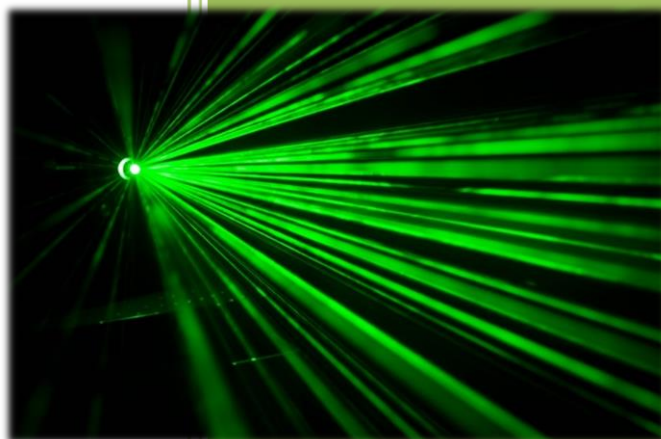




Laboratorium TECHNIKI LASEROWEJ

Ćwiczenie 4. Budowa spektrometru



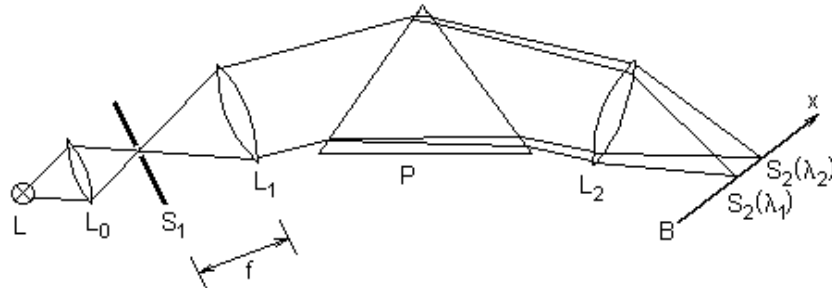
Katedra Metrologii
i Optoelektroniki
WETI
Politechnika Gdańska
Gdańsk 2018

1. WSTĘP

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania siatki dyfrakcyjnej oraz podstawową konstrukcją spektrometru.

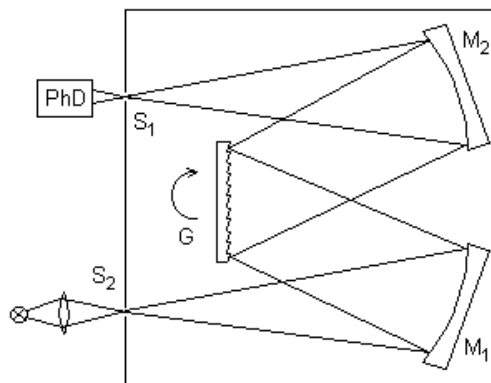
Według definicji encyklopedycznej Spektroskopia jest nauką o powstawaniu i interpretacji widm powstających w wyniku oddziaływań wszelkich rodzajów promieniowania na materię, rozumianą, jako zbiorowisko atomów i cząsteczek. Spektroskopia jest też często rozumiana jako ogólna nazwa wszelkich technik analitycznych polegających na generowaniu widm. Większość dzisiejszej wiedzy na temat budowy atomów i cząsteczek jest oparta na badaniach spektroskopowych, wniosły, więc one ogromny wkład w obecny stan fizyki atomowej i molekularnej. Informacje o budowie cząsteczek i o ich oddziaływaniach z otoczeniem można uzyskać na podstawie widm absorpcyjnych i emisyjnych otrzymanych w wyniku oddziaływania promieniowania z materią. Łącząc różne rodzaje promieniowania z różnymi sposobami jego oddziaływania z badaną próbką otrzymuje się rozmaite techniki spektroskopowe, które dają możliwość uzyskania różnych informacji o badanej substancji - od jej składu atomowego, przez budowę chemiczną, aż po strukturę jej powierzchni. Badania spektroskopowe obejmują eksperymentalne otrzymanie szeregu widm, wykonanie analizy, ustalenie schematu poziomów energetycznych charakteryzujących badany układ, porównanie danych doświadczalnych i teoretycznych dotyczących energii przejścia, otrzymanie danych dotyczących rozkładu natężeń zarówno teoretycznych, jak i eksperymentalnych. Techniki spektroskopowe stosuje się masowo w chemii, fizyce, astronomii i w wielu gałęziach przemysłu. Poniższy podział metod spektroskopowych dokonany został w oparciu o literaturę.

