

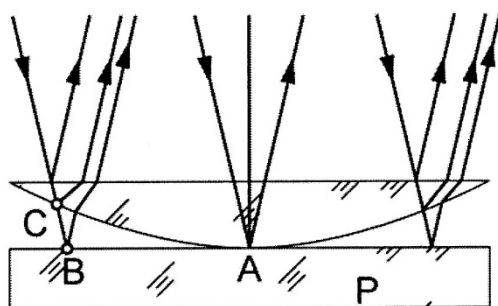


| | | |
|--|---------------------|---|
|  POLITECHNIKA OPOLSKA | KATEDRA FIZYKI |  |
| | LABORATORIUM FIZYKI | |
| POMIAR DŁUGOŚCI FALI ŚWIETLNEJ NA PODSTAWIE INTERFERENCJI W UKŁADZIE OPTYCZNYM DO OTRZYMYWANIA PIERŚCIENI NEWTONA | | |

WSTĘP

Dla fal elektromagnetycznych, tak samo jak dla fal sprężystych, spełniona jest zasada superpozycji fal. Zgodnie z tą zasadą fale rozchodzą się w przestrzeni w sposób niezależny od siebie. Każdy punkt przestrzeni w którym jednocześnie spotyka się kilka fal cechuje się wypadkowym zaburzeniem będącym sumą cząstkowych zaburzeń poszczególnych fal. W przypadku fal elektromagnetycznych (np. światła) nie dochodzi do sumowania wychyleń cząstek zaburzonego ośrodka, lecz wektorów natężeń pól elektrycznych i magnetycznych. Superpozycja dwu lub więcej fal harmonicznycch o tych samych częstotliwościach pozwala na sumowanie ich w każdym punkcie przestrzeni, w wyniku czego obserwuje się efekty ich interferencji.

Problem superpozycji i interferencji światła jest bardzo złożony. Wynika to stąd, że światło wysyłane przez dowolne źródło makroskopowe (z wyjątkiem lasera) nie jest prostą falą harmoniczną. Atomy stanowiące punktowe źródła prostych harmonicznycch fal elektromagnetycznych wysyłają skończone ciągi tych fal. Długość tych ciągów jest rzędu co najwyżej kilku metrów. Czas, w którym taki ciąg przechodzi przez ustalony punkt przestrzeni jest rzędu $10^{-9} - 10^{-8}$ sekundy. Najkrótszy nawet czas obserwacji jest kilka rzędów dłuższy, co związane jest z bezwładnością oka. Wiązki światła, w których różnice faz między falami wchodzącymi w ich skład ulegają nieregularnym zmianom w ciągu nawet najkrótszego możliwego czasu obserwacji, nazywamy wiązkami **niespójnymi**. Położenia obszarów wzmocnienia i osłabienia przy superpozycji fal niespójnych ulegają ciągłym zmianom w czasie obserwacji. Obraz interferencji dwóch fal można obserwować tylko wtedy, gdy różnice faz między tymi falami są stałe w czasie obserwacji. Fale takie nazywamy **spójnymi**. Spójne wiązki światła można otrzymać rozdzielając (przez odbicie czy załamanie) na dwie wiązki światło wysyłane przez niewielki obszar źródła rozciągniętego. Każdy ciąg falowy ulega przy tym rozdzieleniu na dwa ciągi falowe wchodzące w skład dwu różnych wiązek. Ciągi te są ze sobą spójne i mogą dać stały obraz interferencyjny, niezależnie od tego, przez który atom i w jakiej chwili zostały wysłane. Wprawdzie fazy ciągów falowych wysyłanych przez różne atomy są bardzo różne, ale dla światła monochromatycznego różnica faz dla każdej pary jest identyczna. Wszystkie pary ciągów falowych o tej samej częstoci interferują tak samo; obraz powstający na ekranie w wyniku interferencji spójnych wiązek światła monochromatycznego jest taki, jak gdyby interferowały proste fale harmoniczne.



