



Charakterystyki spektroskopowe i odpornościowe przeciwlaserowych filtrów ochronnych

ZYGMUNT MIERCZYK, MIROSŁAW KWAŚNY,
JADWIGA MIERCZYK, JAN KUBICKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule omówiono problematykę ochrony wzroku przed promieniowaniem laserowym oraz nowe rozwiązania przeciwlaserowych filtrów ochronnych opracowanych w Wojskowej Akademii Technicznej. Przedstawiono wyniki badań spektroskopowych i odporności energetycznej filtrów o różnej konstrukcji optycznej. W opracowaniu filtrów wykorzystano różne technologie materiałowe, w tym technologie wytopu szkieł krzemianowych i fosforanowych domieszkowanych różnymi domieszkami selektywnie pochłaniającymi promieniowanie w zadanym obszarze widmowym oraz technologie stosów cienkowarstwowych. Własności spektralne szkieł filtrowych zmodyfikowano interferencyjnymi pokryciami dielektrycznymi, uzyskując filtry selektywne na kilka długości fal, spełniające wymagania zwiększonej transmisji w obszarze widzialnym, podwyższonej odporności energetycznej i kontrastu widzenia oraz podnoszące komfort pracy przy dłuższym stosowaniu.

Słowa kluczowe: promieniowanie laserowe, ochrona wzroku, filtry przeciwlaserowe, szkła filtrowe, stopy cienkowarstwowe, odporność energetyczna

Symbole UKD: 621.375.826

1. Wstęp

W ostatnich latach wzrosła ilość zastosowań laserów. Lasery i urządzenia laserowe znajdują zastosowanie w nauce, medycynie (m.in. okulistyce, onkologii, chirurgii, stomatologii), telekomunikacji, nawigacji, obróbce materiałów nawet o największym stopniu twardości i trudnotopliwych, metrologii, technice audio-wizualnej, technice wojskowej i wielu innych dziedzinach przemysłu i gospodarki. Narzędziem najbardziej podatnym na szkodliwe skutki promieniowania laserowego

ze względu na wrażliwą strukturę biologiczną jest oko [1]. Istotnym zagadnieniem dotyczącym użytkowników laserów i urządzeń laserowych jest zachowanie wszelkich możliwych środków ostrożności, zapewniających bezpieczne stosowanie laserów. Zasady bezpieczeństwa przy użytkowaniu urządzeń emitujących promieniowanie laserowe określone są przez normy prawne ogłoszone przez Polski Komitet Normalizacyjny (tab. 1).

TABELA 1

Wykaz podstawowych norm Polskiego Komitetu Normalizacyjnego dotyczących zasad bezpieczeństwa przy pracy z laserami

Numer normy	Tytuł normy
PN-EN 207:2001	Ochrona indywidualna oczu. Filtry i środki ochrony oczu chroniące przed promieniowaniem laserowym
PN-EN 207:2001/A1:2005	Ochrona indywidualna oczu. Filtry i środki ochrony oczu chroniące przed promieniowaniem laserowym (Zmiana A1)
PN-EN 208:2000	Ochrona indywidualna oczu. Środki ochrony oczu do prac przy justowaniu laserów i układów laserowych (środki ochrony oczu do justowania laserów)
PN-EN 208:2000/A1:2005	Ochrona indywidualna oczu. Środki ochrony oczu do prac przy justowaniu laserów i układów laserowych (środki ochrony oczu do justowania laserów) (Zmiana A1)
PN-EN 60825-1:2005	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 1: Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika
PN-EN 60825-2:2005 (U)	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 2: Bezpieczeństwo światłowodowych systemów telekomunikacyjnych
PN-EN 60825-4:2001	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Osłony laserowe
PN-EN 60825-4:2001/A1:2005	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Osłony laserowe (Zmiana A1)
PN-EN 60825-4:2001/A2:2005	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Osłony laserowe (Zmiana A2)
PN-EN 60825-12:2005 (U)	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 12: Bezpieczeństwo systemów komunikacji optycznej, w przestrzeni swobodnej, stosowanych do przesłania informacji
PN-EN 12254:2002	Ekrany dla laserowych stanowisk roboczych. Wymagania bezpieczeństwa i badania
PN-EN 12254:2002/A1:2005	Ekrany dla laserowych stanowisk roboczych. Wymagania bezpieczeństwa i badania (Zmiana A1)
PN-EN 60601-2-22:2001	Medyczne urządzenia elektryczne. Szczegółowe wymagania bezpieczeństwa urządzeń laserowych diagnostycznych i terapeutycznych
PN-T-06705:2003	Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Wskazania dotyczące projekcji i widowsk laserowych

Działanie biologiczne promieniowania laserowego zależy od długości fali promieniowania lasera, wielkości strumienia mocy, czasu ekspozycji, właściwości absorpcyjnych tkanki, warunków środowiskowych oraz właściwości osobniczej. Wielkość uszkodzeń zależy od tego, czy tkanka biologiczna znajduje się pod działaniem wiązki odbitej, czy bezpośredniej. Sam stopień działania wiązki odbitej zależy od kształtu i gładkości powierzchni odbijającej [2].

Podstawą oceny narażenia na promieniowanie laserowe jest klasyfikacja laserów i urządzeń laserowych. Ponieważ promieniowanie laserowe o tej samej mocy, lecz o różnej długości fali może wywołać różne skutki podczas oddziaływania z tkanką biologiczną, lasery podzielono na klasy. Klasa lasera informuje użytkownika o skali zagrożeń związanych z użytkowaniem tych urządzeń. Obecnie wprowadzony został nowy podział na siedem klas (1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B, 4). Wcześniejszy podział dzielił lasery na pięć klas (1, 2, 3A, 3B, 4). W tabeli 2 przedstawiono charakterystykę klas laserów według aktualnie obowiązującego podziału.

