadku padania światła z kierunku powietrza na powierzchnię szyby zawsze część strumienia wniknie do szkła (rys. 4). Natomiast rozważając propagację fali wewnątrz szyby ( $n_e=1,5$ ) otoczonej przez powietrze (które jest ośrodkiem o znacznie mniejszej wartości współczynnika załamania światła  $n_0=1 < n_e=1,5$ ) po przekroczeniu wartości kąta granicznego ( $41,8^\circ$ ) jest możliwe uzyskanie całkowitego wewnętrznego odbicia (rys. 5). Zjawisko to może powodować „uwięzienie światła” w szybie, która działa wówczas jak światłowód planarny. Część strumienia świetlnego który ulega rozproszeniu w materiale typu smart glass pada na powierzchnię wyjściową pod kątem większym od granicznego i ulega „uwięzieniu” i pochłanianiu oraz odbiciu wstecznemu w szkło.



Rys. 5. Zależność wartości współczynnika odbicia od kąta padania na granicę ośrodków przy padaniu fali z kierunku ośrodka o większej wartości współczynnika załamania światła (padanie z kierunku szkła  $n_0$  na powietrze  $n_e$  - wewnątrz szyby)

Przy kątach padania na powierzchnię czołową mniejszych od  $20^\circ$  (rys. 4 i 5) można w obliczeniach pominąć zależność odbicia od stanu polaryzacji światła padającego i oszacować wartość współczynnika odbicia ze wzoru:

$$(6) \quad \rho = \left( \frac{n_0 - n_e}{n_0 + n_e} \right)^2$$

Wartość współczynnika załamania światła szkieł i polimerów zależy od długości fali:

$$(7) \quad n(\lambda) \neq const$$

gdzie:  $\lambda$  – długość fali

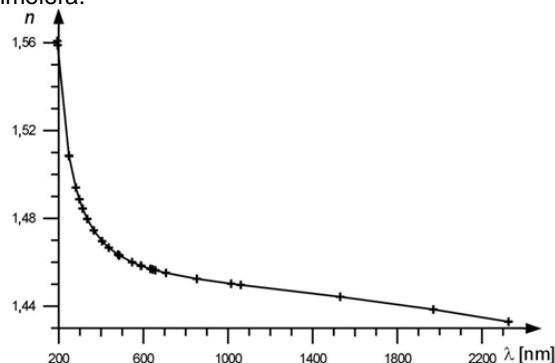
Wartość współczynnika załamania światła w zakresie (200 nm – 2400 nm) najczęściej opisywana jest przez dyspersyjną formułę Sellmeiera [21, 22]:

$$(8) \quad n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

gdzie:

$\lambda$  – długość fali w  $\mu\text{m}$

$B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$  - współczynniki do dyspersyjnej formuły Sellmeiera.



Rys. 6. Zależność wartości współczynnika załamania światła szkła krzemionkowego w funkcji długości transmitowanej fali świetlnej



W przypadku szkła krzemionkowego wyznaczono zależność współczynnika załamania światła od długości fali w zakresie widzialnym oraz bliskiej podczerwieni i przedstawiono na rys. 6.

Elementy smart glass są tworzone jako wielowarstwowe zawierające zarówno warstwy szklane oraz polimerowe. Zmiany wartości współczynnika załamania materiałów polimerowych są znacząco większe niż materiałów szklanych. Wynika to z większej wartości rozszerzalności termicznej.

Łączne straty transmisji strumienia świetlnego muszą więc uwzględnić pochłanianie w objętości materiału oraz odbicie od wszystkich powierzchni granicznych.

$$(9) \quad \tau = \tau(x)(1 - \rho_{1,2})(1 - \rho_{2,1})$$

Bilans strumienia podczas przejścia przez szybę można zapisać

$$(10) \quad \Phi = \Phi_p + \Phi_r + \Phi_\alpha$$

$$(11) \quad 1 = \frac{\Phi_p}{\Phi} + \frac{\Phi_r}{\Phi} + \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}$$

gdzie:

$\Phi$  – strumień świetlny padający,

$\Phi_p$  – strumień świetlny odbity,

$\Phi_r$  – strumień świetlny przepuszczony,

$\Phi_\alpha$  – strumień świetlny pochłonięty.

$$(12) \quad \rho = \frac{\Phi_p}{\Phi}, \quad \tau = \frac{\Phi_r}{\Phi}, \quad \alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}$$

$$(13) \quad 1 = \rho + \tau + \alpha$$

gdzie:

$\rho$  – całkowity współczynnik odbicia,

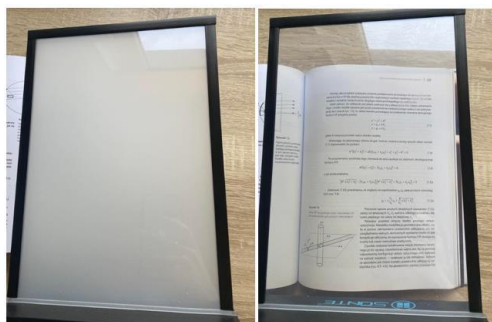
$\tau$  – całkowity współczynnik przepuszczania,

$\alpha$  – całkowity współczynnik pochłaniania,

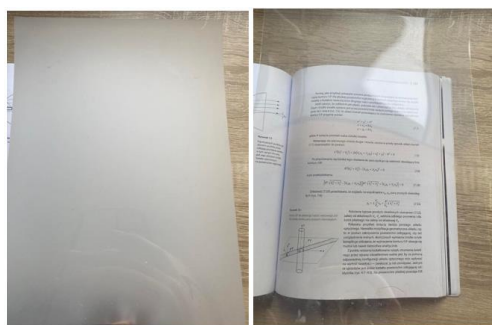
Ponieważ wartości wymienionych współczynników są funkcją długości fali, przy każdej jej długości musi być zachowana zależność:

$$(14) \quad 1 = \rho_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda$$

Znając widmową charakterystykę przepuszczania i charakterystykę widmową źródła można wyznaczyć wartość całkowitego współczynnika przepuszczania promieniowania dowolnego układu źródło-smart glass.



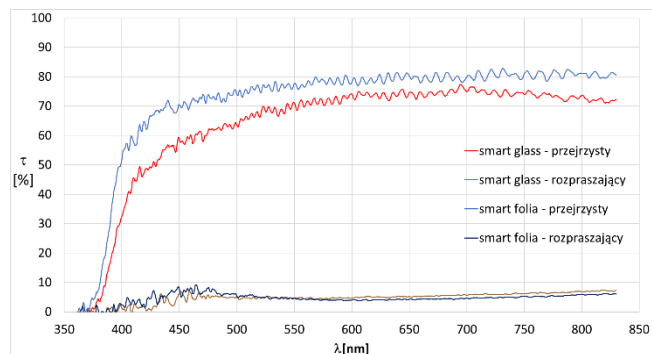
Rys. 7. Badany element smart glass w dwóch stanach rozpraszającym i przezroczystym



Rys. 8. Badana smart folia w dwóch stanach rozpraszającym i przezroczystym

Badaniu poddano dwa elementy, jeden typu smart glass marki Sonte oraz smart folię marki Amplus. Oba były oparte o technologię wykorzystującą film LCD o sterowanym polem elektrycznym przepuszczaniu, pochłanianiu i odbiciu. W zależności od stanu jaki zostanie wysterowany mogą być one przezroczyste (przepuszczając światło w sposób kierunkowy) lub przeświecalne (przepuszczając strumień świetlny głównie w sposób rozproszony) (rys. 7 i 8).

Charakterystyki widmowe transmisji (przepuszczania) zostały zmierzone z użyciem spektrometru StellarNet Inc GREEN-Wave UVIS-50 oraz szerokopasmowego deuterowo-halogenowego źródła światła UV-VIS StellarNet Inc. Wyznaczone charakterystyki widmowe współczynnika transmisji badanego elementu typu smart glass oraz smart folii w stanach przejrzystym i rozpraszającym zostały przedstawione na rys. 9.



Rys. 9. Zależność wartości całkowitego współczynnika przepuszczania badanych elementów smart glass oraz smart folii

Z uwagi na mniejszą liczbę warstw smart folia charakteryzuje się nieco większą wartością współczynnika przepuszczania w stanie przejrzystym osiągając w całym zakresie widzialnym średnio 71,5% a w zakresie ograniczonym do 400-830 nm 76,6%. Maksymalna wartość transmisji osiągnięta jest dla światła o barwie żółtej, pomarańczowej i czerwonej i wynosi 82,8%. Współczynnik przepuszczania elementu smart glass (element składał się z trzech warstw: szkło, folia, szkło) jest nieco mniejszy i w stanie przejrzystym w całym zakresie widzialnym wynosi średnio 63,4%, w zakresie ograniczonym do 400-830 nm 68,5%. Maksymalna wartość transmisji osiągnięta jest dla światła o barwie żółtej, pomarańczowej i czerwonej i wynosi 77,3%.