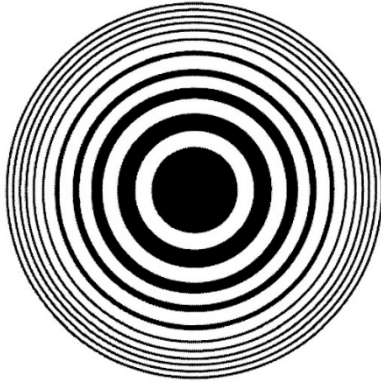
Rys. 1. Konstrukcja obrazu interferencyjnego w układzie optycznym do otrzymywania pierścieni Newtona.

Rozdzielenie wiązki światła na dwie wiązki zawierające po jednej części każdego ciągu falowego uzyskuje się m.in. w układzie do otrzymywania pierścieni Newtona. Obraz interferencyjny w postaci prążków o kształcie współśrodkowych okręgów uzyskuje się tu przez umieszczenie soczewki płasko-wypukłej o dużym promieniu krzywizny na płaskiej płytce szklanej, pomiędzy którymi istnieje cienka warstwa powietrza o stopniowo rosnącej grubości w miarę oddalania się od punktu centralnego (styczności) A (Rys. 1.). Monochromatyczne promienie równoległe, padające

prostopadle na płaską powierzchnię soczewki przechodzą przez szkło i częściowo ulegają odbiciu od powietrza w punkcie C (na drugiej powierzchni granicznej soczewki), a częściowo przechodzą dalej przez warstwę powietrza, ulegają odbiciu od płytki szklanej P i wracają do oka obserwatora lub do obiektywu słabo powiększającego mikroskopu.

Część wiązki odbita w punkcie C i ta, która dwukrotnie przeszła przez warstwę powietrza o grubości d odbijając się w punkcie B, interferują ze sobą. Różnica ich dróg optycznych wynosi:

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$



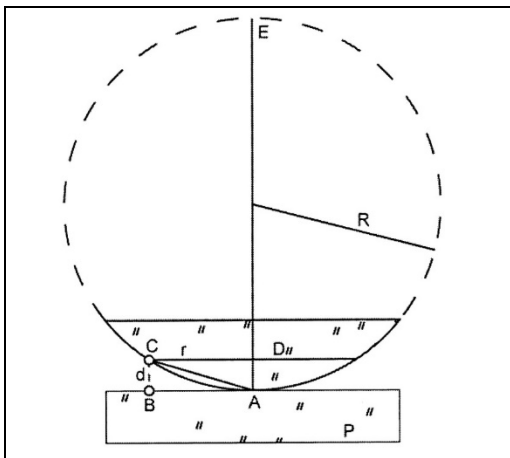
Rys. 2. Obraz pierścieni Newtona.

Wielkość $\lambda/2$ wynika ze zmiany fazy na przeciwną przy odbiciu od ośrodka optycznie gęstszego na powierzchni płytki P. W opisywanym układzie grubość warstwy powietrza d zmienia się symetrycznie względem punktu A i dlatego obraz interferencyjny ma kształt koncentrycznych pierścieni (rys. 2). Punkt styczności soczewki z płytką jest ciemny, gdyż dla niego $d = 0$ i $\delta = \frac{\lambda}{2}$; promienie interferujące w tym przypadku nakładają się fazami przeciwnymi, co prowadzi do ich wygaszenia. Promienie odbite od przedniej ścianki soczewki i tylnej ścianki płytki nie wchodzi w rachubę, gdyż grubość soczewki i płytki jest zbyt duża na to, by mogło zajść zjawisko interferencji.

W celu ustalenia zależności między promieniami pierścieni jasnych lub ciemnych i długością fali przeprowadzamy analizę geometryczną Rys. 3. Ze znanego twierdzenia geometrycznego wynika równość:

$$DC^2 = ED \times DA$$

$$r^2 = (2R - r) \cdot d$$



Rys. 3. Geometryczna interpretacja warunku interferencji.