TABELA 2

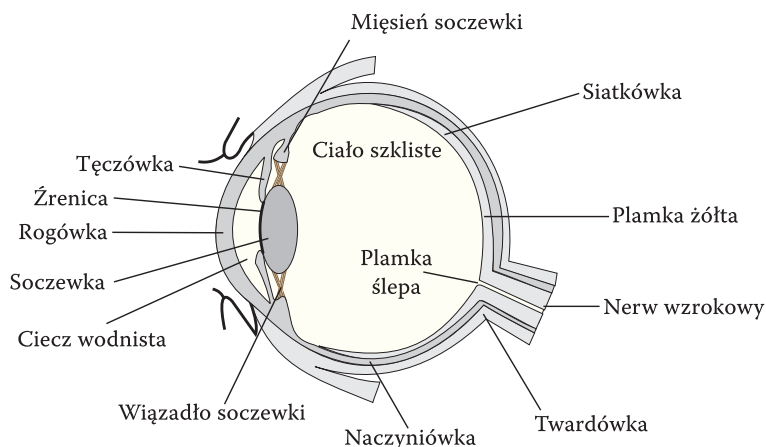
Podział laserów i urządzeń laserowych na klasy

Klasa 1	Lasery, które są bezpieczne w racjonalnie przewidywanych warunkach pracy
Klasa 1M	Lasery emitujące promieniowanie w zakresie długości fal do 302,5 nm do 4000 nm, które są bezpieczne w racjonalnych warunkach pracy, ale mogą być niebezpieczne podczas patrzenia w wiązkę przez przyrządy optyczne
Klasa 2	Lasery emitujące promieniowanie widzialne w przedziale długości fal od 400 nm do 700 nm. Ochrona oka jest zapewniona w sposób naturalny przez instynktowne reakcje obronne
Klasa 2M	Lasery emitujące promieniowanie widzialne w przedziale długości fal od 400 nm do 700 nm. Ochrona oka jest zapewniona w sposób naturalny przez instynktowne reakcje obronne, ale mogą być niebezpieczne podczas patrzenia w wiązkę przez przyrządy optyczne
Klasa 3R	Lasery emitujące promieniowanie w zakresie długości fal od 302,5 nm do 10 ⁶ nm, dla których bezpośrednie patrzenie w wiązkę jest potencjalnie niebezpieczne
Klasa 3B	Lasery, które są niebezpieczne podczas bezpośredniej ekspozycji promieniowania. Patrzenie na odbicia rozproszone jest zwykle bezpieczne
Klasa 4	Lasery, które wytwarzają niebezpieczne odbicia rozproszone. Mogą one powodować uszkodzenie skóry oraz stwarzają zagrożenie pożarem. Podczas obsługi laserów klasy 4 należy zachować szczególną ostrożność

Tkanki oka pełniące określone funkcje fizjologiczne zawierają duże ilości barwników silnie pochłaniających promieniowanie z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni.

Na rysunku 1 pokazano uproszczony schemat anatomii oka [3], a na rysunku 2 przedstawiono krzywą transmisji oka na drodze do siatkówki oraz krzywą absorpcji i rozpraszania promieniowania w siatkówce [4].

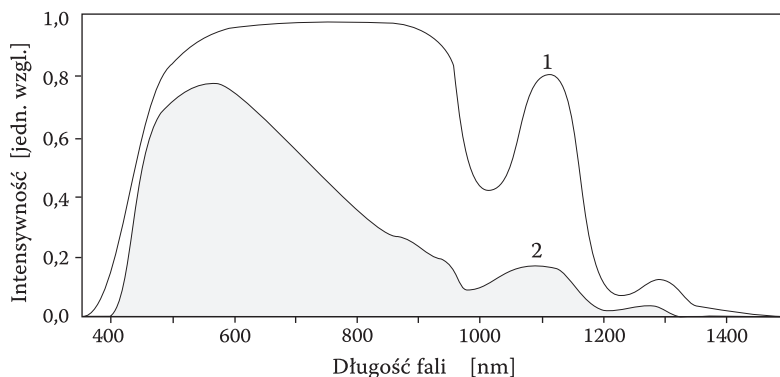
Szczególnie niebezpieczne dla oka są lasery z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni, ponieważ właśnie te cechy, które są niezbędne, aby oko było skutecznym przetwornikiem światła, powodują obecność promieniowania o dużej intensywności na silnie zabarwionych tkankach.



Rys. 1. Anatomia oka

Krotność zmian natężenia promieniowania od rogówki do siatkówki jest w przybliżeniu równa stosunkowi pola źrenicy do pola obrazu plamkowego na siatkówce. Wzrost jest spowodowany ogniskowaniem na siatkówce światła wchodzącego do źrenicy. Źrenica jest zmiennym otworem pomiarowym, a jej średnica może osiągać w młodym wieku wartość 7 mm maksymalnego rozszerzenia. Plamka na siatkówce odpowiadająca takiej źrenicy może mieć średnicę między 10 a 20 μm . Krotność zmian natężenia promieniowania między rogówką a siatkówką zawiera się w granicach $2 \cdot 10^5$ a $5 \cdot 10^5$. Jeśli przyjąć krotność zmian $5 \cdot 10^5$, to wiązka o gęstości mocy 50 Wm^{-2} na rogówce osiągnie $2,5 \cdot 10^7 \text{ Wm}^{-2}$ na siatkówce. Przyjęta w tym przypadku apertura o średnicy źrenicy 7 mm stanowi przypadek najgorszy z możliwych.

