



FOTONIKA (W12IMM-SI0012L)

Laboratorium nr 2

Teoria barwy

Ćwiczenie opracował zespół:

Damian Pucicki, Katarzyna Bielak, Wojciech Macherzyński, Ryszard Korbutowicz

1. Cel zajęć

Głównym celem ćwiczenia jest zapoznanie się z charakterystyką spektralną promieniowania świetlnego, parametrami opisującymi widmo światła oraz metodami rozszczepienia światła białego. W czasie realizacji zadań zdobywa się praktyczną wiedzę i umiejętności z zakresu zasady działania monochromatora, będącego urządzeniem powszechnie wykorzystywanym w spektrometrii do badania i analizy widm promieniowania. Poza tym, na stanowisku laboratoryjnym do obserwacji charakterystyk widmowych, w zakresie od 300 do 1100 nanometrów, wykorzystuje się nowej klasy spektrometr optyczny z matrycą 2048 fotodetektorów krzemowych, umożliwiającą obserwację zmian widma w czasie rzeczywistym. Monochromator oraz spektrometr optyczny to dwa urządzenia wykorzystywane do analizy widm promieniowania, których zasadę działania poznaje się w podczas realizacji tego ćwiczenia.

2. Program zajęć

- * pomiar charakterystyki spektralnej lampy halogenowej, wyznaczenie całkowitej mocy optycznej wykrywanej w układzie pomiarowym
- * pomiar mocy optycznej poszczególnych linii emisyjnych uzyskanych za pomocą elementu dyskretyzującego (pryzmat, siatka dyfrakcyjna) oraz wyznaczenie szerokości półmłokowych (FWHM) obserwowanych linii
- * odtworzenie charakterystyki spektralnej lampy halogenowej ze zmierzonych wcześniej dyskretnych linii emisyjnych (uzyskanych po rozszczepieniu pryzmatem i siatką dyfrakcyjną),
- * wyznaczenie strat układu rozszczepiającego
- * porównanie i analiza strat wprowadzanych przez dwa elementy dyskretyzujące

3. Literatura uzupełniająca

- * wykład Fotonika

Podczas zajęć należy przestrzegać przepisów BHP

4. Wprowadzenie teoretyczne i zagadnienia praktyczne

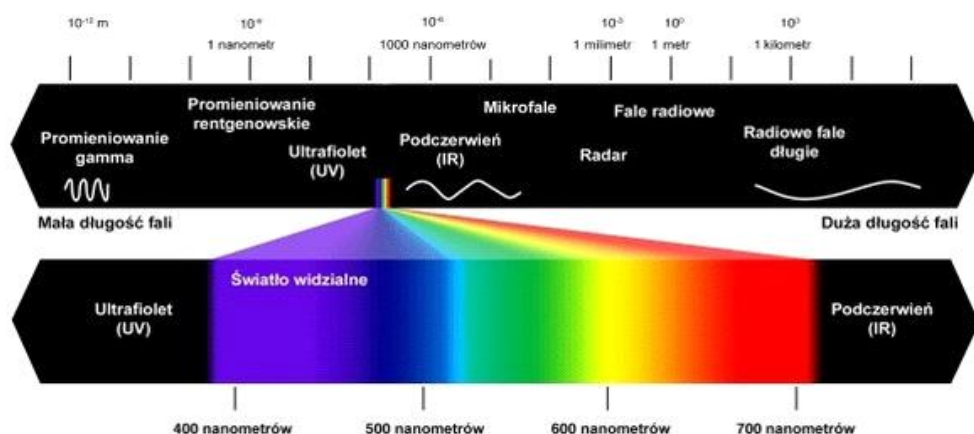
Zagadnienia do samodzielnego przygotowania:

- * promieniowanie optyczne, wielkości charakteryzujące (energia, długość fali, częstotliwość, temperatura barwowa)
- * modele liczbowe barw RGB i CMYK, diagram chromatyczności
- * dyspersja i dyfrakcja
- * spektrometr optyczny
- * budowa i zasada działania monochromatora
- * definicje: strumień świetlny, światłość, natężenie oświetlenia, luminancja

4.1. Wiadomości wstępne

4.1.1 Promieniowanie optyczne

Promieniowanie optyczne obejmuje zakres promieniowania elektromagnetycznego o długości fal w zakresie od 10 nm do 1 mm i mieści się w niewielkim zakresie wykorzystywanych obecnie długości fal promieniowania elektromagnetycznego (rys. 1.). Dzieli się na ultrafiolet UV (od 10 do ~380 nm), światło widzialne VIS (od ~380 do ~780 nm) i podczerwień IR (od ~780 nm do ~1 mm).