Ponieważ d jest bardzo małe w porównaniu z $2R$, można ostatnią zależność wyrazić:

$$r^2 \cong 2R \cdot d$$

$$d \cong \frac{r^2}{2R}$$

A zatem różnica dróg optycznych

$$\delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Gdy powyższa różnica dróg optycznych równa jest nieparzystej wielokrotności połówek długości fali, powstaje pierścień ciemny o promieniu r_n :

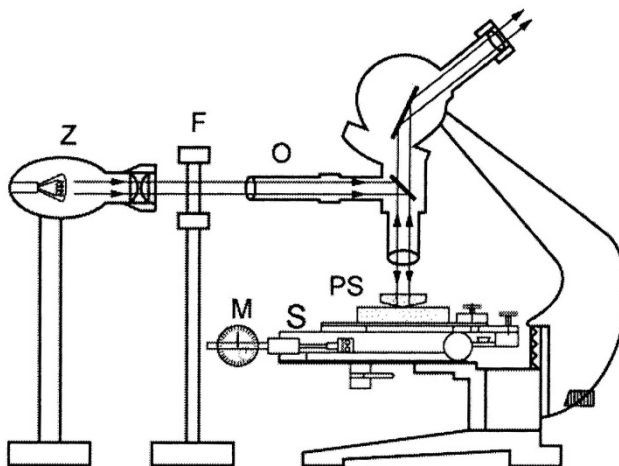
$$\frac{r_n^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

skąd:

$$r_n^2 = n \cdot R \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

Do pomiaru pośredniego długości fali światła stosuje się w ćwiczeniu słabo powiększający mikroskop, za pomocą którego można obserwować obraz interferencyjny w postaci pierścieni Newtona w świetle odbitym. Sam mikroskop nie wpływa na zjawiska interferencji, jedynie pozwala (dzięki powiększeniu) na bezpośrednie pomiary małych wartości położenia poszczególnych pierścieni obserwowanych przez jego okular.



Rys. 4. Szkic urządzenia do obserwowania pierścieni Newtona

Mikroskop stosowany w ćwiczeniu jest zaopatrzone w ruchomy stolik (Rys.4) pozwalający na przesuwanie oglądanego przedmiotu we wszystkich kierunkach. Przesuw do przodu i do tyłu jest mierzony dokładnie za pomocą sprzężonego ze stolikiem czujnika mikrometrycznego M. Na stoliku, pod obiektywem umieszczony jest układ optyczny PS do otrzymywania pierścieni Newtona. Na układ ten kierowana jest prostopadłe wiązka światła za pomocą oświetlacza O z umieszczonego z boku źródła \mathcal{Z} . Promienie wskutek odbicia i interferencji tworzą pierścienie Newtona obserwowane dzięki skierowaniu odbitych promieni interferujących przez obiektyw mikroskopu do oka obserwatora. Obraz interferencyjny obserwowany jest przez okular zaopatrzone w skrzyżowaną nić pajęczą, na tle której można przesuwać stolik S z układem optycznym PS i mierzyć promienie poszczególnych pierścieni. Do kompletu z mikroskopem dołączone są źródła światła: lampa sodowa emitująca żółtą linię sodu (589,28 nm) oraz quasi-monochromatyczne LED-owe źródła światła emitujące fale o różnych długościach (barwach).

WYKONANIE POMIARÓW

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie:

- długości promienia R krzywizny soczewki płasko-wypukłej znajdującej się w układzie optycznym do otrzymywania pierścieni Newtona, oraz
- długości fali λ emitowanej przez LED-owe źródło światła.