W zakresie działania fal o długości od 400 nm do 1400 nm może dojść do uszkodzenia siatkówki, ponieważ rogówka, soczewka, ciecz wodnista i ciało szkliste przepuszczają promieniowanie o tych długościach fal. Promieniowanie poniżej 400 nm i powyżej 1400 nm nie wnika do wnętrza oka, natomiast powoduje uszkodzenie rogówki. Zestawienie patologicznych efektów, mogących towarzyszyć nadmiernej ekspozycji oka przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 2. Wnikanie promieniowania do oka: 1 — transmisja oka na drodze promieniowania do siatkówki; 2 — absorpcja i rozpraszanie promieniowania w siatkówce

TABELA 3

Zestawienie patologicznych efektów nadmiernej ekspozycji oka na promieniowanie laserowe

Zakres długości fal	Efekt działania promieniowania laserowego
Ultrafiolet C 100-280 nm	Zapalne uszkodzenie rogówki
Ultrafiolet B 280-315 nm	Zapalne uszkodzenie rogówki
Ultrafiolet A 315-400 nm	Katarakta fotochemiczna, fotochemiczne i termiczne uszkodzenia siatkówki
Widzialny 400-780 nm	
Podczerwień A 780-1400 nm	Katarakta, oparzenie siatkówki
Podczerwień B 1400-3000 nm	Katarakta, przymglenie rogówki, oparzenie rogówki
Podczerwień C 3000 nm - 1mm	Wyłącznie oparzenie rogówki

Do zapewnienia dostatecznie bezpiecznych warunków pracy z laserami wymagane jest wyposażenie w okulary lub gogle ochronne, których szkła posiadają selektywne filtry tłumiące. Zgodnie z normą, przeciwlaserowe okulary ochronne powinna stosować każda osoba pracująca z laserem klasy 1M, 3R, 3B i 4 (PN-EN 207:2002/A1:2005) lub przebywająca w jego otoczeniu.

Wybierając filtry chroniące przed promieniowaniem laserowym, należy uwzględnić następujące elementy:

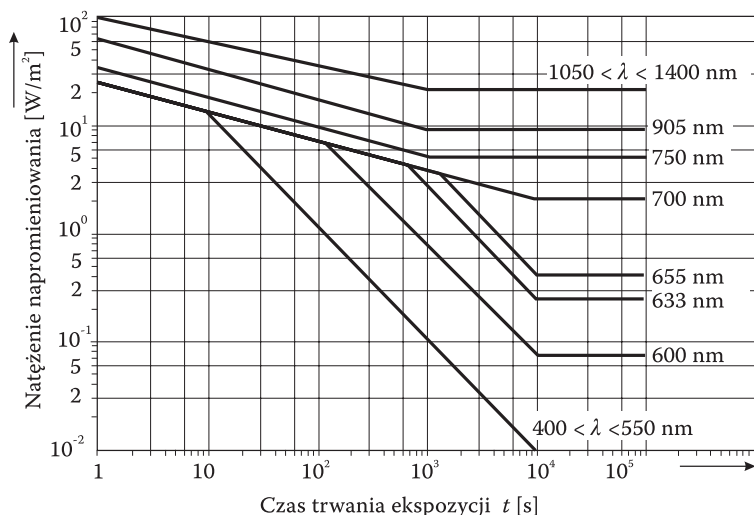
- typ lasera (D — lasery o pracy ciągłej, I — lasery impulsowe, R — lasery z modulacją dobroci, M — lasery z synchronizacją modów),
- zakres długości fali pracy lasera,
- maksymalną moc lub gęstość energii promieniowania laserowego.

- Filtry chroniące przed promieniowaniem laserowym dzielą się na dwie grupy:
- do ochrony przed promieniowaniem laserowym dla zakresu długości fal od 180 nm do 1000 μm (wymagania zawarte w PN-EN 207),
 - do justowania laserów, zapewniające ochronę przed promieniowaniem laserowym dla zakresu długości fal od 400 nm do 700 nm oraz mocy $\leq 1 \text{ mW}$ przy pracy ciągłej, tzw. lasery CW (wymagania zawarte w PN-EN 208).

Przepisy definiują wiele parametrów dotyczących bezpieczeństwa pracy z urządzeniami laserowymi, które odnoszą się do samego sprzętu, jak również do emitowanego promieniowania. Jednym z nich jest **Maksymalna Dopuszczalna Ekspozycja (MDE)** dla poszczególnych tkanek, tj. poziom promieniowania laserowego, na który w normalnych warunkach mogą być ekspozycjonowane osoby bez doznawania skutków szkodliwych dla zdrowia. Określenie **MDE** uwarunkowane jest następującymi czynnikami:

- długość fali emitowanego promieniowania laserowego,
- czas trwania impulsu laserowego lub czasu trwania ekspozycji,
- rodzaj tkanki narażonej na oddziaływanie,
- charakter ekspozycji (promieniowanie bezpośrednie lub rozproszone),
- rozmiar obrazu na siatkówce oka (dla zakresu 400-1400 nm).

Wartości **MDE** w przypadku bezpośredniej ekspozycji oka, dłuższej niż 1 s i dla wybranych długości fal z zakresu od 400 do 1400 nm pokazuje rysunek 3 [5].



Rys. 3. Maksymalna Dopuszczalna Ekspozycja (MDE) oka dla czasu powyżej 1 s, dla wybranych długości fal

Skuteczność tłumienia filtru jest wyrażana przez gęstość optyczną O.D. (Optical Density), którą wyznacza zależność: $O.D. = -\log_{10}(T)$, gdzie T oznacza współczynnik transmisji filtru.

