

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

WYDZIAŁ NOWYCH TECHNOLOGII I CHEMII

FIZYKA

Ćwiczenie laboratoryjne nr 44

WYZNACZANIE DŁUGOŚCI FAL ŚWIETLNYCH ŹRÓDEŁ BARWNYCH (DIODY LED)



Autor dr inż. Waldemar Larkowski

Ćwiczenie 44

Wyznaczanie długości fal świetlnych półprzewodnikowych źródeł barwnych (diody LED)

44.1 Wstęp teoretyczny

Fale świetlne

Fale elektromagnetyczne, których długość mieści się w granicach 0,36 do 0,78 μm mają właściwości oddziaływania na ludzkie oko, dlatego nazywamy je falami świetlnymi. W zależności od długości fale świetlne wywołują różne efekty barwne, które zależą od cech indywidualnych obserwatora. Cały zakres fal widzialnych można podzielić w przybliżeniu na obszary:

Fiolet	0,36-0,44 μm
Niebieski	0,44-0,49 μm
Zielony	0,49-0,56 μm
Żółty i pomarańczowy	0,56-0,62 μm
Czerwony	0,62-0,78 μm

Dyfrakcja i interferencja

Potwierdzeniem falowej natury światła są zjawiska dyfrakcji i interferencji.

Dyfrakcję można zaobserwować przy przejściu światła przez wąskie szczeliny lub przeszkody. Jeżeli za źródłem światła jednobarwnego (monochromatycznego) umieścimy szczelinę, to za nią otrzymamy wąską wiązkę światła. Ustawiając następnie przesłonę ze szczeliną o regulowanej szerokości możemy na ekranie zaobserwować obraz tej wiązki. Przy szerokości szczeliny rzędu dziesiątych części milimetra na ekranie otrzymamy jasną smugę. Jeżeli zmniejszymy szerokość szczeliny do setnych części milimetra wówczas obraz szczeliny staje się rozmyty, a na ekranie pojawia się szereg symetrycznie rozmieszczonych jasnych i ciemnych prążków. Jest to dyfrakcyjny obraz szczeliny. Zgodnie z zasadą Huygensa (czyt. Højhensa) każdy punkt, do którego dochodzi fala staje się stacją źródłem fal elementarnych rozchodzących się wokół tego punktu. W przypadku szczeliny jej brzegi stają się źródłem fal elementarnych, które nakładając się na ekranie fale dają obszary jasne lub ciemne w zależności od fazy spotykających się fal.

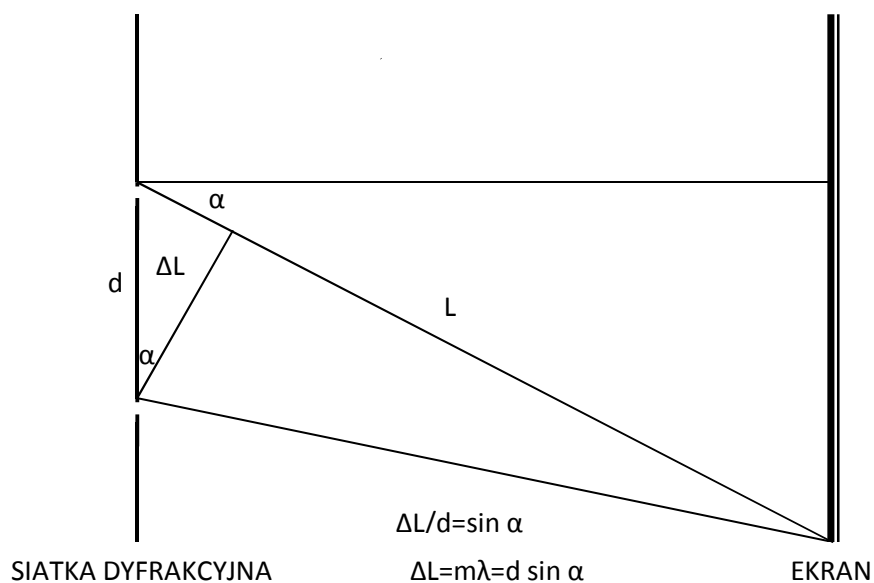
Takie zjawisko nazywamy interferencją fal. Jasny prążek powstaje wtedy, gdy fale spotykają się w zgodnych fazach. Jeżeli fazy różnią się o π (co pół długości fali) wówczas następuje ich wygaszenie i powstaje prążek ciemny.