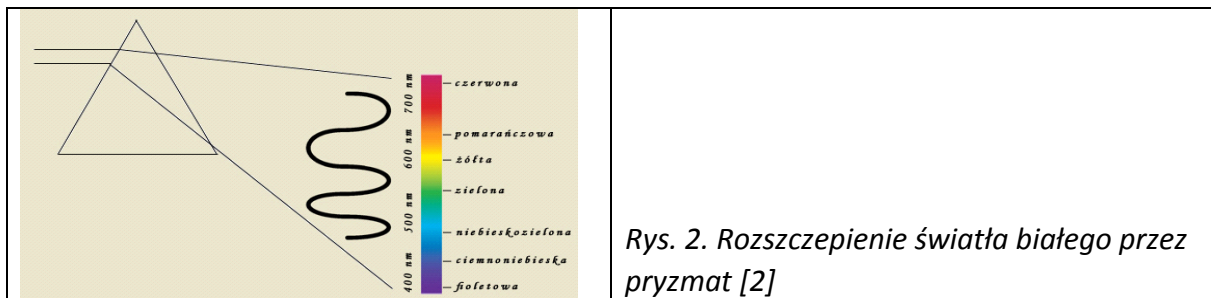
Rys. 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego [1]

Wielkością charakteryzującą fale jest częstotliwość, czyli liczba pełnych zmian pola magnetycznego i elektrycznego w ciągu jednej sekundy, wyrażona w hercach. Drugą wielkością jest długość fali, czyli odległość między sąsiednimi punktami, w których pole magnetyczne lub elektryczne ma ten sam zwrot i amplitudę. Zależność tych wielkości opisuje wzór $\lambda = c/f$, gdzie λ – długość fali, c – prędkość fali w danym ośrodku, a f – częstotliwość. Częstotliwość dla danej fali jest stała i niezależna od ośrodka, natomiast długość fali zmienia się, bowiem prędkość propagacji fali zależy od gęstości ośrodka, w którym fala się przemieszcza. Długości fal podane w tej instrukcji odnoszą się do próżni, gdzie prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej wynosi w przybliżeniu 300 000 km/s.

4.1.2 Rozszczepienie światła

Promieniowanie złożone wyłącznie z fal o jednej częstotliwości nazywa się promieniowaniem monochromatycznym. W rzeczywistości jednak każde źródło emituje światło o niezerowej szerokości spektralnej, czyli obejmujące pewien przedział częstotliwości. Najbardziej zbliżonym do monochromatycznego jest promieniowanie lasera i często takim mianem jest okre-

Światło niemonochromatyczne można rozłożyć na składowe o różnych częstotliwościach, otrzymując w ten sposób widmo optyczne (spektrum) promieniowania. Rozdzielenie się fali na składowe o różnej długości nazywane jest rozszczepieniem i zachodzi np. w pryzmacie lub dzięki siatce dyfrakcyjnej. Rozszczepienie światła przez pryzmat (rys. 2.) wynika ze zjawiska dyspersji czyli zależności prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku od jej częstotliwości. Efektem jest wpływ częstotliwości na współczynnik załamania ($n = c/u$, gdzie n – współczynnik załamania, c – prędkość światła w próżni, u – prędkość światła w ośrodku), przez co fale różnej długości przechodząc przez granicę ośrodków np. powietrze-szkło załamują się pod różnymi kątami.