Wartość O.D. odpowiada ilości promieniowania, które jest tłumione przez filtr. Jeżeli $O.D. = 1$, to filtr tłumia 10^1 , czyli 10-krotnie, a jego transmisja wynosi 10%. Gdy gęstość optyczna równa się 2, to tłumienie filtru wynosi 10^2 , czyli 100 razy (transmisja filtru wynosi 1%). Filtr o gęstości optycznej $O.D. = 6$ tłumia promieniowanie laserowe milion razy (10^6), a jego transmisja wynosi 0,0001%.

W Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej od wielu lat prowadzone są prace w zakresie konstrukcji i technologii filtrów przeciwlaserowych w oparciu o szkła barwne i interferencyjne pokrycia cienkowarstwowe [6-10]. Opracowano rozwiązania polepszające parametry ochronne i walory użytkowe filtrów (zdjęcie 1). Selekttywne odbicie światła przez cienkowarstwowy stos interferencyjny wykorzystano do konstrukcji filtrów przeciwlaserowych na wybrane długości fal [11-15].



Zdjęcie 1. Opracowane w Instytucie Optoelektroniki WAT przeciwlaserowe okulary ochronne

Wzrost transmisji i kontrastu osiągnięto przez nałożenie warstw antyrefleksyjnych. Naparowanie od strony wewnętrznej filtru warstw selektywnie odbijających promieniowanie laserowe wydłużyło warstwę absorpcyjną, co umożliwiło zastosowanie szkła o mniejszej grubości i ciężarze, przy tej samej gęstości optycznej. Selektywne odbicie światła przez cienkowarstwowy stos interferencyjny wykorzystano do konstrukcji filtrów przeciwlaserowych na I i II harmoniczną lasera YAG:Nd.

Podwyższenie kontrastu widzenia, rozjaśnienie obrazu i przystosowanie barwy do czułości spektralnej oka uzyskano dla filtrów pochłaniających promieniowanie czerwone i bliską podczerwień. Opracowano nowe rozwiązania filtrów absorpcyjno-interferencyjnych o bardzo wysokich parametrach absorpcyjnych, filtrów selektywnie pochłaniających oraz filtrów interferencyjnych na kilka długości fal, spełniające wymagania zwiększonej transmisji w obszarze widzialnym.

Opracowano również szkła krzemianowe i fosforanowe domieszkowane jonami metali przejściowych Pr^{3+} , Nd^{3+} i Sm^{3+} charakteryzujące się wąskimi, rozdzielonymi pasmami absorpcji w widzialnym obszarze widma i w bliskiej podczerwieni. Ta właściwość została wykorzystana do konstrukcji filtrów przeciwlaserowych tłumiących promieniowanie z zakresu generacji laserów He-Cd (442 nm), laserów na parach miedzi (578 nm), laserów barwnikowych (585 nm, 593 nm) i laserów na ciele stałym domieszkowanych Nd^{3+} (1050-1070 nm).

2. Badania spektroskopowe

Pomiary charakterystyk spektroskopowych filtrów przeciwlaserowych w obszarze widmowym 200÷3200 nm przeprowadza się na spektrofotometrze dwuwiązkowym LAMBDA-900 firmy Perkin-Elmer, natomiast w zakresie widmowym 1500÷25 000 nm — na fourierowskim spektrofotometrze 1725-X FT-IR firmy PERKIN ELMER.

Uzyskane wyniki w postaci zależności $T(\lambda)$ dla określonej grubości próbki filtru służą do dalszych obliczeń związanych z wyznaczeniem współczynnika absorpcji. Zgodnie z prawem Lamberta, natężenie promieniowania $I(\lambda)$ po przejściu przez materiał optyczny określone jest zależnością:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\alpha_\lambda \cdot d),$$

gdzie: $I_0(\lambda)$ — natężenie promieniowania padającego na materiał optyczny,
 α_λ — współczynnik absorpcji,
 d — grubość próbki materiału optycznego.

Współczynnik transmisji (przepuszczalność) zdefiniowany jest wzorem

$$T_\lambda = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(-\alpha_\lambda \cdot d).$$

Gęstość optyczna D_λ zdefiniowana jest jako ujemny logarytm dziesiętny z transmisji

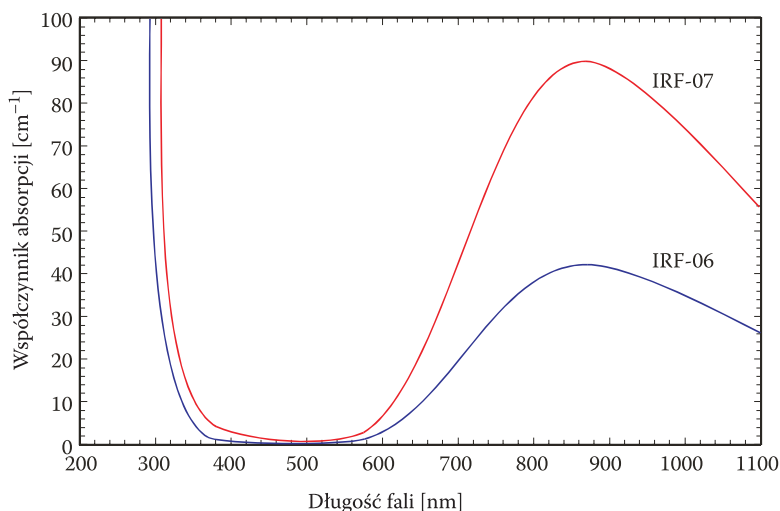
$$D_\lambda = \log\left(\frac{1}{T_\lambda}\right) = \log[\exp(\alpha_\lambda \cdot d)],$$

$$D_\lambda = 0,4342943 \cdot \alpha_\lambda \cdot d.$$

Dla określonej długości fali

$$\frac{D}{d} = \text{const}, \text{ czyli } \frac{D_1}{d_1} = \frac{D_2}{d_2}.$$

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki optyczne dwóch filtrów o różnej koncentracji Cu^{2+} w matrycy ze szkła krzemianowego. Przykładowo dla filtru IRF-07 dla długości fali 1064 nm współczynnik absorpcji wynosi $63,2 \text{ cm}^{-1}$, a transmisja całkowita w zakresie widzialnym 380÷780 nm (T_c) przekracza 40%.