Doświadczenie Younga

Po raz pierwszy interferencję światła uzyskał Young (czyt. Jang). Przez ugięcie fal na dwóch szczelinach otrzymał on obraz prążków interferencyjnych. Zgodnie z zasadą Huygensa każdy punkt, do którego dochodzi fala staje się źródłem fal elementarnych rozchodzących się we wszystkich kierunkach od tego punktu, więc na ekranie spotykają się we wszystkich jego punktach. Prążki możemy zaobserwować w miejscach gdzie spełnione są poprzednio podane warunki wzmocnienia i osłabienia związane różnicą faz spotykających się fal. Faza fali z jaką dociera ona do ekranu wynika z długości drogi jaką przebywa ta fala od każdej ze szczelin do danego punktu ekranu. Jeżeli różnica dróg ΔL jest równa długości fali lub jej całkowitej wielokrotności $n\lambda$, to powstaje jasny prążek.

Jeżeli użyjemy światła białego (o widmie ciągłym) wówczas uzyskamy obraz w postaci tęczy, bo zgodnie z poniższym wzorem ze wzrostem λ rośnie kąt α , czyli otrzymamy zmianę barw od fioletu do czerwieni.

Ze względu na duże różnice w opisie rozróżniamy dwa rodzaje dyfrakcji: w polu bliskim, gdzie promienie są zbieżne, czyli dyfrakcję Fresnela (czyt. Frenela), oraz w polu dalekim, gdzie promienie są równoległe, czyli dyfrakcję Fraunhofera.



Rys. 1 Dyfrakcja Fresnela dla dwóch szczelin oddległych o d

Aby wzmocnić obraz efektu interferencyjnego stosuje się w optyce układy wielu szczelin, czyli tzw. siatki dyfrakcyjne. Zastosowanie wielu szczelin powoduje, że sumują się efekty optyczne od każdej szczeliny.

Przedstawiony na Rys.14 wzór łączy długość fali światła i odległość między szczelinami siatki dyfrakcyjnej:

$$m\lambda = d \sin \alpha$$

gdzie λ oznacza długość fali, n rząd widma, d odległość między szczelinami zaś α kąt pod jakim występuje wzmocnienie.

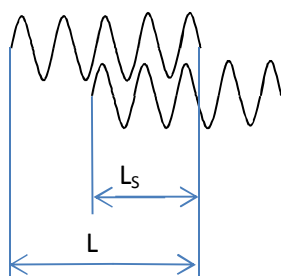
Rzeczywiste źródła światła najczęściej składają się z bardzo wielu źródeł punktowych, którymi są świecące atomy. Wysyłają one światło w różnych kierunkach w postaci ciągów falowych o bardzo krótkim czasie trwania rzędu 10^{-8} s o zmieniających się przypadkowo fazach. Te ciągi falowe obserwujemy jako pojedyncze błyski, a przy wielu kolejno występujących po sobie jako świecenie ciągłe. Wysyłane przez takie źródła wiązki światła nazywamy niespójnymi, lub niekoherentnymi, czyli takimi, które nie mają stałej w czasie różnicy faz. Obrazy interferencyjne powstają wówczas kilka tysięcy razy na sekundę nie mogą więc być zaobserwowane.

Źródłami światła dla których można zaobserwować interferencję są lasery i diody elektroluminescencyjne LED(Light Emitting Diode), których światło jest spójne lub częściowo spójne.

Spójność czasowa występuje wtedy, gdy z jednego punktu źródła wychodzą w tym samym kierunku dwie fale(ciągi falowe) w różnych chwilach czasu. Jeżeli po przebyciu pewnej drogi optycznej mają zgodne fazy dają obraz interferencyjny, taką drogę nazywamy drogą spójności. Najdłuższy przedział czasu, w którym występuje zgodność fazowa nazywa się czasem spójności.

Spójność przestrzenna występuje wtedy, gdy zgodność fazowa występuje między wiązkami światła wychodzącymi z dwu różnych punktów rozciągniętego źródła światła.

Stopień spójności zależy bezpośrednio od monochromatyczności światła. Jeżeli szerokość widmowa wynosi $\Delta\nu$, to czas spójności wynosi $1/\Delta\nu$, a droga spójności ma długość $c/\Delta\nu$. Stąd widać, że całkowicie spójnym jest światło idealnie monochromatyczne.



Rys. 2 Złożenie ciągów falowych o długości L na drodze spójności L_s

UWAGA!

