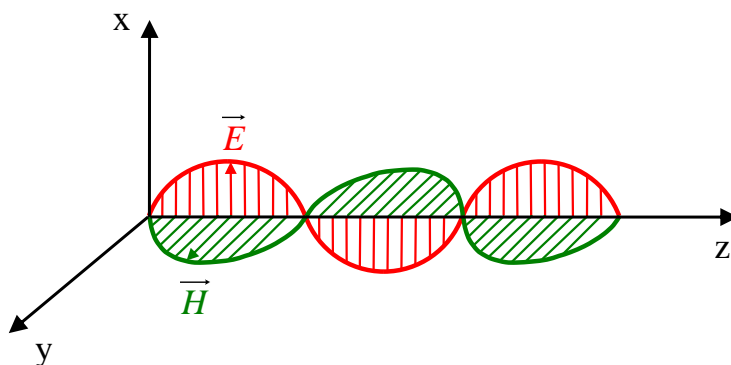


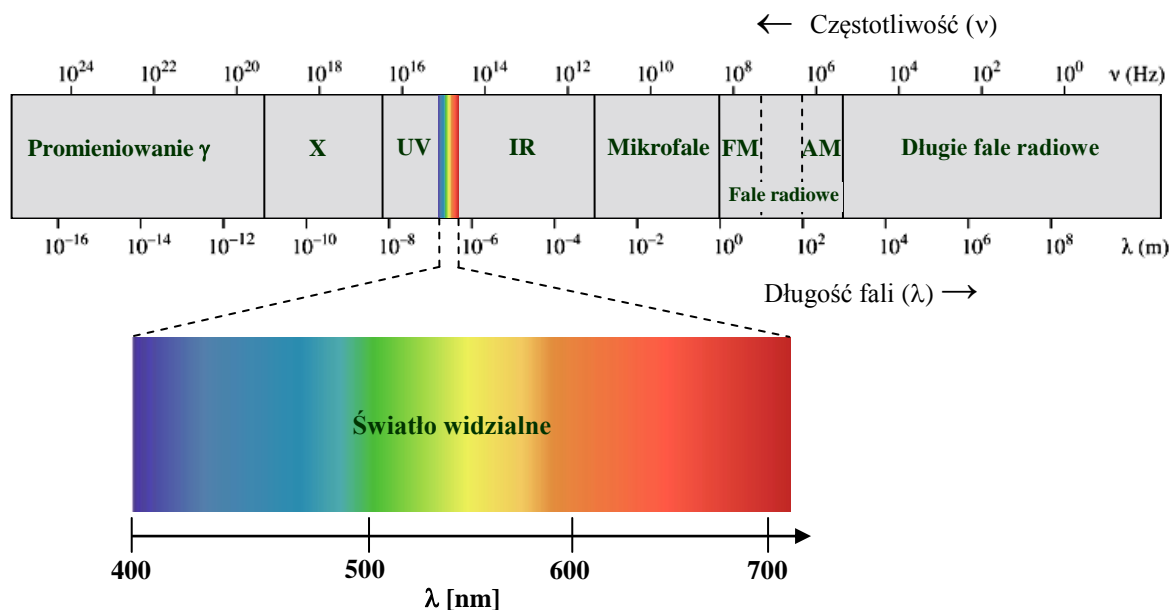
## Ćwiczenie nr 2

### Badanie charakterystyki filtrów i polaryzatorów

Fala elektromagnetyczna jest zaburzeniem pola elektrycznego i magnetycznego rozchodzącym się w próżni z prędkością  $c = 299792458$  m/s. Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi, tzn. w każdym punkcie pola wektory natężenia pola elektrycznego  $E$  i magnetycznego  $H$  są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fal elektromagnetycznych i do siebie (rys. 2.1). Własności, warunki powstawania i rozprzestrzeniania się fal elektromagnetycznych opisują w pełni równania falowe wynikające z równań Maxwella. Pewien niewielki zakres częstotliwości fal elektromagnetycznych wywołuje wrażenia wzrokowe i nazywany jest światłem (lub promieniowaniem optycznym), (rys. 2.2.)



Rys. 2.1. Liniowo spolaryzowana fala płaska rozchodząca się w kierunku osi  $z$ :  $E$  - wektor natężenia pola elektrycznego,  $H$  - wektor natężenia pola magnetycznego.