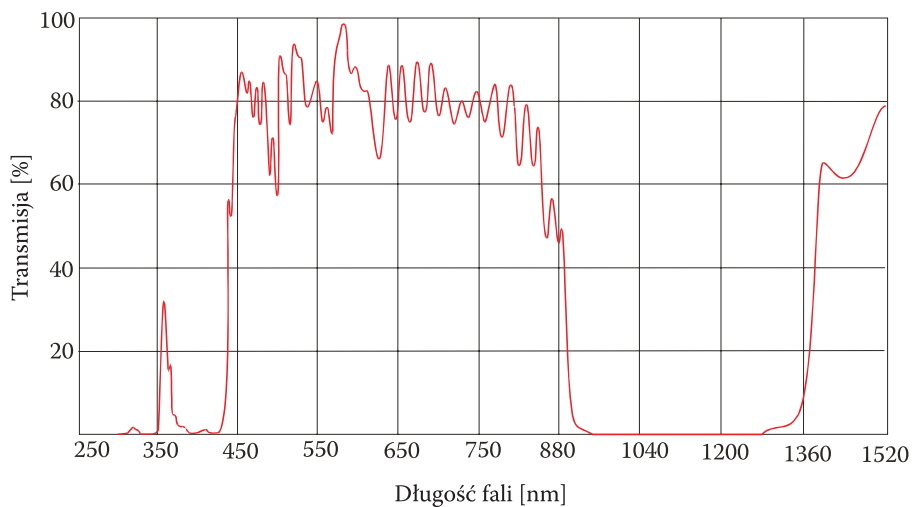


Rys. 4. Charakterystyka absorpcyjna filtrów absorpcyjnych o różnym stopniu domieszkowania jonami Cu^{2+} (szkła IRF-06 i IRF-07)

Charakterystykę optyczną filtru zmodyfikowano stosem interferencyjnym $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ całkowicie odbijającym w paśmie 900÷1200 nm o konstrukcji zapewniającej współczynnik odbicia 99,95% w maksimum pasma, tj. dla długości fali 1064 nm. Opracowano konstrukcje o różnej szerokości pasma odcięcia.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę transmisyjną konstrukcji cienkowarstwowej o współczynniku odbicia $R > 99,9\%$ w szerokim paśmie odcięcia (od 900÷1250 nm).

W tabeli 4 zestawiono parametry optyczne opracowanych filtrów przeciwlaserowych do okularów ochronnych.



Rys. 5. Charakterystyka transmisyjna filtra szerokopasmowego ($R > 99,9\%$) 900 ± 1250 nm; transmisja w obszarze widzialnym $T_c = 72\%$

TABELA 4

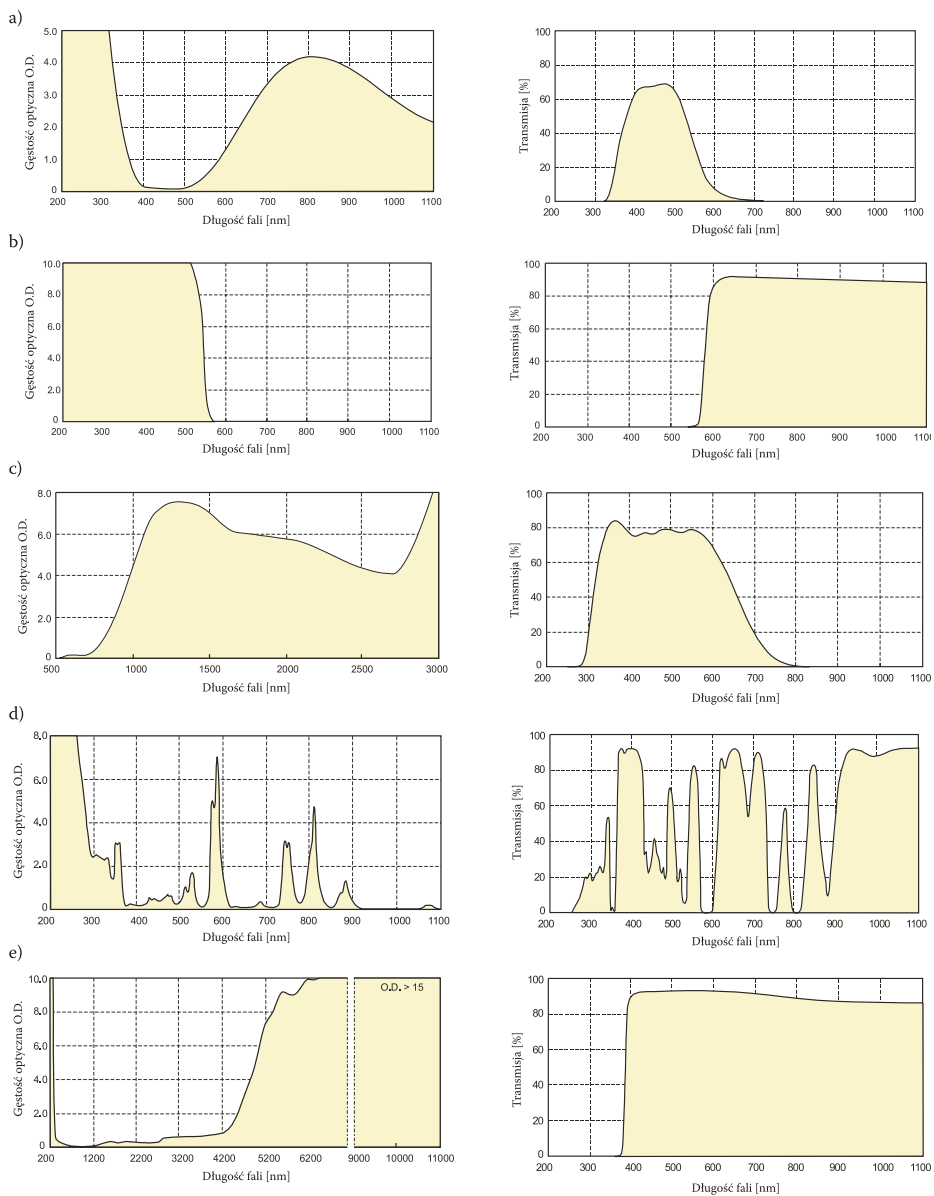
Specyfikacja parametrów przeciwlaserowych okularów ochronnych