Spektrografy były pierwszymi przyrządami do pomiaru długości fali, a mimo to ciągle wykorzystywane są w laboratoriach, zwłaszcza gdy towarzyszą im nowoczesne systemy komputerowe. Są to przyrządy optyczne, w których tworzone są obrazy $S_2(\lambda)$ szczeliny wejściowej S_1 , przy czym dla różnych długości fali λ światła padającego obrazy te są rozdzielone w poprzek szczeliny. Poprzeczne rozszczepienie uzyskiwane jest dzięki dyspersji widmowej w pryzmacie lub dyfrakcji na płaskiej lub wklęsłej siatce dyfrakcyjnej. Poniżej przedstawiony rysunek przedstawia schemat optyki w spektrografie pryzmatycznym.



Rysunek 1. Spektrograf pryzmatyczny.

Źródło światła L oświetla szczelinę wejściową S_1 umieszczoną w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu kolimatora L_1 . Wychodząca z kolimatora L_1 równoległa wiązka światła przechodzi przez pryzmat P , gdzie załamuje się pod kątem $\theta(\lambda)$, który zależy od długości fali λ . Obiektyw kamery L_2 tworzy dla każdej długości fali osobny obraz $S_2(\lambda)$ szczeliny wejściowej S_1 . Położenie $x(\lambda)$ tego obrazu w płaszczyźnie ogniskowej kamery L_2 jest funkcją długości fali. Dyspersja liniowa spektrografu $dx/d\lambda$ zależy od dyspersji widmowej $dn/d\lambda$ materiału, z jakiego wykonany jest pryzmat oraz od ogniskowej kamery L_2 . W przypadku, gdy do rozszczepiania linii widmowych $S_2(\lambda)$ używana jest odbiciowa siatka dyfrakcyjna, zamiast obiektywów L_1 i L_2 stosuje się zwykle dwa zwierciadła sferyczne M_1 i M_2 , odwzorowujące szczelinę wejściową w płaszczyźnie obserwacji.



Rysunek 2. Spektrometr siatkowy.

Szczelina wyjściowa S_2 wybiera w płaszczyźnie ogniskowej B przedział Δx_2 , dzięki czemu jedynie ograniczony zakres widmowy $\Delta\lambda$ może trafić do detektora fotoelektrycznego. Inny zakres widmowy można rejestrować po przesunięciu S_2 w kierunku x . Wygodniejszym

rozwiązaniem (łatwiejszym konstrukcyjnie) jest obracanie pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej za pomocą specjalnego mechanizmu, dzięki czemu różne długości fali naprowadzane są na nieruchomą szczelinę wyjściową. W takim przypadku, w odróżnieniu od klasycznego spektrografu, poszczególne zakresy widmowe nie mogą być rejestrowane jednocześnie, a jedynie po kolei. Podczas gdy spektrograf pozwala na jednoczesny pomiar w dużym zakresie widmowym z umiarkowaną rozdzielczością w czasie, detekcja fotoelektryczna umożliwia pomiar z dużą rozdzielczością czasową, ale jedynie w małym przedziale długości fali $\Delta\lambda$. Dzięki zastosowaniu optycznych analizatorów wielokanałowych połączono zalety obu typów, czyli dużą rozdzielczość widmową i czasową oraz równocześnie detekcję szerokiego zakresu widmowego.

a. Siatka dyfrakcyjna

Jednym z najważniejszych elementów separujących światło o różnych długościach fali (tzw. elementów dyspersyjnych) jest siatka dyfrakcyjna. Siatka dyfrakcyjna jest elementem o periodycznej strukturze, na której zachodzi dyfrakcja promieniowania.