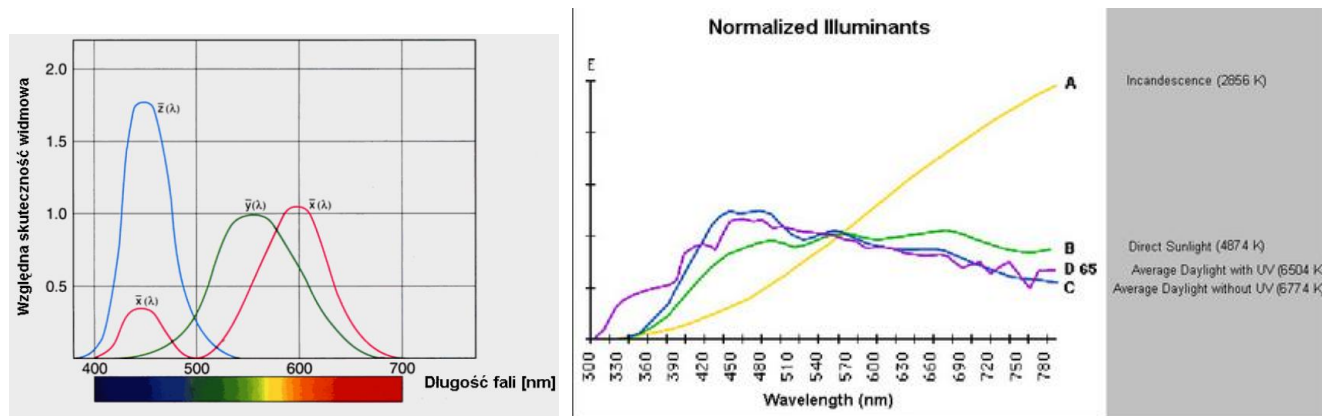
Rys. 2.2. Widmo częstotliwościowe fal elektromagnetycznych z zaznaczonym zakresem widzialnym.

# CZĘŚĆ I - Wyznaczanie współrzędnych tróchromatycznych filtrów

## Wstęp teoretyczny:

Siatkówka oka człowieka zaopatrzona jest w dwa rodzaje receptorów wzrokowych: pręciki i czopki, które reagują na światło z zakresu 380 – 780 nm. Za widzenie skotopowe (widzenie zmierzchowe) odpowiedzialne są pręciki. Fotoreceptory te są bardziej wrażliwe na światło niż czopki, natomiast nie dostarczają nam informacji o kolorach. Czopki odgrywają istotną rolę przy widzeniu fotopowym (widzenie dzienne). Wyróżniamy trzy rodzaje czopków (często oznaczane symbolami  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Każdy z nich posiada inną charakterystykę widmową, a zatem reaguje na inną długość fali, która jest związana z daną barwą. Pierwszy z nich reaguje na kolor czerwony o długości fali około 700 nm, kolejny na światło zielone charakteryzujące się długością fali wynoszącą 530 nm. Na światło niebieskie, o długości fali około 420 nm reaguje trzeci rodzaj czopków.

Przy pomocy współrzędnych tróchromatycznych oznaczonych, jako  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ , można określić daną barwę (rys. 2.3). Na wartości te mają wpływ względne sprawności wizualne czopków. W środkowej części wykresu chromatyczności (rys. 2.6) występuje barwa biała będąca mieszaniną wszystkich kolorów.



Rys. 2.3. Zakresy składowych tróchromatycznych dla modelu CIE XYZ [1] oraz widmowy względny rozkład mocy różnych iluminantów [2].

Warto dodać, że na wrażenia barwa jest

Jeżeli w bieg padającej wiązki, wprowadzimy dodatkowo barwny filtr, wówczas na wyjściu otrzymamy promieniowanie o następującym widmowym rozkładzie strumienia energii:

$$e(\lambda) = \phi(\lambda) \cdot t(\lambda) \quad (1)$$

gdzie:

$\phi(\lambda)$  - rozkład strumienia energii padającego na filtr,

$t(\lambda)$  - widmowy współczynnik przepuszczania promieniowania.

Transmitancja filtrów (widmowy współczynnik przepuszczania promieniowania) określona jest, jako stosunek natężenia wiązki wychodzącej z filtru  $I(\lambda)$  do natężenia wiązki padającej na filtr  $I_0(\lambda)$ :

$$t(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (2)$$

Pobudzenia  $a$ ,  $b$ ,  $c$  receptorów możemy zapisać, jako sumy iloczynów następujących wartości:

$$\begin{aligned} a &= \Delta\lambda \sum_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot t(\lambda) \\ b &= \Delta\lambda \sum_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot t(\lambda) \\ c &= \Delta\lambda \sum_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot t(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