I. WYZNACZENIE DŁUGOŚCI PROMIENIA KRZYWIZNY SOCZEWKI

Promień krzywizny soczewki wyznacza się przy oświetleniu monochromatyczną wiązką światła o znanej długości fali emitowanej przez lampę sodową. Lampę należy ustawić w niewielkiej odległości (3 – 5 cm) od oświetlacza O (Rys. 4.). Po paru minutach od włączenia lampy sodowej nieuzbrojonym okiem można zaobserwować obraz interferencyjny w postaci malutkiego krążka utworzonego z pierścieni Newtona. Aby ułatwić możliwość takiej obserwacji, należy zasłonić część strumienia światła padającego na soczewkę układu bezpośrednio ze źródła. Następnie ustawić stolik tak, aby obserwowany krążek znajdował się na osi obiektywu mikroskopu. Dopiero po tej czynności, obserwując pierścienie przez okular mikroskopu, można ustawić dobrą ostrość ich obrazu. Wskazaniem jest, by regulację ostrości obrazu wykonywać podczas obserwacji pierścieni o dużych promieniach, ponieważ są mniej rozmyte. Po

ustawieniu ostrości naprowadzić centralny punkt pierścieni tak, aby pokrywał się z przecięciem krzyża nici pajęczych widocznych przez okular mikroskopu. Kolejną czynnością jest dokonanie sprawdzenia czujnika mikrometrycznego M pod kątem wskazań umożliwiających pomiaru położenia promieni pierścieni w obydwie strony (do przodu i do tyłu) względem punktu centralnego. Położenia pierścieni należy mierzyć w dwie strony od środka w celu uśrednienia wartości. Uzasadnione jest to tym, że należy spodziewać się odchyłek od symetrii grubości współśrodkowych warstw powietrza spowodowanych niedokładnością w oszlifowaniu soczewki o tak dużym promieniu krzywizny (10^{-1} m). Przy wyborze rzędu pierścieni, których promienie mamy zamiar zmierzyć, należy pamiętać o wielkości niepewności pomiarowej wynikającej z dokładności czujnika oraz zniekształceń powierzchni wypukłej soczewki. Najlepiej brać pod uwagę pierścienie w szerokim przedziale ich promieni (np.: $n = 5 \div 30$). Pomiaru powyższe wykonać oświetlając układ światłem lampy sodowej, emitującej głównie żółtą linię emisyjną o długość fali: $\lambda_{Na} = 589,28$ [nm], $u(\lambda_{Na}) = 0,37$ [nm]. Wyniki pomiarów promieni mierzonych od środka do przodu i do tyłu wpisać do Tabeli Pomiarów 1.

Oszacować i zapisać niepewności wzorcowania oraz niepewność eksperymentatora dla mierzonej bezpośrednio wielkości r_n .

TABELA POMIARÓW 1

| źródło światła | rzęd ciemnych pierścieni | odczyt w przód | odczyt w tył | długość fali |
|----------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| | n | r_{np} | r_{nt} | $\lambda_{Na} \pm u(\lambda_{Na})$ |
| | <i>[-]</i> | <i>[mm]</i> | <i>[mm]</i> | <i>[nm]</i> |
| lampa sodowa | | | | 589,28 |
| | | | | $\pm 0,37$ |
| | | | | |

$$\Delta_d(r_{np}) = \Delta_d(r_{nt}) = \dots [mm]$$

$$\Delta_e(r_{np}) = \Delta_e(r_{nt}) = \dots [mm]$$

II. WYZNACZENIE DŁUGOŚCI FALI ŚWIATŁA EMITOWANEGO PRZEZ BADANE ŹRÓDŁO LED

W celu wyznaczenia nieznanymi długości fal źródeł LED-owych należy nasunąć oprawę źródła LED-owego na oświetlacz O mikroskopu (Rys. 4.). Patrząc przez okular mikroskopu będziemy obserwować pierścienie Newtona na jednobarwnym tle, zależnym od wybranego źródła światła. Pomiar promieni pierścieni r_n należy wykonać w identyczny sposób jak w części pierwszej ćwiczenia. Wyniki pomiarów zanotować w Tabelach Pomiarów 2, 3, ... zaznaczając numery źródeł (i barwy ich światła) do jakich odnoszą się dane wyniki.