Model okularów	Typ lasera	Generowana długość fali λ [nm]	Gęstość optyczna O.D.	Transmisja całkowita w obszarze widzialnym (380-780 nm) T_c
1	2	3	4	5
ALG-B01	na parach złota He-Ne półprzewodnikowe	628,3	1,5	58%
		632,8	1,5	
		635	1,5	
		670/690	3,0	
		780	8,0	
		830	9,4	
	rubinowy YAG:Nd	694	9,6	
		1064	6,5	
ALG-B02	na parach złota He-Ne półprzewodnikowe	628,3	2,3	48%
		632,8	2,4	
		635	2,5	
		670/690	3,0	
		780	4,1	
		830	4,2	
	rubinowy	904	3,7	
		694	3,5	

cd. tabeli 2

1	2	3	4	5
ALG-B03	na parach złota He-Ne półprzewodnikowe rubinowy YAG:Nd	628,3 632,8 635 670/690 780 830 904 694 1064	5,4 5,4 5,5 7,4 10,0 10,3 9,2 8,4 6,0	22%
ALG-B04	półprzewodnikowe rubinowy YAG:Nd	670/690 780 830 904 694 1064	5,5 8,8 11,6 12,0 6,2 10,0	53%
ALG-O01	ekscymerowe azotowy He-Cd argonowy II harm. YAG:Nd	180÷350 337 325, 354, 442 458/514 532	> 40 > 40 > 30 > 12 > 8	55%
ALG-G01	półprzewodnikowe YAG:Nd półprzewodnikowe YAG:Ho YAG:Er	780 830 904 1064 1300 1550 2100 2940	1,3 2,0 3,2 5,0 5,5 5,5 5,5 6,0	70%
ALG-G02	na parach miedzi barwnikowy półprzewodnikowe	578 585 805÷810	5,5 7,0 4,7	53%
ALG-C02	ekscymerowe azotowy CO ₂	180÷350 337 10600	> 10 > 10 > 15	90%

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki optyczne wybranych filtrów stosowanych w przeciwlaserowych okularach ochronnych.

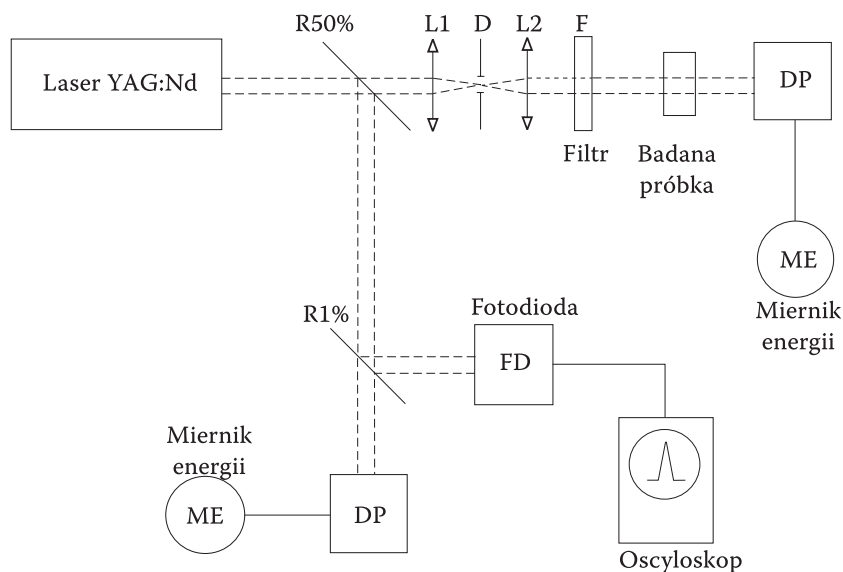


Rys. 6. Charakterystyki optyczne (transmisja i gęstość optyczna) wybranych typów filtrów stosowanych w przeciwlaserowych okularach ochronnych: a) ALG-B02, b) ALG-O01, c) ALG-G01, d) ALG-G02, e) ALG-C02

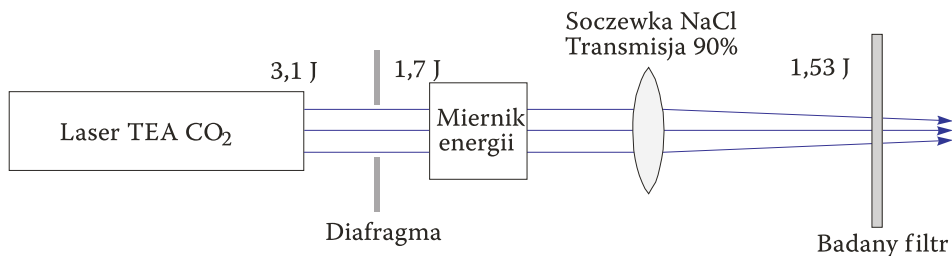
3. Badania odporności energetycznej filtrów

Wszystkie filtry stosowane w okularach przeciwlaserowych podlegają badaniom atestacyjnym. W procesie wytwarzania filtrów badana jest jakość optyczna powierzchni, w tym płaskość metodami interferometrycznymi i chropowatość metodami laserowej skateroskopii.