Rys. 2. Rozszczepienie światła białego przez pryzmat [2]

Mechanizm rozszczepienia światła na siatce dyfrakcyjnej jest odmienny. Fala padająca na rząd równoległych szczelin ulega dyfrakcji i interferencji, w efekcie czego otrzymuje się na ekranie spektrum światła padającego (rys. 3.). Siatki dyfrakcyjne można podzielić na odbiciowe i transmisyjne. W siatkach odbiciowych światło nie przechodzi przez materiał, lecz odbija się od struktury wytworzonej na powierzchni, co można zaobserwować na przykład na powierzchni płyty CD. W siatkach transmisyjnych światło przechodzi przez wytworzone w materiale rysy. Siatki transmisyjne dzielą się dodatkowo na amplitudowe, czyli takie, które składają się z naprzemiennie ułożonych przezroczystych i ciemnych linii, oraz fazowe, które w całym swoim obszarze są dla światła przezroczyste, ale zawierają pasy o okresowo zmieniającym się współczynniku załamania.

Parametrem charakteryzującym siatkę dyfrakcyjną jest stała siatki d , oznaczająca rozstaw szczelin siatki (odległość między środkami kolejnych szczelin) wyrażona w mm. Jest zatem odwrotnością liczby rys na milimetr (np. $d = 0,00333$ mm).

Zależność wartości stałej siatki dyfrakcyjnej i kąta ugięcia ϑ definiuje równanie siatki dyfrakcyjnej:

$$m\lambda = d \cdot \sin\vartheta,$$

gdzie: λ to długość fali, m to rząd ugięcia.

Stąd łatwo obliczyć stałą siatki:

$$d = m\lambda/\sin\vartheta$$

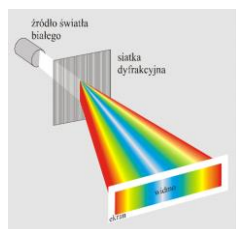
Drugim parametrem jest chromatyczna zdolność rozdzielcza R , czyli miara możliwości rozdzielania dwóch linii widmowych λ i $\lambda + \Delta\lambda$. Wyraża iloraz długości fali λ i rozdzielanego przedziału $\Delta\lambda$ i definiowana jest następująco:

$$R = \lambda/\Delta\lambda = mN \quad (m - \text{rząd dyfrakcji, } N - \text{liczba szczelin}).$$

Miarą zdolności siatki do rozszczepiania światła na wiązki monochromatyczne jest kątowa dyspersja siatki opisana wzorem:

$$\Delta\vartheta/\Delta\lambda = m/d \cos\vartheta.$$

Dyspersja wzrasta wraz z rzędem widma m i jest odwrotnie proporcjonalna do stałej siatki d .



Rys. 3. Rozszczepienie światła białego przez siatkę dyfrakcyjną [3]

Do dokładnego badania widm służą spektrometry. Główną częścią tych przyrządów jest element dyspersyjny (najczęściej pryzmat lub siatka dyfrakcyjna) i element rejestrujący poziom sygnału. Spektrometr zawiera dodatkowo wzorec, dzięki czemu możliwa jest nie tylko jakościowa, ale i ilościowa analiza promieniowania. W wykorzystywanym podczas zajęć spektrometrze elementem rejestrującym jest jednowymiarowa kamera CCD z 2048 detektorami krzemowymi, co znacznie ułatwia szybką analizę widmową oraz dzięki kalibracji umożliwia ilościową charakteryzację analizowanego promieniowania.

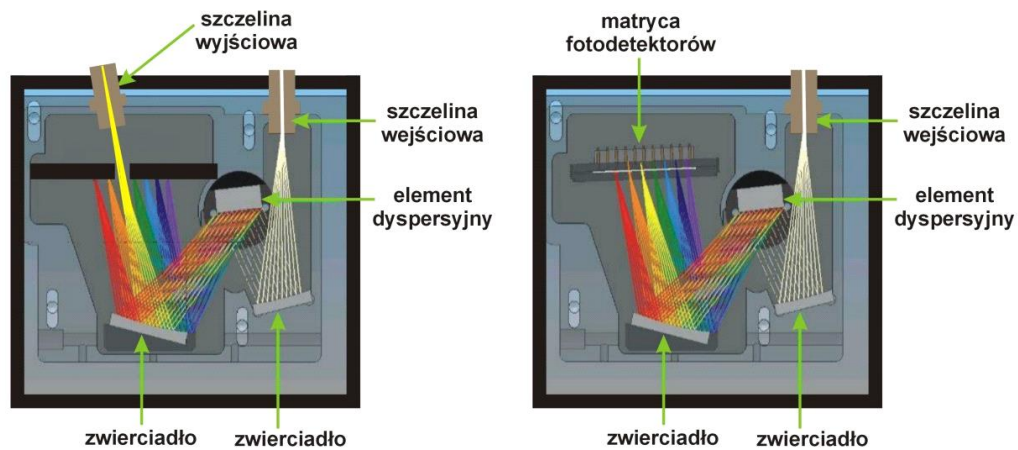
4.2 Budowa monochromatora i spektrometru optycznego