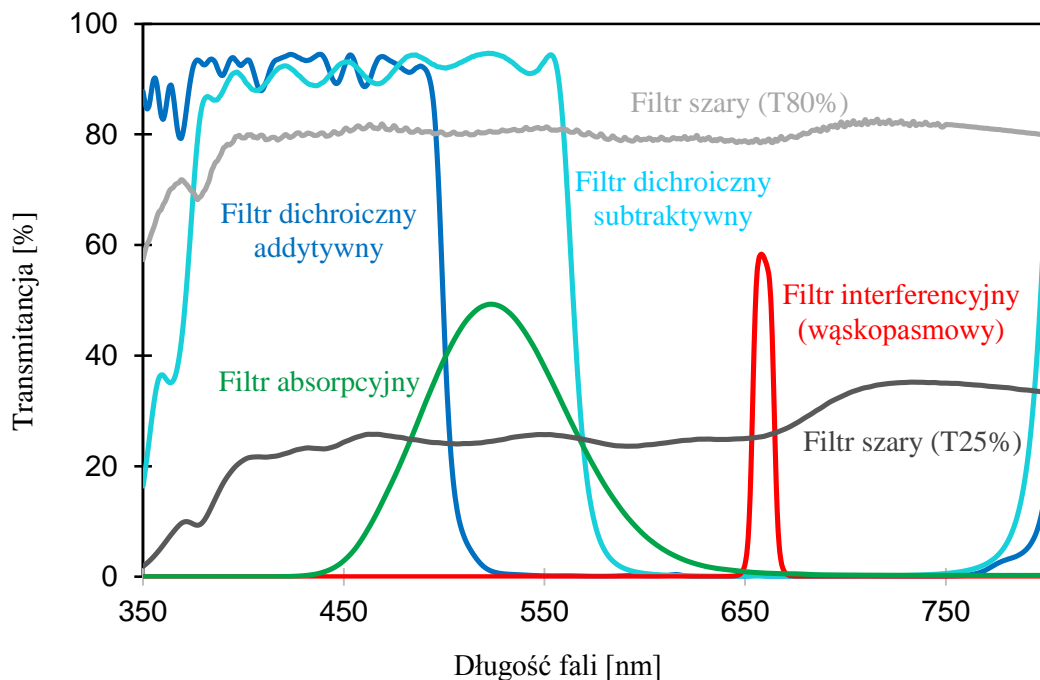
Współrzędne trójkromatyczne  $x$ ,  $y$ ,  $z$  określają daną barwę poprzez pobudzenie trzech receptorów. Spełniają one następującą równość:

$$x + y + z = 1 \quad (4)$$

i wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a}{a + b + c} \\ y &= \frac{b}{a + b + c} \\ z &= \frac{c}{a + b + c} \end{aligned} \quad (5)$$

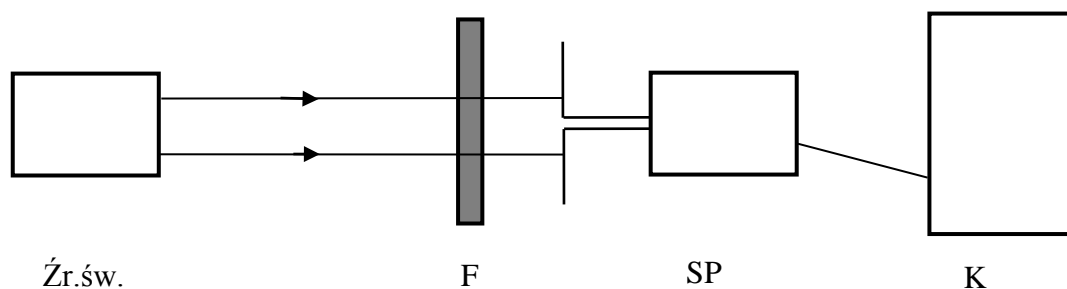
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współrzędnych trójkromatycznych kilku różnych filtrów optycznych.



Rys. 2.4. Transmitancje filtrów różnych rodzajów.

Filtry optyczne (rys. 2.4) służą do wydzielenia pożądanego pasma promieniowania z widma o dużej szerokości spektralnej (filtry absorpcyjne, interferencyjne) oraz do osłabiania natężenia światła (filtry szare). Stosuje się je również do poprawy kontrastu obrazu przy niekorzystnych warunkach obserwacji (filtry polaryzacyjne). Filtrami absorpcyjnymi zazwyczaj są roztwory lub mieszaniny różnych związków chemicznych w gazach, cieczach, szklach czy kryształach. Działanie ich jest oparte na absorpcji promieniowania o określonej długości fali lub o długościach fali obejmujących określony przedział (rys. 2.4). Najpopularniejszymi filtrami absorpcyjnymi są zabarwione płytki szkła. Filtry interferencyjne są wykonywane poprzez naniesienie (naparowanie) na płytkę szklaną sekwencji cienkich warstw dielektrycznych o różnych współczynnikach załamania. Dobierając odpowiednio grubość warstw i ich współczynniki załamania można uzyskać bardzo zróżnicowane charakterystyki transmisyjne filtrów interferencyjnych.

### Przebieg pomiarów:



Rys. 2.5. Schemat układu pomiarowego.

gdzie:



Źr.św.- źródło światła,

F- badany filtr,

SP- spektrometr,

K- komputer.