Przebiegi pokazują również zmniejszenie przepuszczania (transmisji) w zakresie promieniowania fioletowego związane ze stopniowo zwiększającą się absorpcją w zakresie promieniowania bliskiego UV. Kształt charakterystyki wskazuje na nieznaczną zmianę barwy światła przechodzącego przez badane elementy. Zmiana jest niezauważalna dla obserwatora, ze względu na naturalne mechanizmy adaptacji zmysłu wzroku.

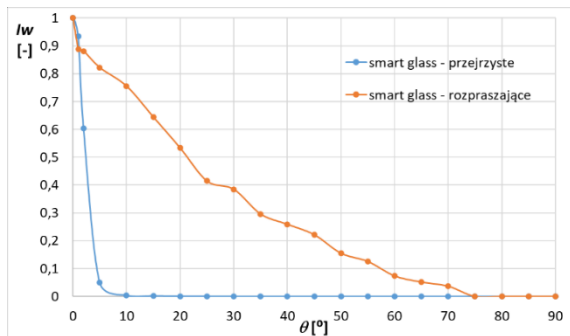
Współczynnik transmisji w stanie rozpraszającym obu materiałów jest bardzo zbliżony i wynosi średnio w całym mierzonym zakresie 4,6% w przypadku elementu smart glass i 4,5% smart folii. Maksymalna wartość współczynnika transmisji (w stanie rozpraszającym) elementu smart glass wynosi 7,7% oraz 9,1% w przypadku smart folii.

Można ocenić, że badane elementy pod względem barwy zachowują się neutralnie.

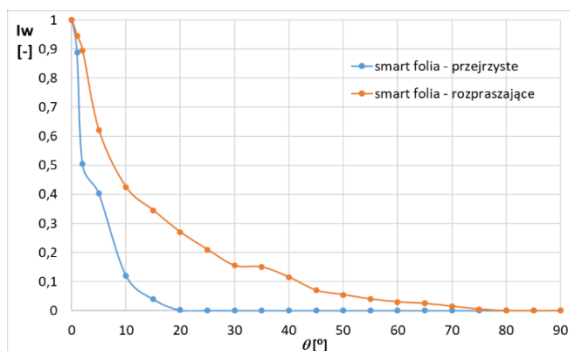
Kształt krzywych wskaźnikowych rozpraszania elementu smart glass oraz smart folii w stanach rozpraszającym i przezroczystym przedstawione są na rys. 10 i 11. W stanie przejrzystym stopień rozproszenia jest bardzo niski i nie zakłóca obserwacji obrazu za szybą.

Wraz ze znacznym zmniejszeniem transmisji przy przejściu ze stanu przezroczystego do rozpraszającego

zwiększa się znacznie stopień rozpraszania nie pozwalając już na zaobserwowanie obrazu przez szybę (rys. 7 i 8).



Rys. 10. Krzywe wskaźnikowe rozpraszania elementu smart glass w obu stanach przezroczystym i rozpraszającym



Rys. 11. Krzywe wskaźnikowe rozpraszania smart folii w obu stanach przezroczystym i rozpraszającym

## Podsumowanie

Artykuł przedstawia wyniki badań elementów typu smart glass oraz wymienia możliwości ich zastosowania w regulacji

transmisji strumienia świetlnego. Ze względu na możliwość zmiany wartości współczynników przepuszczania pochłaniania i odbicia można je wykorzystać w utrzymaniu stałych warunków oświetleniowych z wykorzystaniem światła naturalnego. Technologia ta wpisuje się również w trend stosowania elementów smart, które wyposażone w odpowiednie czujniki mogą w sposób automatyczny dostosowywać się do zmieniającej się dostępności naturalnego światła słonecznego. Pozwala to na poprawienie wskaźników efektywności energetycznej budynków. Elementy takie mogą pełnić również funkcję dyfuzorów poprawiających równomierność oświetlenia.

Drugą grupą zastosowań takich elementów jest możliwość zmiany ich funkcjonalności i sposobu wykorzystania w zależności od potrzeby. Przykładem jest zamiana funkcji przezroczystych przegród szklanych na ekran lub okresowa możliwość wydzielenia ze wspólnej otwartej przestrzeni pomieszczeń poprzez „pojawienie się ścian” w miejscu gdzie były przezroczyste szyby np. na czas narady biznesowej.