Siatki dyfrakcyjne podzielić można na:

- amplitudowe, których struktura zawiera periodycznie powtarzające się obszary przezroczyste i nieprzezroczyste (współczynnik transmisji światła może się zmieniać skokowo lub w sposób ciągły),
- fazowe, których struktura zawiera periodycznie powtarzające się obszary wprowadzające różne opóźnienie fazowe padającej fali np. poprzez inną grubość lub inny współczynnik załamania (porównaj z ćwiczeniem „Modulator akustooptyczny”).

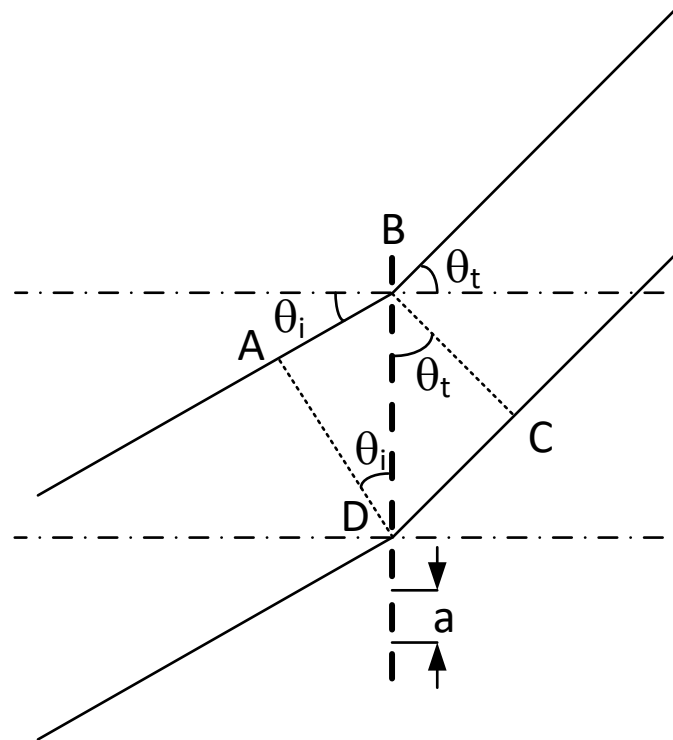
Innym kryterium jest podział na siatki:

- transmisyjne, w których światło przechodzi przez siatkę,
- odbiciowe, w których światło odbija się od siatki.

Działanie siatek dyfrakcyjnych można prosto wyjaśnić na przykładzie transmisyjnych siatek amplitudowych. Załóżmy, że siatka taka zbudowana jest z niewielkich, przezroczystych obszarów umieszczonych okresowo w odległości **a**. Odwrotność tej odległości jest nazywana **stałą siatki dyfrakcyjnej**.

Jeżeli na siatkę dyfrakcyjną pod kątem θ_i pada fala płaska, to faza pola elektromagnetycznego docierającego do kolejnych przezroczystych obszarów jest równa:

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_i \quad (1)$$



Rysunek 3. Schemat i zasada działania transmisyjnej amplitudowej siatki dyfrakcyjnej.

Założmy teraz, że fala po przejściu przez siatkę jest transmitowana pod pewnym kątem θ_t . Wówczas, daleko od siatki, różnica faz między polem elektromagnetycznym transmitowanym przez sąsiednie obszary przezroczyste jest równa:

$$\varphi_t = -\frac{2\pi}{\lambda} \alpha \sin \theta_t \quad (2)$$

Połączenie równań (1) i (2) daje wzór na całkowitą różnicę faz pól transmitowanych przez sąsiednie obszary:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha \sin \theta_i - \frac{2\pi}{\lambda} \alpha \sin \theta_t \quad (3)$$