Przed przystąpieniem do dalszej części należy zapoznać się z teorią do Ćw. 18 i Ćw. 19 (dział Optyka)

Diody LED

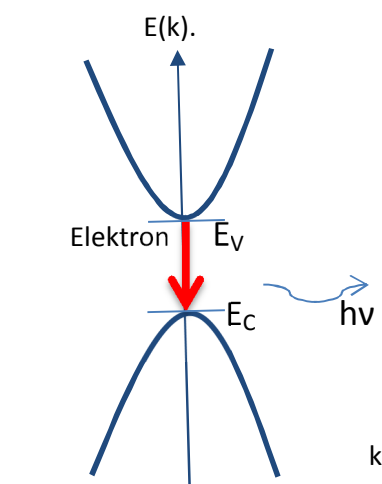
Dioda LED jest przyrządem półprzewodnikowym ze złączem p-n, w którym przy polaryzacji w kierunku przewodzenia występuje tzw. rekombinacja promienista. W najprostszym przypadku efekt ten występuje w półprzewodniku w trakcie prostych przejść elektronu z pasma przewodzenia do pasma walencyjnego, oraz przez dziury przechodzące z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Przejścia proste występują w półprzewodnikach, w których minimum pasma przewodnictwa i maksimum pasma walencyjnego znajdują się w „jednym punkcie”. Przejścia proste zachodzą bez zmian pędu nośników. Długość fali promieniowania diod LED odpowiada energii przerwy zabronionej, ma więc dokładnie określone widmo częstotliwościowe, czyli barwę.

Podczas obniżania temperatury następuje zmniejszenie szerokości przerwy energetycznej w następstwie czego następuje przesunięcie charakterystyki widmowej, a wraz z ze zmianą szerokości przerwy energetycznej zmienia się barwa światła emitowanego przez diodę.

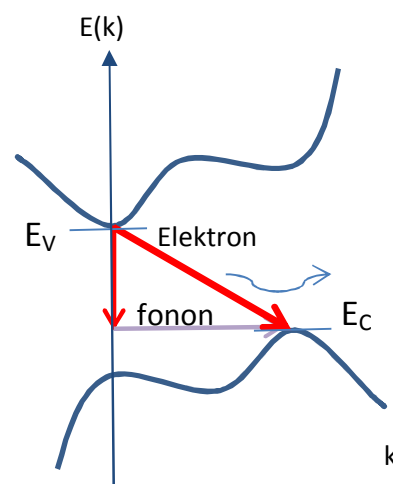
Zależność długości fali od szerokości przerwy zabronionej przedstawia wzór:

$$\lambda = hc / E_g$$

Jeżeli λ wyrazimy w μm , a energię w eV, to otrzymamy prostą zależność: $\lambda = 1,24 / E_g$

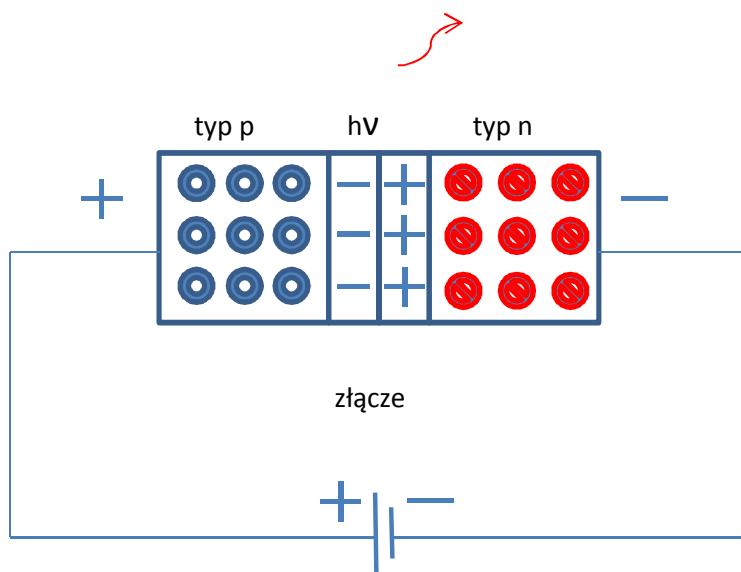


Rys.3a Przejścia proste (fotonowe)