1. Włączyć źródło światła i uruchomić program [SpectraSuite.Ink](#). Ustawić źródło światła, tak aby wejście spektrometru było symetrycznie oświetlone.
2. W „Pasku Narzędzi” przyjąć uśrednianie 8, a czas ekspozycji („Integration time”) odpowiednio dobrać – uważając aby sygnał nie był wysycony, w okienku „Boxcar width” wpisać 25.
3. Zasłonić wejście spektrometru i zarejestrować „Dark spectrum”, klikając na ikonkę , a następnie klikając na ikonkę  odjąć zarejestrowane spektrum.
4. Zmierzyć natężenie wiązki bez filtra, a uzyskany wynik zapisać w komputerze klikając ikonę dyskiety (dane zapisać jako „TabDelimited” – plik tekstowy).
5. Następnie w biegu wiązki umieścić badany filtr, ponownie zmierzyć natężenie wiązki i uzyskany wynik zapisać na dysku.
6. Powtórzyć pomiar dla wszystkich dostępnych filtrów.

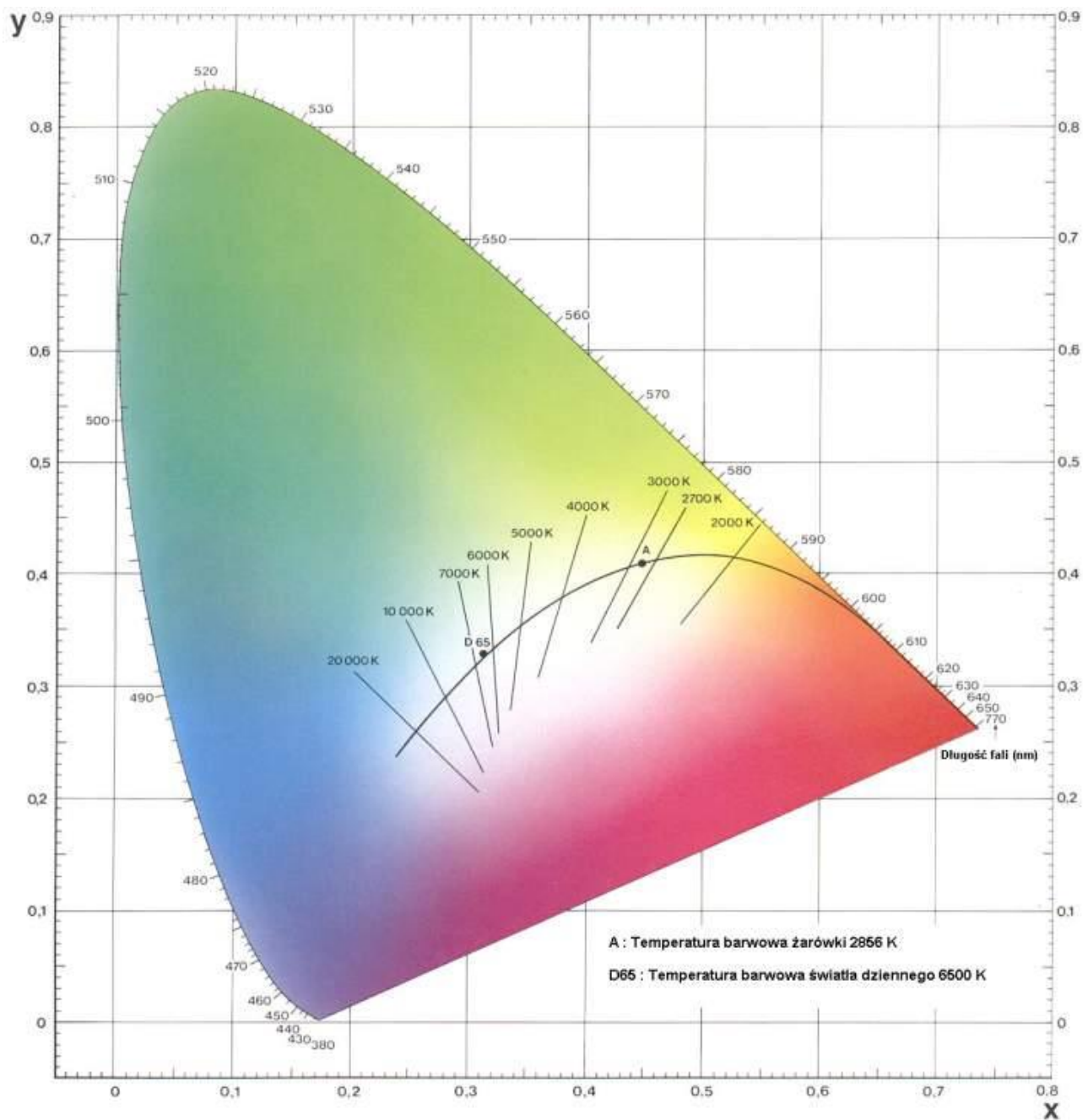
## Opracowanie wyników:

1. Z zarejestrowanych spektrogramów wiązki bez filtra i z filtrem zmierzyć współczynniki transmisji  $t(\lambda)$  korzystając z zależności (2) dla wszystkich badanych filtrów. Sporządzić krzywe  $t=f(\lambda)$  w całym badanym zakresie długości fal wszystkich badanych filtrów (najlepiej na jednym wykresie).
2. Obliczyć współrzędne trójkromatyczne barwy badanych filtrów dla iluminantu A oraz D<sub>65</sub>. Do obliczeń wykorzystać wzory (3 i 5), przyjmując  $\Delta\lambda=1\text{nm}$ , obliczony współczynnik transmisji w zakresie 380nm-780nm, oraz wartości iloczynów  $\bar{x}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$  **odczytane z pliku dołączonego do instrukcji (dostępne na stronie z materiałami dydaktycznymi)**.
3. Wyniki obliczeń nanieść na wykres chromatyczności oznaczając różnymi kolorami współrzędne dla iluminantu A i D<sub>65</sub>.
4. Ocenić barwę filtrów korzystając z wykresu chromatyczności, który znajduje się poniżej (rys. 2.6) i skorelować z zaobserwowaną barwą.

Tabela 2.1. Tabela wartości iloczynów  $\bar{x}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$  dla iluminantów A i D<sub>65</sub>.

$\lambda$	Iluminant A			Iluminant D <sub>65</sub>		
nm	$\bar{x}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$	$\bar{x}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)\cdot\phi(\lambda)$
380	0.001	0	0.006	0.007	0	0.031
390	0.005	0	0.023	0.022	0.001	0.104
400	0.019	0.001	0.093	0.112	0.003	0.532
410	0.071	0.002	0.34	0.377	0.01	1.796
420	0.262	0.008	1.256	1.189	0.035	5.711
430	0.649	0.027	3.167	2.33	0.095	11.37
440	0.926	0.061	4.647	3.458	0.228	17.843
450	1.031	0.117	5.435	3.742	0.421	19.627
460	1.019	0.21	5.851	3.234	0.669	18.614
470	0.776	0.362	5.116	2.124	0.989	13.998
480	0.428	0.622	3.636	1.048	1.524	8.915
490	0.16	1.039	2.324	0.33	2.142	4.791
500	0.027	1.792	1.509	0.051	3.343	2.815
510	0.057	3.08	0.969	0.095	5.132	1.614
520	0.425	4.771	0.525	0.628	7.041	0.775
530	1.214	6.322	0.309	1.687	8.785	0.43
540	2.313	7.6	0.162	2.869	9.625	0.201
550	3.732	8.568	0.075	4.267	9.796	0.086
560	5.51	9.222	0.036	5.625	9.515	0.037
570	8	9.457	0.021	6.947	8.678	0.019
580	10	9.228	0.018	8.304	7.585	0.015
590	11.679	8.54	0.012	8.9712	6.452	0.009
600	12.704	7.547	0.01	9.046	5.374	0.007
610	12.669	6.356	0.004	8.499	4.264	0.003
620	11.373	5.071	0.003	7.089	3.161	0.002
630	8.98	3.704	0	5.062	2.088	0
640	6.558	2.562	0	3.547	1.389	0
650	4.336	1.637	0	2.147	0.81	0
660	2.628	0.972	0	1.252	0.463	0
670	1.448	0.53	0	0.68	0.249	0
680	0.804	0.292	0	0.347	0.126	0

690	0.404	0.146	0	0.15	0.054	0
700	0.209	0.075	0	0.077	0.028	0
710	0.11	0.04	0	0.041	0.028	0
720	0.057	0.019	0	0.017	0.006	0
730	0.028	0.01	0	0.009	0.003	0
740	0.014	0.006	0	0.005	0.002	0
750	0.006	0.002	0	0.002	0.001	0
760	0.004	0.002	0	0.001	0	0
770	0.002	0	0	0.001	0	0
780	0	0	0	0	0	0