Najsilniejsze fale elektromagnetyczne obserwuje się, gdy powyższa różnica faz jest całkowitą wielokrotnością 2π (zachodzi wówczas interferencja konstruktywna):

$$\Delta\varphi = 2\pi m \quad (4)$$

Porównując równania (3) i (4) otrzymuje się tzw. **równanie siatki dyfrakcyjnej** opisujące kąty, pod jakimi obserwowane są kolejne prążki ugiętej fali:

$$\sin \theta_i - \sin \theta_t = \frac{m\lambda}{\alpha} \quad (5)$$

Dla małych kątów (w tzw. przybliżeniu przyosiowym) równanie (5) upraszcza się do postaci:

$$\theta_i - \theta_t \approx \frac{m\lambda}{\alpha} \quad (6)$$

$$\theta_t \approx \theta_i - \frac{m\lambda}{\alpha} \quad (7)$$

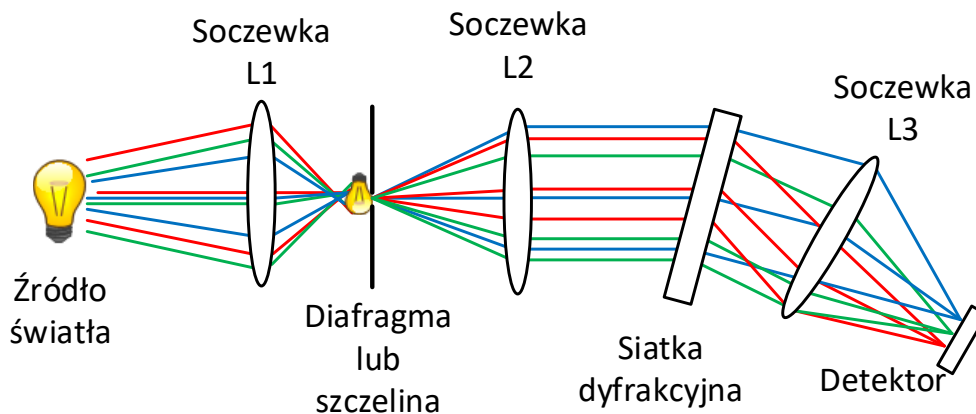
Wartość parametru m nazywa się **rzędem ugięcia** fali elektromagnetycznej. Choć teoretycznie może powstać tyle rzędów ugięcia fali, aż wartość kąta θ_t nie przekroczy 90° , to wyższe rzędy mogą być trudne do zaobserwowania ze względu na małe natężenie fali.

b. Podstawowa konstrukcja spektrometru

Wykorzystanie siatki dyfrakcyjnej do konstrukcji spektrometru wymaga zastosowania dodatkowych elementów optycznych, które zapewnią, że

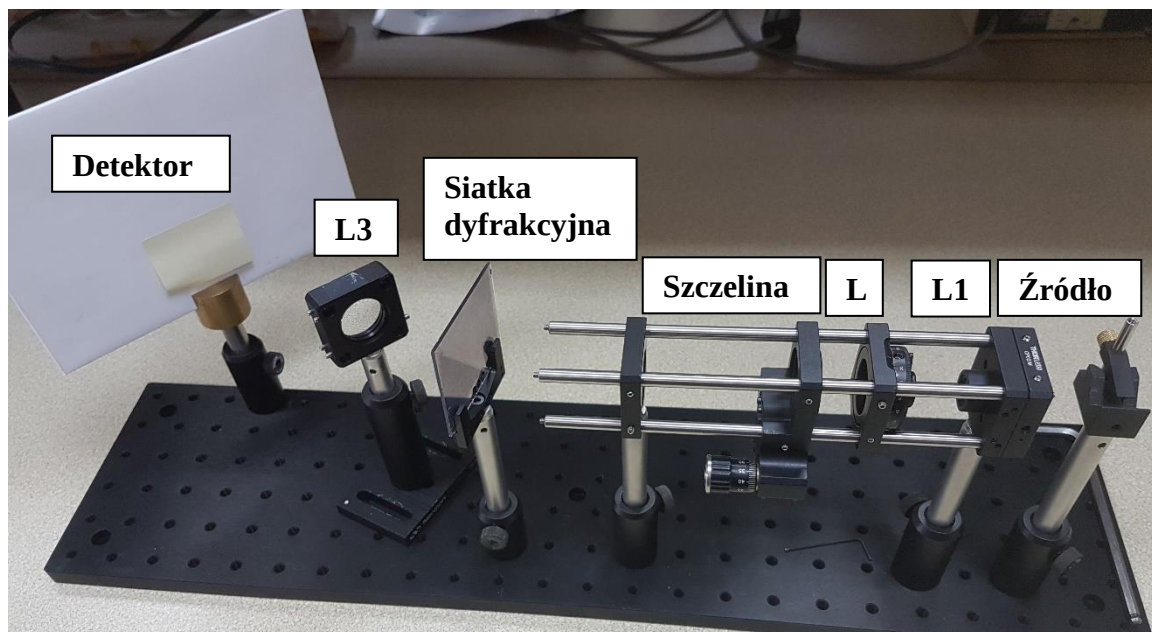
- do siatki dyfrakcyjnej dotrze fala skolimowana (o równoległej wiązce),
- fale rozchodzące się z różnych punktów siatki, ale pod tym samym kątem skupią się w jednym miejscu.