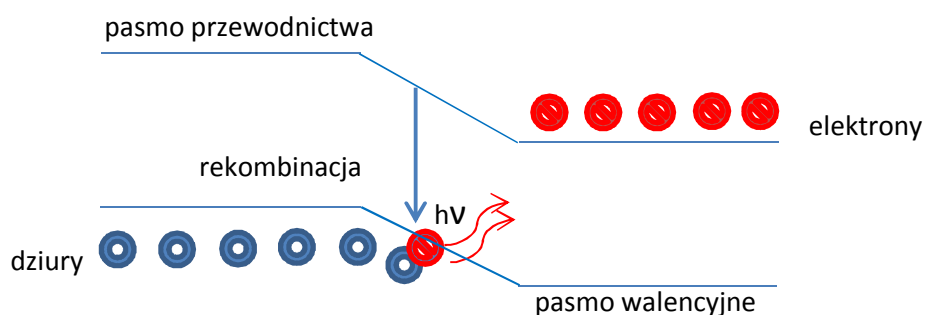


Rys.3b Przejścia skośne (fononowe) cienka. linia pokazuje etapy pośrednie

Gdy w półprzewodniku minimum pasma przewodnictwa i maksimum pasma walencyjnego występują dla różnych wartości pędu zachodzą przejścia skośne z udziałem emisji lub absorpcji fononu (kwant drgań sieci), który przejmuje różnicę pędu.



Rys.4 Złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia z rekombinacją elektronów i dziur z emisją fotonów w obszarze złącza



Rys. 5 Struktura pasmowa złącza p-n z rekombinacją elektronów z dziurami w złączu p-n

Rzeczywista dioda LED emituje światło w pewnym przedziale częstości począwszy od częstości odpowiadającej przerwie energetycznej półprzewodnika. Szerokość połówkowa tego widma odpowiada zakresowi częstości przy której natężenie jest większe od połowy natężenia maksymalnego. Dla diod LED szerokość połówkowa wynosi od kilkudziesięciu do prawie dwustu nm.

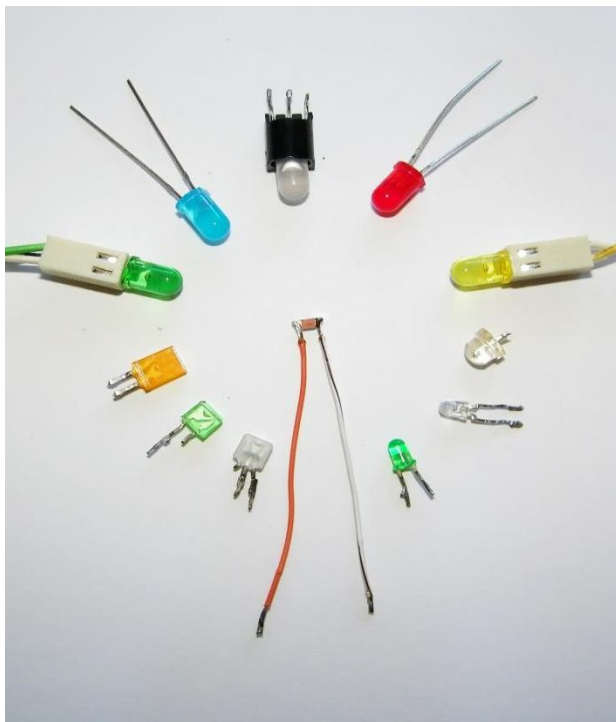
Szerokość przerwy zabronionej i odpowiadające im długości fal emitowanych fotonów w półprzewodnikach dwu składnikowych przedstawia Tab. 1

Tab. 1

Półprzewodnik	E_g [eV]	λ [um]	Barwa
GaN Azotek galu	3,40	0,36	nadfiolet
ZnSe Selenek cynku	2,69	0,46	niebieski
GaP Fosforek galu	2,25	0,55	żółty
GaAs Arsenek galu	1,52	0,82	podczerwień
GaSb Antymonek galu	0,81	1,53	podczerwień
InAs Arsenek indu	0,43	2,88	podczerwień

Dla uzyskania innych szerokości przerwy zabronionej, czyli innych długości emitowanych barw stosuje się związki trójskładnikowe, w których szerokość przerwy zależy od składu półprzewodnika. Do wytwarzania diod elektroluminescencyjnych stosuje się między innymi $GaAs_{1-x}P_x$ -fosforo-arsenek galu $Al_xGa_{1-x}As$ -arsenek glinowo-galowy.

Diody białe uzyskiwane są na dwa sposoby: przez wytworzenie diody o trzech obszarach aktywnych wysyłających promieniowanie w trzech podstawowych kolorach (czerwonym, zielonym i niebieskim) składających się na światło białe, lub przez pokrycie diody emitującej światło niebieskie warstwą fosforu, który na zasadzie luminoforu emituje światło białe.