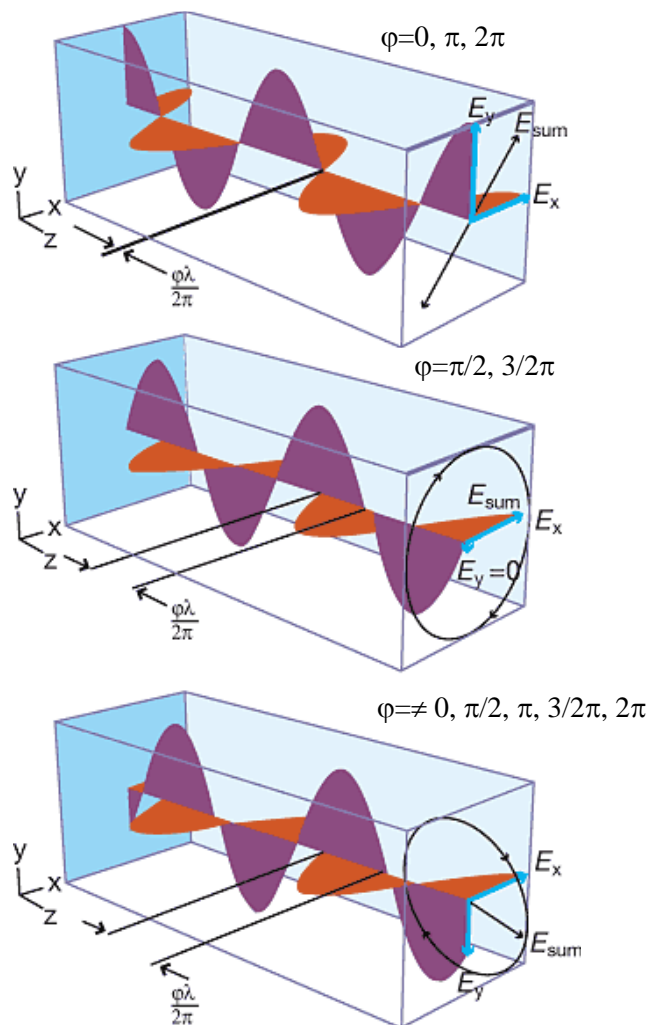


Rys. 2.6. Wykres chromatyczności [3].

## CZĘŚĆ II - Wyznaczenie współczynników przepuszczalności polaryzatorów

### Wstęp teoretyczny:

Ważną cechą fali elektromagnetycznej jest jej polaryzacja. Fala spolaryzowana to taka, dla której wektory elektryczny i magnetyczny oscylują w uporządkowany sposób. Wyróżnia się polaryzację liniową, kołową i eliptyczną, co bezpośrednio wiąże się z kształtem trajektorii, jaką wyznacza koniec wektora elektrycznego w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji fali (rys. 2.7).

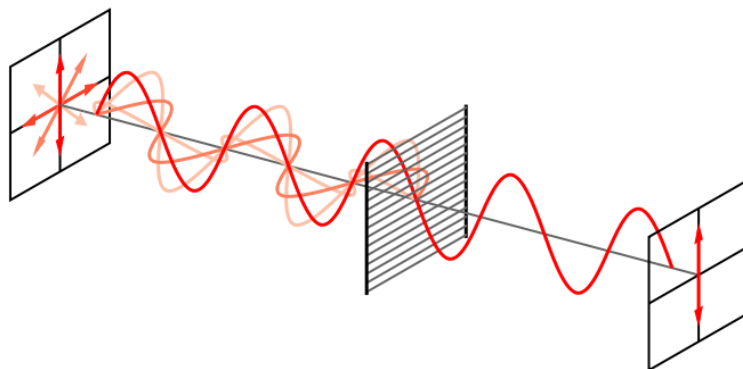


Rys. 2.7. Stany polaryzacji światła: liniowy, kołowy i eliptyczny [4].

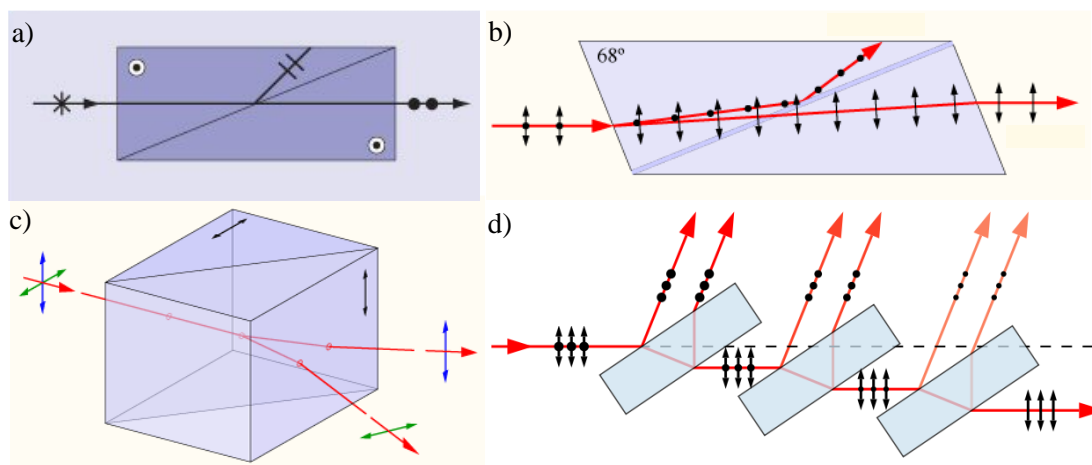
Fala niespolaryzowana może być traktowana, jako złożenie wielu fal drgających w różnych kierunkach. Światło naturalne, którego źródłem mogą być żarówki, słońce, lampy łukowe lub jarzeniówki jest niespolaryzowane. Takie światło może być traktowane, jako mieszanina fal o różnych stanach polaryzacji. Do otrzymania światła spolaryzowanego liniowo, dla którego wektory elektryczny i magnetyczny oscylują wzdłuż stałych i wzajemnie prostopadłych kierunków, stosuje się polaryzatory. Jeżeli na polaryzator pada światło niespolaryzowane, to przez polaryzator przejdą tylko te fale, których kierunek drgań wektora elektrycznego pokrywa się z kierunkiem transmisji polaryzatora. Najczęściej