Do realizacji obu tych wymagań stosuje się soczewki lub zwierciadła. W ćwiczeniu laboratoryjnym skonstruowany zostanie układ wykorzystujący soczewki (Rys. 4). W dalszej części tekstu przez soczewkę rozumie się soczewkę skupiającą.



Rysunek 4. Schemat konstrukcji spektrometru z siatką transmisyjną.

Omawiany układ składa się z dwóch głównych podukładów. Pierwszy z nich, który tworzą soczewki **L1** i **L2** oraz diafagma, odpowiada za uzyskanie skolimowanej wiązki światła. Drugi podukład, składający się z siatki dyfrakcyjnej, soczewki **L3** i detektora światła, ma za zadanie odseparować od siebie fale o różnych długościach i dokonać pomiaru i mocy. Warto zauważyć, że w przypadku zastosowania omawianego układu do badania widma laserów o dobrze skolimowanej wiązce, pierwszy podukład nie byłby w ogóle potrzebny.



Rysunek 5. Przykładowa konstrukcja spektrometru optycznego z siatką transmisyjną.

Zasada działania spektrometru jest następująca:

1. Soczewka **L1** wytwarza obraz badanego źródła światła na diafragmie (szczelinie), która, z punktu widzenia reszty układu, staje się wówczas punktowym źródłem światła.
2. Soczewka **L2** zamienia światło ze źródła punkowego (oświetlonej diafragmy lub szczeliny) na wiązkę skolimowaną. Warunkiem jest umieszczenie źródła dokładnie w ognisku soczewki. Zapamiętaj zasadę, że **każdy promień światła wychodzący z ogniska soczewki, po przejściu przez nią propaguje się równoległe do osi optycznej**. Zasada ta obowiązuje jedynie w przybliżeniu przyosiowym optyki geometrycznej, jednak ułatwia intuicyjne zrozumienie działania soczewki.
3. Do siatki dyfrakcyjnej dochodzi skolimowana wiązka światła zawierająca składowe o różnych długościach fali. Siatka dyfrakcyjna ugina każdą składową po innym kącie.
4. Soczewka **L3** skupia składowe o różnych długościach fali w różnych punktach swojej płaszczyzny ogniskowej. Zapamiętaj drugą zasadę działania soczewki, która mówi, że **wszystkie promienie dochodzące do soczewki pod tym samym kątem skupią się w jej płaszczyźnie ogniskowej, a odległość od osi optycznej zależy od kąta padania promieni**. Podobnie jak poprzednia zasada, ta również obowiązuje w przybliżeniu przyosiowym optyki geometrycznej.
5. Umieszczony w płaszczyźnie ogniskowej soczewki **L3** detektor umożliwia pomiar mocy poszczególnych składowych światła. Jako detektorów można stosować matryce lub linijki CCD, co umożliwia jednoczesny pomiar całego widma. Stosunkowo małe rozmiary dostępnych matryc detektorów stwarzają jednak problemy z uzyskaniem dużej rozdzielczości pomiaru. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie pojedynczego detektora z przesłoną. Wymaga to jednak ruchu detektora lub elementów optycznych spektrometru.