Podstawową różnicą między monochromatorem a spektrometrem optycznym jest to, że monochromator nie ma wbudowanego elementu wykrywającego światło. Monochromator to urządzenie umożliwiające uzyskanie dyskretnych (wąskich) linii spektralnych z wprowadzonego przez szczelinę wejściową światła o szerokiej charakterystyce spektralnej. W monochromatorze następuje rozszczepienie wiązki światła na poszczególne składowe (poszczególne długości światła) dzięki elementowi dyspersyjnemu. Może to być pryzmat lub siatka dyfrakcyjna. W wyniku dyspersji światła poszczególne linie emisyjne propagują się wewnątrz monochromatora w różnych kierunkach, zależnych od długości fali i kąta odchylenia/odbicia przez element dyspersyjny. Zestaw kilku zwierciadeł zamontowanych wewnątrz monochromatora (w zależności od jego budowy) wydłuża drogę optyczną promieniowania, polepszając tym samym kątową separację poszczególnych długości światła, czyli zdolność rozdzielczą monochromatora. Regulowane szerokości szczelin: wejściowej i wyjściowej również mają wpływ na szerokość uzyskiwanej linii spektralnej. Szeroko otwarta szczelina wyjściowa ma duży kąt akceptacji i tym samym na zewnątrz wydostaje się promieniowanie zawierające długości fal ugiętych w danym kącie akceptacji szczeliny. Przymknięcie szczeliny wyjściowej wpływa na całkowitą moc promieniowania wychodzącego, jednocześnie zawężając jego charakterystykę widmowa, dzięki zmniejszeniu kąta akceptacji. Ruchome elementy monochromatora pozwalają zmieniać kąt padania wiązki pierwotnej na element dyspersyjny i w ten sposób na szczelinę wyjściową kierowane jest promieniowanie o innej długości fali.

Zasada działania spektrometru optycznego jest niemal identyczna jak monochromatora. Nie ma jednak szczeliny wyjściowej, a w jej miejscu umieszczony jest element rejestrujący w postaci jednowymiarowej matrycy CCD. W wielu konstrukcjach spektrometrów, głównie przenośnych, brak również jakichkolwiek elementów ruchomych. Siatka dyspersyjna rozszczepiając promieniowanie, kieruje je zależnie od długości fali w innym kierunku, w stronę układu detekcji. Na każdy piksel matrycy CCD (każdy dyskretny detektor) pada części promieniowa o wąskim spektrum. Rozdzielczość spektrometru zależna jest od drogi optycznej

promieniowania, rozmiarów matrycy detektorów, ilości pikseli w matrycy i parametrów siatki dyfrakcyjnej.

Do głównych zalet spektrometru należy wliczyć możliwość detekcji promieniowania i obserwacji widma w czasie rzeczywistym oraz dla skalibrowanych układów detekcyjnych możliwość pomiaru mocy optycznej dla każdej długości fali. Różnice budowy monochromatora i spektrometru schematycznie przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat budowy monochromatora (lewa strona) i spektrometru optycznego (prawa strona)