stosowanym polaryzatorem jest folia polaryzacyjna (nazywana także polaroidem), która wykorzystuje zjawisko selektywnego pochłaniania światła. Jest to folia z tworzywa sztucznego, najczęściej alkoholu poliwinylowego (PVA) barwionego jodyną, rozciągana podczas produkcji w jednym kierunku. Rozciąganie układu równoległe cząsteczki tworzywa sztucznego, które absorbują światło. Uporządkowane cząsteczki pochłaniają światło spolaryzowane w kierunku uporządkowania (wektor elektryczny równoległy do kierunku ułożenia molekuł), a przepuszczają polaryzację prostopadłą (rys. 2.8). W urządzeniach optycznych stosuje się także polaryzatory krystaliczne o różnych konstrukcjach, a także polaryzatory odbiciowe (rys. 2.9).



Rys. 2.8. Zasada działania polaryzatora foliowego. Przepuszcza on falę o polaryzacji liniowej, której wektor elektryczny drga prostopadle do kierunku uporządkowania absorbujących molekuł [5].



Rys. 2.9. Przykłady konstrukcji polaryzatorów wykonanych z dwójłomnych, jednoosiowych kryształów (najczęściej z kalcytu  $\text{CaCO}_3$ ): polaryzator Glana-Thopsona (a), Nicola (b) i pryzmat Wollastona (c). Zasada działania polaryzatora odbiciowego wykorzystującego efekt Brewstera (dla pewnego kąta padania-kąta Brewstera od powierzchni płytki odbijana jest tylko polaryzacja typu „s” dla której wektor elektryczny drga prostopadle do płaszczyzny padania) (d) [5,6].

Jakość polaryzatorów opisują dwa współczynniki  $k_{\parallel}$  oraz  $k_{\perp}$ . Parametr  $k_{\parallel}$  opisuje natężeniową transmitancję polaryzatora wówczas, gdy padająca na niego wiązka jest spolaryzowana liniowo zgodnie z kierunkiem przepuszczania polaryzatora:

$$k_{\parallel} = \frac{I_{\parallel}}{I_{LP-0}}, \quad (1a)$$

$I_{LP-0}$  – natężenie liniowo spolaryzowanej wiązki padającej na polaryzator (azymut polaryzacji padającej wiązki równy jest  $0^\circ$ ),  $I_{\parallel}$  - natężenie wiązki przechodzącej przez polaryzator, gdy jego



kierunek przepuszczania jest zgodny z kierunkiem polaryzacji padającej wiązki. Parametr  $k_{\perp}$  charakteryzuje natężeniową transmitancję polaryzatora, gdy jego kierunek przepuszczania jest prostopadły do kierunku polaryzacji padającej wiązki:

$$k_{\perp} = \frac{I_{\perp}}{I_{LP-0}}, \quad (2a)$$

$I_{\perp}$  - natężenie wiązki przechodzącej przez polaryzator. Jeśli na polaryzator pada wiązka niespolaryzowana, którą można przedstawić jako niekoherentną sumę wiązek spolaryzowanych liniowo o azymutach  $0^{\circ}$  i  $90^{\circ}$ ,  $I_N = 0.5(I_{LP-0} + I_{LP-90})$ , to w takim przypadku całkowity współczynnik przepuszczalności polaryzatora jest dany następującym wzorem:

$$k_C = \frac{1}{2} \cdot (k_{\parallel} + k_{\perp}) \approx \frac{1}{2} k_{\parallel}. \quad (3a)$$

Dla idealnego polaryzatora:  $k_{\perp} = 0$ ,  $k_{\parallel} = 1$ ,  $k_C = 0.5$ .

Dla układu dwóch polaryzatorów (z których drugi jest nazywany zwykle analizatorem) o kierunkach przepuszczania ustawionych równoległe, na które pada wiązka niespolaryzowana o natężeniu  $I_N$ , natężenie wiązki wyjściowej wynosi:

$$I_{\parallel}^{P-A} = \frac{1}{2} \cdot I_N \cdot (k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2), \quad (4a)$$

gdzie  $I^{P-A}$  jest natężeniem wiązki na wyjściu pary polaryzator-analizator. Ponieważ  $k_{\parallel} \gg k_{\perp}$ , to powyższą zależność można przedstawić jako:

$$I_{\parallel}^{P-A} = \frac{1}{2} \cdot I_N \cdot k_{\parallel}^2. \quad (5a)$$