Z punktu widzenia projektowania spektrometru ważna jest znajomość odległości od osi optycznej soczewki **L3**, w jakiej skupiają się na detektorze składowej światła o różnych długościach fali. W przybliżeniu przyosiowym odległości te dane są wzorem:

$$x = f\theta_{il} \quad (8)$$

gdzie f jest ogniskową soczewki **L3**, a θ_{il} jest kątem padania na nią fali.

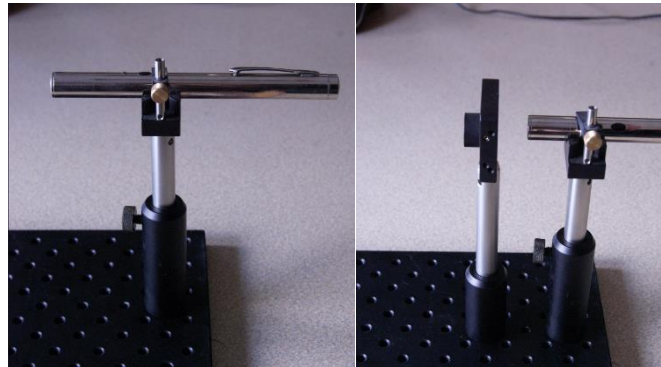
Uwzględniając równanie (7) i zakładając, że kąt między płaszczyzną soczewki **L3**, a płaszczyzną siatki dyfrakcyjnej wynosi $\Delta\theta$ otrzymujemy:

$$x = f * \left(\theta_i - \frac{m\lambda}{\alpha} + \Delta\theta \right) \quad (9)$$

2. ZADANIA PRZYGOTOWAWCZE DO LABORATORIUM

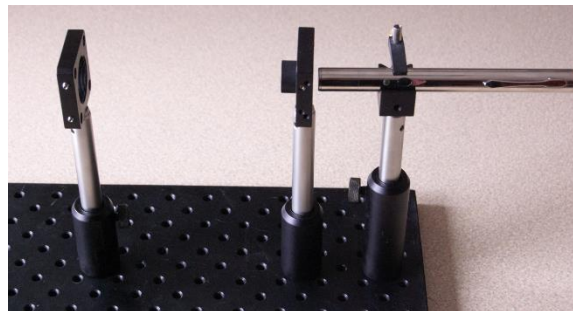
a. Montaż układu spektrometru

- I. Do płyty optycznej przykręć czarne mocowanie statywu. W mocowaniu umieść statyw ze źródłem.
- II. Bezpośrednio za statywem na wskaźnik laserowy umieść statyw z soczewką **L1**.



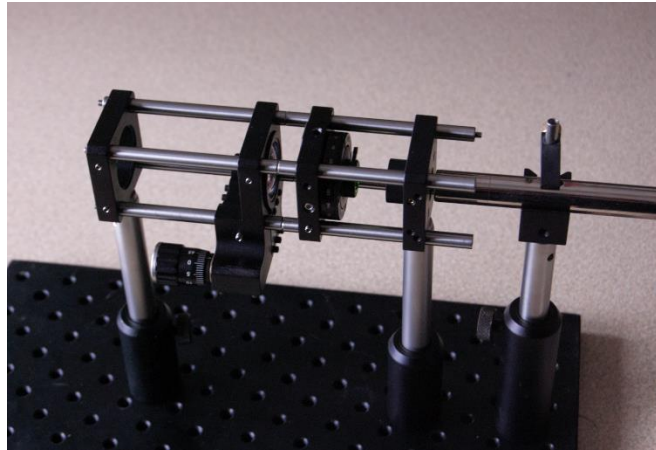
Rysunek 6. Montaż lasera i soczewki **L1**.

- III. W odległości pięciu otworów montażowych od soczewki **L1** umieść statyw z uchwytem do systemu klatkowego.