TABELA POMIARÓW 2

| źródło światła | rzęd ciemnych pierścieni | odczyt w przód | odczyt w tył |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| emitowana barwa | n | r_{np} | r_{nt} |
| | <i>[-]</i> | <i>[mm]</i> | <i>[mm]</i> |
| LED nr 1 niebieska | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

$$\Delta_d(r_{np}) = \Delta_d(r_{nt}) = \dots [mm]$$

$$\Delta_e(r_{np}) = \Delta_e(r_{nt}) = \dots [mm]$$

OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

WYZNACZENIE DŁUGOŚCI PROMIENIA R KRZYWIZNY SOCZEWKI

1. Dla $n > 5$ wykonać przykład oszacowania rozszerzonej ($k = 2$) wartości całkowitej niepewności $U(r_{np})$:

$$U(r_{np}) = U(r_{nt}) = k \cdot u(r_{np}) = k \cdot u(r_{nt}) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(r_{np}))^2 + (\Delta_e(r_{np}))^2}{3}} \quad (2)$$

2. Wykonać przykład obliczenia średniej wartości n -tego promienia pierścienia Newtona r_n :

$$r_n = \frac{r_{np} + r_{nt}}{2} \quad (3)$$

3. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności $U(r_n)$:

$$U(r_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial r_n}{\partial r_{np}} \cdot U(r_{np})\right)^2 + \left(\frac{\partial r_n}{\partial r_{nt}} \cdot U(r_{nt})\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot U(r_{np})\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot U(r_{nt})\right)^2} = \frac{U(r_{np})}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

4. Wykonać przykład obliczenia wartości kwadratu promienia pierścienia Newtona, r_n^2 :

$$r_n^2 = \dots \quad (5)$$

5. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności $U(r_n^2)$:

$$U(r_n^2) = \sqrt{\left(\frac{\partial r_n^2}{\partial r_n} \cdot U(r_n)\right)^2} = \sqrt{(2 \cdot r_n \cdot U(r_n))^2} = 2 \cdot r_n \cdot U(r_n) \quad (6)$$

6. Wykonać pozostałe obliczenia, otrzymane wartości zapisać w Tabeli WYNIKÓW

TABELA WYNIKÓW – WYZNACZENIE DŁUGOŚCI R PROMIENIA KRZYWIZNY SOCZEWKI

| n | r_{np} | $U(r_{np})$ | r_{nt} | $U(r_{nt})$ | r_n | $U(r_n)$ | r_n^2 | $U(r_n^2)$ |
|-----|----------|-------------|----------|-------------|-------|----------|--------------------|--------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ²] |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

7. Wykonać wykres zależności kwadratu promienia pierścienia r_n^2 od wartości numeru pierścienia n . Metodą regresji liniowej dopasować prostą do punktów doświadczalnych.

8. Z użyciem funkcji REGLINP (arkusz Excel) wyznaczyć wartości parametrów a i b (również $u(a)$, $u(b)$ i R^2) równania $r_n^2 = a \cdot n + b$ prostej najlepszego dopasowania do trendu ułożeń doświadczalnych punktów na wykresie. Otrzymane wartości zapisać w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW – PROMIEŃ KRZYWIZNY SOCZEWKI

| parametry równania prostej | nachylenie | | odcięta | | miara jakości dopasowania |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| | a | u(a) | b | u(b) | R ² |
| | [mm ²] | [mm ²] | [mm ²] | [mm ²] | [-] |
| przed zaokrągleniem | | | | | |
| po zaokrągleniu | | | | | |

9. Wyznaczyć wartość promienia krzywizny soczewki R:

$$R = \frac{a}{\lambda} \quad (7)$$

10. Oszacować wartość całkowitej rozszerzonej ($k = 2$) niepewności $U(R)$:

$$U(R) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \lambda} \cdot u(\lambda)\right)^2} = k \cdot R \cdot \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2} \quad (8)$$

Uwaga: wyprowadzona na gruncie teorii zależność (1) nie przewiduje występowanie niezerowej wartości odciętej b , którą otrzymano w doświadczalnie wyznaczonych parametrach prostej opisanej równaniem z pkt. 8. Niezerowa wartość b może być zarówno skutkiem mechanicznych luzów wykazywanych przez suporty pomiarowego stoliczka mikroskopu na którym zamontowano układ soczewki z płytką płasko-równoległościenną, jak i błędów systematycznych eksperymentatora związanych ze zliczaniem rzędów pierścieni.