W przypadku, gdy polaryzator i analizator są skrzyżowane, natężenie wiązki wyjściowej dane jest przez:

$$I_{\perp}^{P-A} = \frac{1}{2} \cdot I_N \cdot (k_{\parallel} k_{\perp} + k_{\perp} k_{\parallel}) = I_N k_{\parallel} k_{\perp}. \quad (6a)$$

Stosunek:

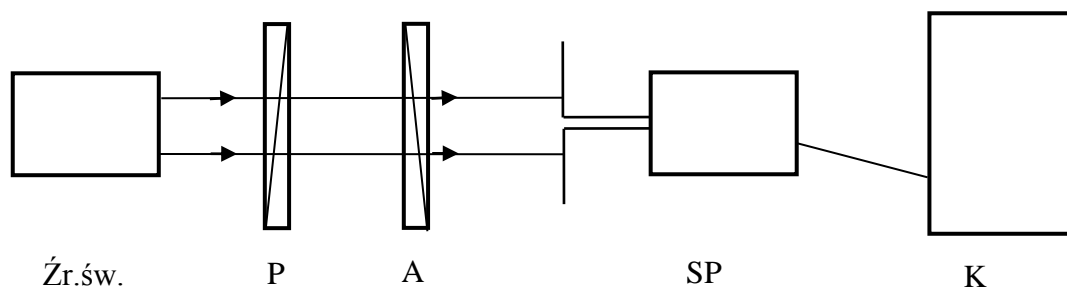
$$\alpha = \frac{I_{\perp}^{P-A}}{I_{\parallel}^{P-A}} \quad (7a)$$

jest nazywany współczynnikiem ekstynkcji (wygaszania) i jest podstawową miarą jakości polaryzatorów. Można zapisać również:

$$\alpha = \frac{I_{\perp}^{P-A}}{I_{\parallel}^{P-A}} = \frac{2k_{\perp}}{k_{\parallel}}. \quad (8a)$$

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie spektralnej zależności współczynnika ekstynkcji  $\alpha(\lambda)$  oraz  $k_{\parallel}(\lambda)$  dla polaryzatorów różnych typów.

## Przebieg pomiarów:



Rys. 2.10. Schemat układu pomiarowego.

źr.św.- źródło światła,



P- polaryzator,

A- analizator,

SP- spektrometr,

K- komputer



1. Włączyć źródło światła i uruchomić program SpectraSuite.Ink. Ustawić źródło światła, tak aby wejście spektrometru było symetrycznie oświetlone.
2. W „Pasku Narzędzi” przyjąć uśrednianie 8, a czas ekspozycji („Integration time”) odpowiednio dobrać – uważając aby sygnał nie był wysycony, w okienku „Boxcar width” wpisać 25.
3. Zasłonić wejście spektrometru i zarejestrować „Dark spectrum”, klikając na ikonkę , a następnie klikając na ikonkę  odjąć zarejestrowane spektrum.
4. Zmierzyć natężenie wiązki, bez umieszczania w nim polaryzatora i analizatora. Uzyskany wynik zapisać w komputerze klikając w ikonę dyskiety (dane zapisać jako „TabDelimited” – plik tekstowy) -  $I_N$ .
5. Następnie w bieg wiązki światła wstawić polaryzator i analizator oraz doprowadzić do maksymalnego wygaszenia wiązki poprzez skrzyżowanie analizatora i polaryzatora. Zapisać wynik pomiaru -  $I_{\perp}^{P-A}$ .
6. Następnie uzyskać maksymalne natężenie światła poprzez obrót analizatora o  $90^\circ$ . Zapisać wynik pomiaru -  $I_{\parallel}^{P-A}$ .

## Opracowanie wyników:

1. Przedstawić na wykresie natężenie światła w funkcji długości fali dla polaryzatorów skrzyżowanych i równoległych.
2. Na podstawie wzoru (7a) wyznaczyć spektralną zależność współczynnika ekstynkcji  $\alpha(\lambda)$  i przedstawić ją na wykresie.
3. Wyznaczyć użyteczny zakres spektralny badanych polaryzatorów, gdzie  $\alpha(\lambda) < 0.1$ .
4. Na podstawie wzoru (5a) wyznaczyć spektralną zależność współczynnika transmisji  $k_{\parallel}(\lambda)$  i przedstawić ją na wykresie.
5. Skomentować uzyskane wyniki.

## LITERATURA

[1] <http://www.if.pwr.edu.pl/~kurzynowski/Studenckie/Wybrane%20zagadnienia/Kolorymetria.pdf>

[2] <http://www.optique-ingenieur.org>

[3] „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki: Część IV–Optyka”, oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.

[4] <http://www.spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported/may04/polarizingfig1.gif>

[5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>

[6] [http://www.halbo.com/glan\\_tho.htm](http://www.halbo.com/glan_tho.htm)