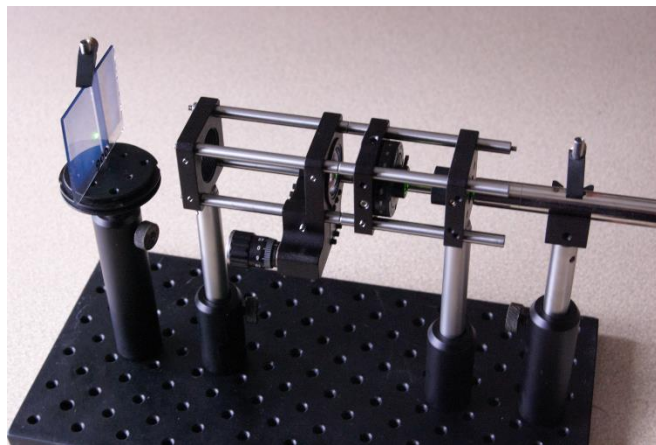
Rysunek 7. Montaż uchwyty do systemu klatkowego.

- IV. Przy pomocy prętów do systemu klatkowego umieść diafragmę oraz soczewkę **L2** za soczewką **L1**.



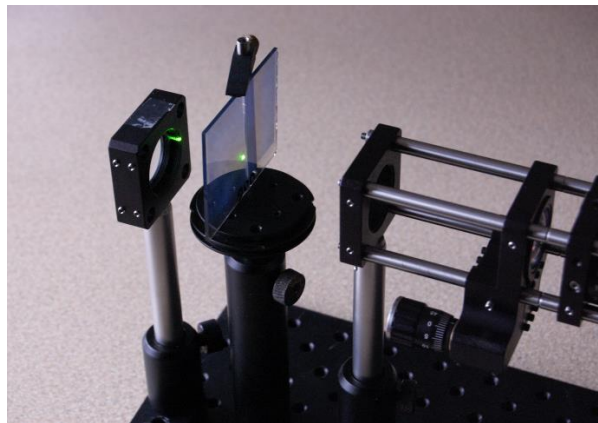
Rysunek 8. Montaż diafragmy i soczewki **L2**.

- V. Zamknij diafragmę i ustaw ją tak, aby otwór znajdował się w ognisku soczewki **L1**. We właściwej pozycji przez zamkniętą diafragmę powinno przechodzić maksimum mocy z lasera.
- VI. Otwórz diafragmę i ustaw pozycję soczewki **L2** tak, aby uzyskać za nią równoległą wiązkę światła.
- VII. Za soczewką **L2** umieść na statywie siatkę dyfrakcyjną.



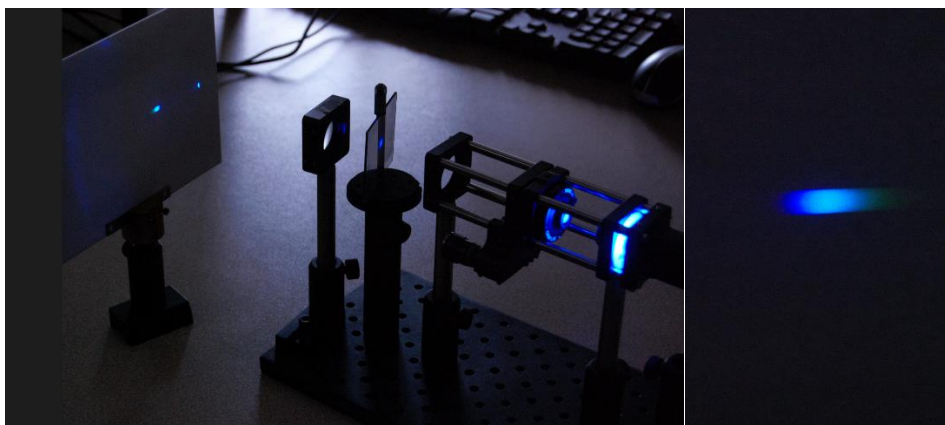
Rysunek 9. Montaż siatki dyfrakcyjnej.