Badana jest również odporność energetyczna filtrów w układach laserowych monoimpulsowych (laser YAG:Nd 1064 nm, 40 mJ, 5 ns; laser SHG YAG:Nd 532 nm, 80 mJ, 10 ns; laser CO₂ 10,6 μm, 3,1 J, 100 ns) i CW (laser CO₂ 10,6 μm, 30 W). Na rysunkach 7 i 8 przedstawio schematy ideowe układów pomiarowych do badań odporności energetycznej.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania odporności energetycznej na impulsy promieniowania laserowego o długości fali 1064 nm (źródło promieniowania stanowi laser monoimpulsowy YAG:Nd³⁺, 40 mJ, 5 ns)



Rys. 8. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania odporności energetycznej na promieniowanie laserowe o długości fali 10,6 μm (źródło promieniowania stanowi laser TEA CO₂, 3,1 J, 100 ns)

Wyniki badań wybranych filtrów zestawiono w tabeli 5, 6 i 7 oraz na rysunku 9.

TABELA 5

Wyniki badań odporności filtrów przeciwlaserowych dla $\lambda = 1064 \text{ nm}$ wyznaczone w układzie lasera monoimpulsowego YAG:Nd (40 mJ, 5 ns)

Typ filtru	ALG-B01	ALG-B02	ALG-B03	ALG-G01
Odporność [MW/cm ²]	1200 ± 200	1800 ± 300	1800 ± 300	1200 ± 200

TABELA 6

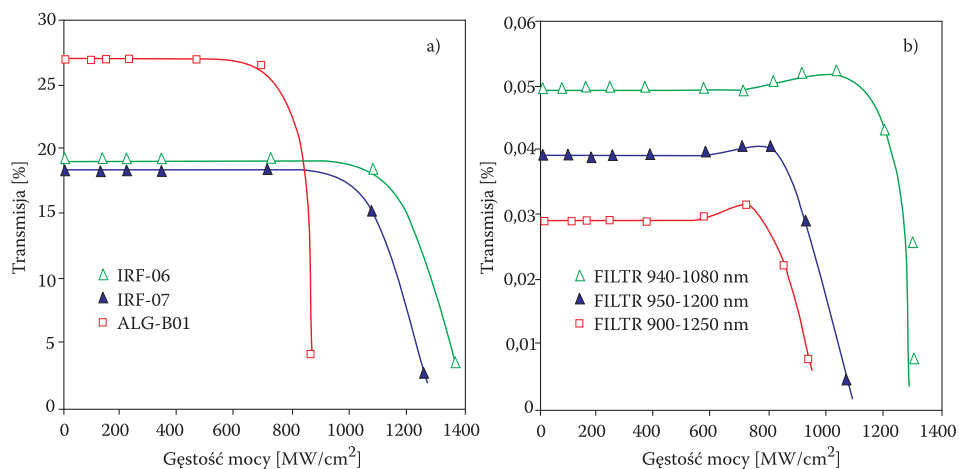
Wyniki badań odporności filtrów przeciwlaserowych dla $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ wyznaczone w układzie lasera CW CO₂ (30 W, czas ekspozycji 10 s)

Typ filtru	ALG-C01	ALG-C02	ALG-C03	ALG-C04
Odporność [kW/cm ²]	70 ± 10	80 ± 10	500 ± 50	150 ± 20

TABELA 7

Wyniki badań odporności energetycznej przeciwlaserowych filtrów interferencyjnych na zakres 1064 nm

Gęstość optyczna O.D.	Szerokość widmowa pasma odcięcia [nm]	Transmisja w obszarze widzialnym [%]	Odporność energetyczna [GW/cm ²]
3	940÷1080	85	1,2 ± 0,2
4	950÷1200	78	0,9 ± 0,2
5	900÷1250	72	0,8 ± 0,2



Rys. 9. Wyniki badań odporności energetycznej filtrów na impulsy promieniowania lasera YAG:Nd³⁺
 a) filtry absorpcyjne (IRF — matryca krzemianowa, ALG-BO1 — matryca fosforanowa, b) filtry interferencyjne o różnej szerokości pasma odcięcia

Na rysunku 9a przedstawiono wyniki badań dla wybranych filtrów. Jak wynika z tych danych, transmisja próbek dla małych gęstości mocy, niepowodujących zmian strukturalnych w ośrodku, jest wielkością stałą. Przy wzroście gęstości mocy obserwuje się stopniowe zmniejszenie transmisji, co jest spowodowane pojawieniem się centrów absorpcyjnych związanych z defektami strukturalnymi, generowanymi przez promieniowanie laserowe. Stwierdzono, że zjawisko to jest nieodwracalne w przypadku szkieł absorpcyjnych, natomiast w przypadku stosów cienkowarstwowych struktura ulega procesom rekrytalizacji i występują zmiany charakterystyk optycznych całej struktury prowadzące w pierwszej fazie do wzrostu transmisji, a następnie transmisja spada.

Na rysunku 9b przedstawiono wyniki badań odporności laserowej filtrów interferencyjnych o różnej szerokości pasma odcięcia. Zbadano wpływ szerokości tego pasma na transmisję filtru w obszarze widzialnym oraz na odporność energetyczną całej struktury na impulsy gigantyczne promieniowania laserowego 1064 nm.