5. ZADANIA DO WYKONANIA

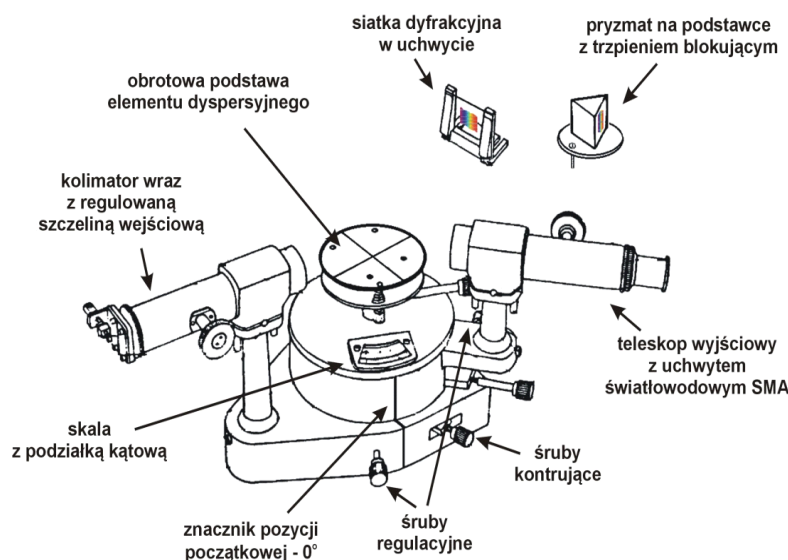
5.1 Układ pomiarowy

Na stanowisku laboratoryjnym znajduje się układ pomiarowy składający się z następujących elementów:

- * oświetlacza halogenowego z wiązką światłowodową umocowaną w uchwycie umieszczonym przed kolimatorem wejściowym modelu monochromatora,
- * modelu monochromatora umożliwiającą zmianę położenia elementu dyspersyjnego (pryzmat lub siatka dyfrakcyjna) oraz kolimatora wyjściowego,
- * światłowodu łączącego kolimator wyjściowy modelu monochromatora ze spektrometrem optycznym,
- * spektrometru optycznego StellarNet model *BlueWave* UV-VIS,
- * komputera klasy PC.

5.1.1 Monochromator

Ćwiczenie laboratoryjne będzie wykonywane przy użyciu modelu monochromatora firmy Frederiksen, którego schematyczną budowę przedstawiono na rysunku 7. Do głównego bloku urządzenia, na którym znajduje się obrotowa podstawa elementu dyspersyjnego (elementu rozszczepiającego wiązkę światła), dołączone są dwa ramiona z układami optycznymi. Układ kolimatora wraz ze szczeliną wejściową służy do kierowania badanego promieniowania na element dyspersyjny. Dzięki szczelinie wejściowej można regulować natężenie oświetlenia wprowadzanego do układu. Ruchomy teleskop wyjściowy, do którego podłączony jest detektor, umożliwia analizę badanego promieniowania w funkcji kąta odchylenia. Element dyspersyjny (siatka dyfrakcyjna lub pryzmat) umieszcza się na obrotowej podstawie w centralnej części monochromatora. Siatkę dyfrakcyjną zamontowaną w uchwycie przykręca się dostępnymi na stanowisku śrubami montażowymi.



Rys. 7. Schemat budowy modelu monochromatora firmy Frederiksen

Znacznik pozycji początkowej „0°” oznacza ustawienie ramion monochromatora w jednej linii, co wiąże się z detekcją maksymalnego sygnału na wyjściu układu. Zmianę pozycji ramienia teleskopu określić można dzięki skali z podziałką kątową umieszczoną z dwóch stron mo-

nochromatora. Podziałka kątowa umożliwia jednocześnie określenie zmian pozycji obrotowej podstawy z elementem dyspersyjnym względem ruchomego ramienia teleskopu wyjściowego. Należy zmieniać jednocześnie tylko jedno ułożenie. Wszelkie zmiany położenia ramienia teleskopu i/lub obrotowej podstawy na element dyspersyjny dokonać można w szerokim zakresie kątowym po zwolnieniu śrub blokujących. Przy dokręconych śrubach blokujących zmiana wzajemnego położenia poszczególnych elementów układu jest możliwa w niewielkim zakresie kątowym jedynie dzięki regulacji śrubami regulacyjnymi.

5.1.2 Obsługa i ustawianie układu optycznego

Układ optyczny stanowiska pomiarowego (nie licząc oświetlacza) składa się z lunetki wejściowej, stolika (montaż badanych elementów) oraz lunetki wyjściowej (rys.8.).