WYZNACZENIE DŁUGOŚCI FALI λ ŚWIATŁA EMITOWANEGO PRZEZ ŹRÓDŁO LED-owe

1. W odniesieniu do danych doświadczalnych otrzymanych z pomiarów z użyciem pierwszego LED-owego źródła światła wykonać polecenia zapisane w punktach 1-6 części poprzedniej. (Nie powtarzać wykonywania przykładów obliczeń, które już wcześniej zrobiono).
2. Otrzymane wartości zamieścić w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW
WYZNACZENIE DŁUGOŚCI FALI λ ŚWIATŁA EMITOWANEGO PRZEZ ŹRÓDŁO NR 1

| n | r_{np} | $U(r_{np})$ | r_{nt} | $U(r_{nt})$ | r_n | $u(r_n)$ | r_n^2 | $u(r_n^2)$ |
|-----|----------|-------------|----------|-------------|-------|----------|--------------------|--------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ²] |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

3. Wykonać wykres zależności kwadratu promienia pierścienia r_n^2 od wartości numeru pierścienia n . Metodą regresji liniowej dopasować prostą do punktów doświadczalnych.
4. Z użyciem funkcji REGLINP (arkusz Excel) wyznaczyć wartości parametrów a i b (również $u(a)$, $u(b)$ i R^2) równania $r_n^2 = a \cdot n + b$ prostej najlepszego dopasowania do trendu ułożeń doświadczalnych punktów na wykresie. Otrzymane wartości zapisać w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW – ŹRÓDŁO ŚWIATŁA NR 1

| parametry równania prostej | nachylenie | | odcięta | | miara jakości dopasowania |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| | a | u(a) | b | u(b) | R^2 |
| | [mm ²] | [mm ²] | [mm ²] | [mm ²] | [-] |
| przed zaokrągleniem | | | | | |
| po zaokrągleniu | | | | | |

5. W oparciu o wartość współczynnika kierunkowego a wyznaczyć wartość długość fali λ światła emitowanego przez źródło LED-owe nr 1:

$$\lambda = \frac{a}{R} \quad (9)$$

6. Oszacować całkowitą wartość niepewności $U(\lambda)$:

$$U(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial R} \cdot U(R)\right)^2} = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{U(R)}{R}\right)^2} \quad (10)$$

7. Powtórzyć czynności z pkt. 1-6 w odniesieniu do wyników pomiarów z użyciem pozostałych LED-owych źródeł światła.

8 WNIOSKI

W samodzielnie zaprojektowanej Tabeli Wyników Końcowych zebrać wartości wyznaczonych wielkości: R i λ wraz z ich niepewnościami. Dokonać jakościowego porównania otrzymanych λ z odpowiednimi zakresami długości fal odpowiadającymi obserwowanym barwom światła emitowanego przez każde ze źródeł LED-owych. Ocenić dokładność użytej metody pomiaru pośredniego długości fali. Czy wyniki doświadczenia potwierdziły słuszność przewidywań teoretycznych? Wniosek uargumentować ocenami obiektywnymi. Pisząc tę część części sprawozdania mieć na uwadze szablony wniosków.

LITERATURA

- [1] SZCZENIOWSKI S.: Fizyka doświadczalna, cz. IV Optyka, PWN, Warszawa 1983.
- [2] SKORKO M.: Fizyka, PWN, Warszawa 1980.
- [3] DRYŃSKI T.: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. PWN, Warszawa 1978.
- [4] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.