Badania odporności energetycznej otrzymanych struktur cienkowarstwowych przeprowadzono w układzie lasera monoimpulsowego YAG:Nd³⁺ generującego impulsy o energii 40 mJ i czasie trwania 7 ns. Gęstość mocy impulsu diagnostycznego zmieniano w zakresie 5÷2000 MW/cm².

Przy dalszym wzroście gęstości mocy obserwuje się efekt odparowania warstwy powierzchniowej badanego filtru i gwałtowny spadek transmisji. Przyjęto kryterium, według którego odpornością energetyczną danego filtru jest wartość gęstości mocy padającego impulsu promieniowania, przy której transmisja próbek maleje o 10% [13].

Konstrukcja o współczynniku odbicia $R > 99,9\%$ w zakresie $940 \div 1080$ nm charakteryzuje się transmisją całkowitą w obszarze widzialnym ($380 \div 780$ nm) $T_c = 85\%$ i odpornością energetyczną $1,2 \pm 0,2$ GW/cm², konstrukcja o współczynniku odbicia $R > 99,9\%$ w zakresie $950 \div 1200$ nm charakteryzuje się transmisją całkowitą w obszarze widzialnym $T_c = 78\%$ i odpornością energetyczną $0,9 \pm 0,2$ GW/cm².

Szerokopasmowy filtr o współczynniku odbicia $R > 99,9\%$ w zakresie $900 \div 1250$ nm charakteryzuje się transmisją całkowitą w obszarze widzialnym $T_c = 72\%$ i odpornością energetyczną $0,8 \pm 0,2$ GW/cm².

4. Podsumowanie

Osiągnięcia inżynierii materiałowej i technologii cienkich warstw w ostatnich latach oraz opracowanie filtrów przeciwlaserowych o lepszych parametrach użytkowych (podniesienie transmisji i kontrastu widzenia, rozjaśnienie obrazu i przystosowanie barwy do czułości spektralnej oka), powodują stałą poprawę ochrony indywidualnej oczu przed promieniowaniem laserowym.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, B. KUZAKA, *Bezpieczeństwo stosowania laserów*, Polski Merkurusz Lekarski, T. VI, 34, 1999, 211-217.
- [2] L. MATTHEWS, G. GARCIA, *Laser and eye safety in the laboratory*, SPIE Press, PM19, 1994.
- [3] H. PETER BERLIEN, GERHARD J. MÜLLER (eds.), *Applied Laser Medicine*, Springer, 2003.
- [4] *Selected papers on laser safety*, SPIE Milestone Series Volume MS 117, 1995.
- [5] *American National Standard for the safe use of lasers*, American National Standards Institute, Inc, Approved February 5, 1993.
- [6] M. KWAŚNY, Z. MIERCZYK, J. SZYMCZAK, J. CZESZKO, *Wpływ składu i struktury szkieł barwnych na parametry spektralne filtrów ochronnych przed promieniowaniem 1,06 μm*, Biul. WAT, nr 5, Warszawa, 1992, 79-94.
- [7] M. KWAŚNY, Z. MIERCZYK, *Jakie filtry chronią przed promieniowaniem UV?*, Ekopartner, 6 (8), 1992, 18-20.
- [8] M. KWAŚNY, Z. MIERCZYK, *Badania parametrów optycznych materiałów stosowanych do ochrony przed promieniowaniem ultrafioletowym*, Biul. WAT, nr 5, Warszawa, 1993, 103-113.
- [9] Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, J. CIOSEK, *Anti-laser protective absorption — interference filters*, Proc. SPIE, vol. 2461, 1995, 513-513.
- [10] R. STĘPIEŃ, E. PONIŃSKA, Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, *Problematyka wytwarzania szkieł na filtry do ochrony wzroku przed promieniowaniem laserowym*, Szkło i ceramika, nr 47, 1996, 13-18.
- [11] Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, R. STĘPIEŃ, *Filtry absorpcyjno-interferencyjne do ochrony wzroku przed promieniowaniem laserowym*, Biul. WAT, nr 1, Warszawa, 1997, 99-114.

- [12] Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, J. MIERCZYK, J. CIOSEK, *Absorption — interference filters for high power laser systems*, Proc. SPIE, vol. 3186, 1997, 177-179.
- [13] Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, R. STĘPIEŃ, *Selective absorption-interference, anti-laser filters*, Proc. SPIE, vol. 2778, 1996, 1023-1024.
- [14] Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, *Investigations of bleaching effect in anti-laser filters*, Optics and Optoelectronics, Theory, Devices and Applications, vol. 2, Narosa Publishing House, New Delhi, 1998, 1029-1032.
- [15] R. STĘPIEŃ, K. JĘDRZEJEWSKI, D. PYSZ, K. HARAŚNY, Z. MIERCZYK AND M. KWAŚNY, *Active fluoride glasses for laser applications*, Opto-Electronics Review, 8(2), 2000, 137-146.

Z. MIERCZYK, M. KWAŚNY, J. MIERCZYK, J. KUBICKI

Spectroscopic and resistance characteristics of anti-laser protective filters

Abstract. The article presents the problem of eye protection against laser radiation and new antilaser protection filters developed at the Military University of Technology. The results of spectroscopic investigations and tests of energetic protection of optical filters of various constructions are presented. Different material technologies were used for filters design, including the melting technologies of silicon and phosphate glass. The filter glasses were doped with the dopants selectively absorbing radiation in the given spectral range. Also the technologies of thin-layer piles were applied. Spectral properties of filter glass were modified with interference dielectric coatings. As a result, the filters selective at several wavelengths were obtained. Such filters fulfil the requirements of better transmission in a visible range, higher energetic resistance, better contrast and vision comfort of user operation during long-lasting applications.

Keywords: laser radiation, eye protection, anti-laser filters, filter glass, thin-film layers, energetic resistance

Universal Decimal Classification: 621.375.826