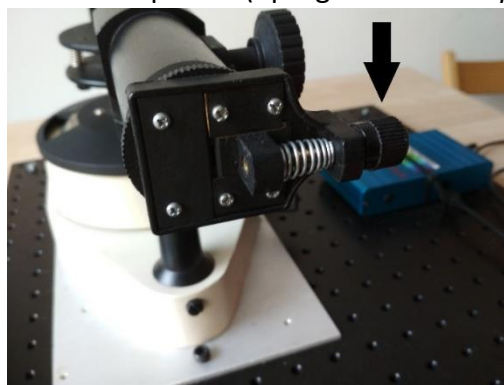


Rys. 8. Widok stanowiska pomiarowego

UWAGA: wszystkich regulacji dokonujemy używając nieznacznej siły – jeśli pokrętko zaczyna stawiać opór, oznacza to, że skończył się zakres regulacji.

5.1.3 Regulacja przesłony (szczeliny wejściowej)

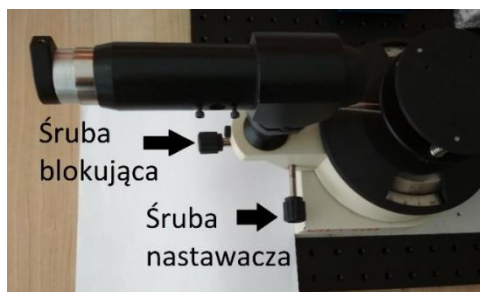
Lunetka wejściowa jest wyposażona w przesłonę, regulowaną za pomocą śruby (rys. 9.). Ustawiając wielkość przesłony równocześnie obserwujemy szerokość szczeliny oraz zmianę w odpowiedzi sygnału na ekranie komputera (oprogramowanie *SpectraWiz*).



Rys. 9. Regulacja szczeliny wejściowej

5.1.4 Położenia lunetki wyjściowej

Położenie lunetki wyjściowej odbywa się na dwa sposoby – **ręcznie** (regulacja zgrubna) oraz **za pośrednictwem śruby nastawczej** (regulacja precyzyjna). **Ręczne ustawienie** położenia lunetki wyjściowej może się odbywać **tylko po wcześniejszym poluzowaniu śruby blokującej** (rys. 10.) – wówczas ramię to można swobodnie przemieszczać.



Rys. 10. Widok śrub umożliwiających regulację lunetki wyjściowej

Regulacja precyzyjna odbywa się za pomocą śruby nastawczej po wcześniejszym dokręceniu z **niedużą siłą** śruby blokującej (rys. 10.).

UWAGA: zakres ruchu regulacji precyzyjnej jest ograniczony – jeśli śruba przy wkręcaniu zaczyna się blokować lub przy wykręcaniu nie towarzyszy jej zmiana położenia lunetki, oznacz to, że trzeba śrubą nastawczą wrócić do położenia środkowego, poluzować śrubę blokującą i ustalić nowe położenie ramienia w sposób zgrubny, zablokować śrubę blokującą i ponownie przystąpić do regulacji precyzyjnej za pomocą śruby nastawczej, aż do uzyskania oczekiwanego położenia lunetki wyjściowej.

5.2. POMIARY I OBLICZENIA

5.2.1 Pomiar charakterystyki spektralnej lampy halogenowej

- Ustawić zgrubnie ramię teleskopu wyjściowego w pozycji początkowej „0°” i dokręcić śrubę kontruującą.
- Włączyć komputer, upewnić się czy spektrometr jest podłączony do komputera i sygnalizuje gotowość do pracy świecącą zieloną diodą (obudowa).
- Podłączyć (jeśli jest odłączony) światłowód do spektrometru i teleskopu wyjściowego (gniazda SMA).
- Uruchomić program „SpectraWiz”, wybrać tryb pracy „Scope mode” i ustawić czas integracji sygnału równy 10 ms.
- Zapisać charakterystykę ciemną (symbol zgaszonej żarówki).
- Włączyć oświetlacz halogenowy i ustawić maksymalną moc zasilania lampy.
- Stolik obrotowy (skala z podziałką kątową) ustawić w pozycji 0°.
- Śrubą regulacyjną ramienia teleskopu wyjściowego ustawić w takie położenie ramienia, aby obserwowany sygnał lampy halogenowej był maksymalny. Aby uniknąć nasycania się matrycy detektorów (płaska charakterystyka w maksymalnym zakresie intensywności) i uszkodzenia linijki detektorów, delikatnie otwierać szczelinę wejściową kolimatora. Optymalny poziom sygnału to około 50 000 zliczeń. Charakterystyka powinna być stabilna.
- Zmierzyć charakterystykę lampy i zapisać widmo pod nazwą:

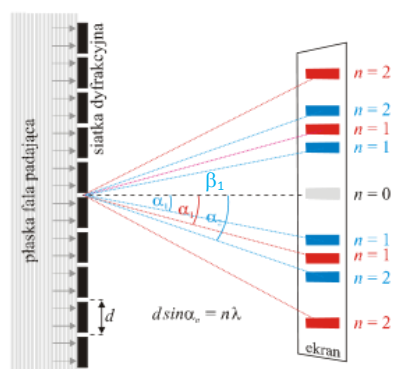
Lampa_halogenowa_ref.SSM, w utworzonym wcześniej katalogu o nazwie według algorytmu: data_dzień-tygodnia_godzina-zajęc: np.: 2023-11-26_wt_9:15.

- Zanotować w sprawozdaniu zakres długości fal emitowanych przez lampę halogenową.

5.2.2 Pomiar dyskretnych linii widmowych uzyskanych w wyniku rozszczepienia przez siatkę dyfrakcyjną

UWAGA! Nie zmieniać ustawień lampy halogenowej ani stopnia otwarcia szczeliny wejściowej. Nie zmieniać ustawień spektrometru.

- Zamontować siatkę dyfrakcyjną na podstawie obrotowej. W tym celu uchwyt siatki dyfrakcyjnej przykręcić do podstawy dwiema plastikowymi śrubami montażowymi.
- Ustawić podstawę tak, aby promień pierwotny, wychodzący z kolimatora wejściowego, padał prostopadłe bezpośrednio na powierzchnię siatki, a nie na płaską powierzchnię szkiełka siatki.
- Przystawić biały ekran w odległości około 20 cm za siatką dyfrakcyjną i określić ilość widzianych rzędów prążków interferencyjnych odchylanych w prawo i lewo od widma zerowego ugięcia.
- Wykonać w sprawozdaniu schematyczny szkic otrzymanego obrazu, zaznaczyć i krótko wyjaśnić kolejność pojawiających się barw w obserwowanych prążkach interferencyjnych.
- Sprawdzić dokładność ustawienia siatki przez porównanie kątów ugięcia prawego i lewego prążka α_1 i β_1 (rys. 11. [5]) dla wybranej długości fali (powinny być równe). Zanotować wartości kątów i długość fali, dla której przeprowadzono pomiar. Zablokować podstawę.



Rys. 11. Schemat obrazu powstającego na ekranie po przejściu fali płaskiej przez siatkę dyfrakcyjną [5]

- Wybrać prawe bądź lewe widmo rzędu ugięcia. Ustawić zgrubnie ramię teleskopu wyjściowego pod takim kątem do promienia pierwotnego, aby do teleskopu wyjściowego wprowadzić barwne promienie światła z wybranego prążka interferencyjnego i dokręcić śrubę kontruującą. Przy zgrubnym ustawieniu pozycji teleskopu, w oknie programu „Spectra-Wiz” widoczna powinna być wąska charakterystyka widmowa rozszczepionego promieniowania.
- Zmieniając pozycję ramienia teleskopu wyjściowego przeprowadzić pomiar i analizę linii widmowych w całym zakresie emisyjnym lampy halogenowej z krokiem np. co 20 nm. Za każdym razem zanotować następujące dane: długość fali [nm], intensywność [cps], szerokość połówkowa widma FWHM [nm], kąt ugięcia [°].
cps – zliczenia na sekundę (ang. counts per second)

L.p.	Długość fali [nm]	I rząd			II rząd		
		Intensywność [cps]	FWHM [nm]	Kąt ugięcia [°]	Intensywność [cps]	FWHM [nm]	Kąt ugięcia [°]
1	360	4502	11	8	...	...	...
2	380	4219	22	9			
3	...	...	...	...