*Przedstawione badania zostały zrealizowane na Wydziale Elektrycznym i sfinansowane w ramach WZ/WE-IA/3/2023*

**Autorzy:** Jacek Kuszniar, Faculty of Electrical Engineering, Białystok University of Technology, Białystok, Poland, E-mail: j.kuszniar@pb.edu.pl.

Aleksandra Wasilczyk, Faculty of Electrical Engineering, Białystok University of Technology, Białystok, Poland, E-mail: aleksandra.wasilczyk.108344@student.pb.edu.pl.

Paweł Kuszniar, Faculty of Mechanical Engineering, Białystok University of Technology, Białystok, Poland, E-mail: pakuszniar@gmail.com

## LITERATURA

- [1] American Society for Testing and Materials, "ASTM G173-03 reference spectra," (2013), <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>
- [2] Taylor A., Parkin I., Noor N., Tummeltshammer C., Brown M. S., Papakonstantinou I., A bioinspired solution for spectrally selective thermochromic VO2 coated intelligent glazing; Optics Express Vol. 21, Issue S5, pp. A750-A764 (2013)
- [3] Kuszniar Jacek, Influence of spectral properties of light sources on perceived and recorded images, Photonics Letters of Poland, 2021, vol. 13, nr 2, s.40-42.
- [4] Pawlak A., Potencjalne narażenie pracowników na technologiczne źródła promieniowania UV na wybranych stanowiskach pracy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 4, 231-236
- [5] Kuszniar J., Wojtkowski W., Impact of climatic conditions on PV panels operation in a photovoltaic power plant. In Proceedings of the 2019 15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Zakopane, Poland, 8–10 December 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8979985>
- [6] Kuszniar, J.; Wojtkowski, W. IoT Solutions for Maintenance and Evaluation of Photovoltaic Systems. *Energies* 2021, 14, 8567. <https://doi.org/10.3390/en14248567>.
- [7] Kuszniar J., Influence of Environmental Factors on the Intelligent Management of Photovoltaic and Wind Sections in a Hybrid Power Plant. *Energies*. 2023; 16(4):1716. <https://doi.org/10.3390/en16041716>
- [8] Michta E., Eljasz D., Lewandowski W., Standardy komunikacyjne stosowane w systemach Smart Lighting, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 3, 298-305
- [9] Kuszniar Jacek, Wojtkowski Wojciech, Spectral properties of smart LED lamps, Photonics Letters of Poland, 2020, vol. 12, nr 1, s.16-18
- [10] Lampert C.M., Large-area smart glass and integrated photovoltaics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 76, Issue 4, 2003, Pages 489-499
- [11] Parlikar S., Gautam K., Karnik G., "IoT enabled smart window:- novel switchable glass technology using Super Absorbent Polymer(SAP) and aqua driven mechanism," 2021 Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, India, 2021, pp. 5-10
- [12] Farid I., Priyadi A., Purnomo M., Abdillah M., Tjahjono A., Yorino N., Advanced Extreme Learning Machine for An Hour PV Forecast Using General Weather Data, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 1, 134-139
- [13] Islam M., Shareef H., Al-Hassan E., Deep Learning Technique for Forecasting Solar Radiation and Wind Speed for Dynamic Microgrid Analysis, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 4, 162-170
- [14] Raj R., Kos A., Artificial Intelligence: Evolution, Developments, Applications, and Future Scope, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 2, 1-13
- [15] Kumar N. M., Das P., Kanchikere J., "Applicability of Wearable Smart Glass for Solar Power Plant Operation and Maintenance," 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Bangalore, India, 2018, pp. 449-454
- [16] Muszyński P., Kuszniar J., Kuszniar P., Influence of geometry of HUD optical system on screen luminance distribution, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 1, 198-202
- [17] Fryc I., Tabaka P., Zanieczyszczenia nocnego nieboskonu światłem emitowany przez oprawy oświetlenia zewnętrznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 6, 46-49

- [18] Gallaway T., Olsen R.N., Mitchell D.M., The economics of global light pollution, *Ecological Economics*, Volume 69, Issue 3, 2010, Pages 658-665
- [19] Żagan W., Podstawy techniki świetlnej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [20] Palais J.C., Zarys telekomunikacji światłowodowej, WKŁ, Warszawa, 1991
- [21] SCHOTT Optical Glass, D-55014 Mainz, Hattenbrgstrasse 10, Germany, Catalogue 2000
- [22] Ohara GmbH Nordring 30 AD-65719 Hofheim Germany, Glass Catalog 2002