- VIII. Obróć statyw z siatką dyfrakcyjną tak, aby maksimum mocy światła znalazło się w pierwszym rzędzie ugięcia.
- IX. Za siatką dyfrakcyjną umieść na regulowanej podstawie soczewkę **L3**. Soczewka powinna być ustawiona tak, aby przechodziło przez nią światło ugięte na siatce dyfrakcyjnej. Płaszczyznę soczewki ustaw równoległe do płaszczyzny siatki dyfrakcyjnej (nie jest to konieczne a nawet zalecane, ale ułatwi wykonanie obliczeń niezbędnych w sprawozdaniu). Zmierz i zapisz kąt ustawienia siatki dyfrakcyjnej.



Rysunek 10. Montaż soczewki **L3**.

- X. Wyjmij wskaźnik laserowy i ustaw na prętach od systemu klatkowego niebieską diodę LED. Wyreguluj położenie diafragmy – powinna znajdować się ona w miejscu, w którym soczewka **L1** tworzy obraz diody LED. Następnie wyreguluj pozycję soczewki **L2** tak, aby diafragma znajdowała się w ognisku tejże soczewki.
- XI. Ustaw ekran w pozycji, w której powstaje na nim wyraźne widmo światła ostro ograniczone z góry i z dołu. Zmierz i zapisz odległość ekranu od soczewki **L3** (jest to ogniskowa soczewki).



Rysunek 11. Test spektrometru na przykładzie niebieskiej diody LED.

Kalibracja spektrometru

- I. Umieść w spektrometrze biały LED i zmierz zakres długości fali, na jakich świeci dioda oraz długość fali odpowiadającej najjaśniejszemu świeceniu.

Pomiar widma wybranych źródeł światła

- I. Ustaw w spektrometrze zielony wskaźnik laserowy i wyreguluj pozycję diafragmy i soczewki L2 (Zamknij diafragmę i ustaw ją tak, aby otwór znajdował się w ognisku soczewki L1. We właściwej pozycji przez zamkniętą diafragmę powinno przechodzić maksimum mocy z lasera). Zaznacz na ekranie pozycję pojawiającej się na nim linii.
- II. Ustaw w spektrometrze czerwony wskaźnik laserowy i zaznacz na ekranie pozycję pojawiającą się na nim linii.
- III. Umieść w spektrometrze niebieską diodę LED i zmierz zakres długości fali, na jakich świeci dioda oraz długość fali odpowiadającej najjaśniejszemu świeceniu.

3. SPRAWOZDANIE:

a. W sprawozdaniu przedstaw następujące wyniki:

- I. Odległość między liniami odpowiadającymi czerwonemu i zielonemu wskaźnikowi laserowemu. Znając długości fali laserów, stałą siatki dyfrakcyjnej i ogniskową soczewki, porównaj uzyskany wynik z wartościami z zadania teoretycznego.
- II. Podaj szerokość widma niebieskiej diody LED oraz długość fali odpowiadającą najjaśniejszemu świeceniu.
- III. Podaj i opisz dwa zastosowania spektrometrów.

b. Zadanie teoretyczne

W poniższych zadaniach przyjmij następujące założenia:

- I. Siatka dyfrakcyjna umieszczona jest prostopadle do kierunku padania wiązki światła, a soczewka L3 jest równoległa do siatki.
- II. Zakres długości fali badanych spektrometrem odpowiada całemu zakresowi światła widzialnego.
- III. Wykorzystywany jest pierwszy rząd ugięcia fali.

c. Zadania:

- I. Jaką szerokość powinna mieć matryca detektorów, aby w pełni wykorzystać zakres spektrometru zbudowanego z siatki dyfrakcyjnej o stałej 600 mm^{-1} i soczewki o ogniskowej 40 mm ?
- II. Dysponując matrycą CCD o szerokości 30 mm i siatką dyfrakcyjną o stałej 600 mm^{-1} oblicz ogniskową soczewki zapewniającą najlepszą rozdzielczość pomiaru widma. Zakładając liczbę pikseli matrycy równą 2048 oblicz tę rozdzielczość.