- Z uzyskanych wyników obliczyć stałą siatki dyfrakcyjnej (co najmniej dla pięciu punktów pomiarowych) i wpisać do sprawozdania.
- Analogicznie przeprowadzić pomiary dla II rzędu ugięcia.

5.2.3 Obserwacja efektu rozpraszania światła białego przechodzącego przez pryzmat

UWAGA! Nie zmieniać ustawień lampy halogenowej ani stopnia otwarcia szczeliny wejściowej. Nie zmieniać ustawień spektrometru.

- Na obrotowej podstawie umieścić pryzmat w uchwycie zamocowanym za pomocą plastikowych śrub.
- Ustawić pryzmat (obracając podstawą) w taki sposób, aby możliwa była obserwacja światła rozszczepionego na białym ekranie w odległości około 20 cm. Zablokować podstawę. Zaobserwować zmiany natężenia sygnału za pomocą programu *SpectraWiz* (w trybie *Scope*).
- Wykonać w sprawozdaniu schematyczny szkic otrzymanego obrazu, zaznaczyć i krótko wyjaśnić (zależność matematyczna) kolejność pojawiających się barw.
- Ustawić zgrubnie ramię teleskopu wyjściowego pod takim kątem do promienia pierwotnego, aby do teleskopu wyjściowego wprowadzić barwne promienie świetlne i dokręcić śrubę kontruującą. Przy zgrubnym ustawieniu pozycji teleskopu, w oknie programu „*SpectraWiz*” widoczna powinna być wąska charakterystyka widmowa promieniowania wychodzącego z pryzmatu (luneta w miejsce ekranu).
- Zmieniając pozycję ramienia teleskopu wyjściowego przeprowadzić pomiar i analizę linii widmowych w całym zakresie emisyjnym lampy halogenowej z krokiem np. co 20 nm. Za każdym razem zanotować następujące dane: długość fali [nm], intensywność [cps], szerokość połówkowa widma FWHM [nm], kąt ugięcia [°]

L.p.	Długość fali [nm]	I rząd		
		Intensywność [cps]	FWHM [nm]	Kąt ugięcia [°]
1	360	4502	11	8
2	380	4219	22	9
3	...	...	...	...

- Delikatnie odłożyć pryzmat.

5.3 Opracowanie danych

- Do programu „OriginPro” zaimportować plik z danymi zmierzonego widma *Lampa_halogenowa_ref.SSM*, dodać dane pomiarowe dla siatki dyfrakcyjnej oraz pryzmatu. Wykreślić graficznie wynik intensywności w funkcji długości fali.
- Porównać uzyskane wartości natężenia światła i wyznaczyć straty intensywności wprowadzone przez siatkę dyfrakcyjną oraz pryzmat. Podpowiedź: wyliczyć pola pod krzywymi na wykresach.
- Zapisać dane w programie „OriginPro” we wcześniej utworzonym katalogu.

5.4. Analiza strat w układzie monochromatora

Przedyskutować i wytłumaczyć z czego wynikają straty intensywności w układzie po wprowadzeniu elementu rozszczepiającego. Wskazać dla jakiego elementu straty są większe i wytłumaczyć dlaczego.

Do sprawozdania dołączyć wykres z charakterystykami uzyskanymi w części 5.3 ćwiczenia.

Przesłać dane pomiarowe z Origina do prowadzącego (mailem).

Uwaga! Wniosek typu: „Wyniki zgodne z oczekiwaniami” oznaczać może konieczność powtórzenia ćwiczenia.

OPUSZCZAJĄC STANOWISKO POMIAROWE NALEŻY ODŁOŻYĆ ELEMENTY OPTYCZNE W ODPOWIADAJĄCE IM PUDEŁKA I OPAKOWANIA, ZACHOWUJĄC SZCZEGÓLNA OSTROŻNOŚĆ.

Źródła ilustracji:

[1] <http://www.swiatobrazu.pl/fotografia-od-a-do-z-swiatlo-23988.html>

[2] <http://www.coolskan.pl/artykuly.htm>

[3] http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Siatka_dyfrakcyjna_wsb.svg

[4] <http://lo28.internetdsl.pl/kolor/richardson/algorytm%20Richardsona.htm>

[5] http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Siatka_dyfrakcyjna_wsb.svg