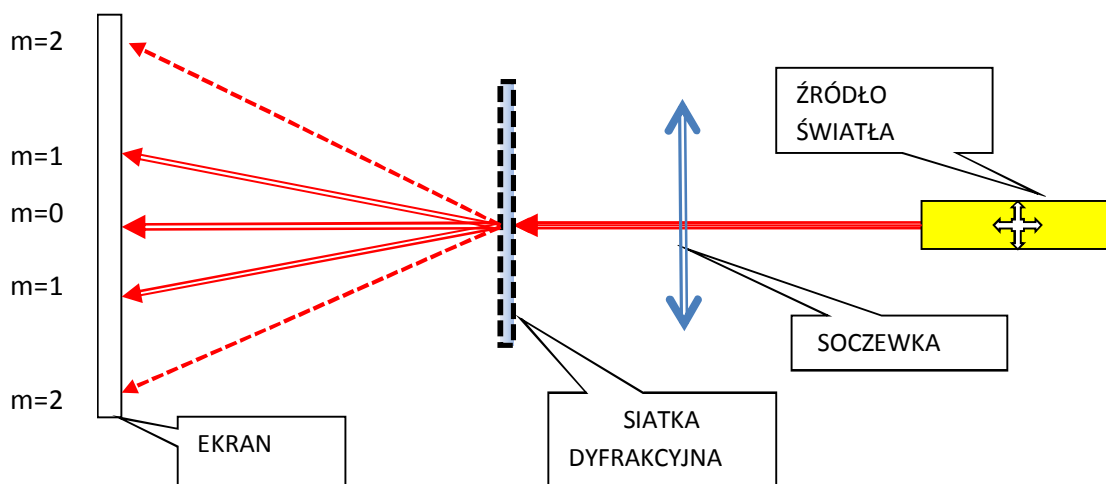
Rys. 6a Różne typy diod LED małej mocy. Diody trzema wyprowadzeniami są diodami dwubarwnymi.



Rys. 6b Układ elektrod w diodzie LED po lewej stronie katoda, po prawej anoda.

44.2 Opis układu pomiarowego

Zestawiony układ pomiarowy składa się ze źródła światła, którym w części A ćwiczenia jest laser półprzewodnikowy o znanej długości fali światła, którego wiązka pada na siatkę dyfrakcyjną, po przejściu przez którą światło ulega dyfrakcji i pada na ekran. Powstałe na ekranie widmo składa się z prążków kolejnych rzędów.



Rys. 7 Schemat układu pomiarowego

44.3 Przeprowadzenie pomiarów

Ogólne wytyczne BHP przy pracy z laserami.

Każdy użytkownik winien przed uruchomieniem lasera lub urządzenia laserowego ustalić jego klasę i podstawowe dane o nim: długość emitowanej fali, moc lub energię, zalecenia użytkowe producenta. Laserem impulsowym nazywamy taki, którego czas świecenia jest krótszy niż 0,25 sek. W przeciwnym wypadku jest uważany go za pracujący w sposób ciągły.

Urządzenie laserowe klasy 1 jest bezpieczne, ponieważ wiązki laserowe nie są wyprowadzane na zewnątrz lub są dostatecznie słabe. Po zdjęciu obudowy takie urządzenie staje się urządzeniem wyższej klasy.

Laser klasy 2 to laser emitujący promieniowanie widzialne (400 - 700 nm). Laser o działaniu ciągłym nie może mieć mocy większej niż 1 mW, natomiast energia pojedynczego błysku lasera impulsowego może wynosić do 0,2 uJ. Laser klasy 2 nie wymaga stosowania okularów ochronnych. Zabezpieczeń takich wymagają lasery klas wyższych od 2.

Nie wolno pracować z żadnymi laserami jeżeli stosowało się leki wpływające na wielkość źrenic i odruch zamykania oczu. Za podstawową ochronę oczu przy pracy z laserami klasy 2 uważa się naturalne odruchy obronne zamykania oczu pod wpływem gwałtownego ich oświetlenia. W przypadku napromieniowania należy natychmiast zgłosić wypadek prowadzącemu oraz skorzystać z pomocy lekarskiej.

Bez względu na klasę lasera zabrania się patrzenia w wiązkę wychodzącą z lasera lub odbitą. Zabrania się zabaw wiązkami laserowymi polegającymi na oświetlaniu ludzi lub materiałów niebezpiecznych. W czasie ustawiania eksperymentu zaleca się pracować przy włączonym pełnym oświetleniu. Obowiązkiem eksperymentatora jest takie kierowanie wiązek, aby nie opuściły obszaru eksperymentu (ustawiając lustra, budując ekrany absorbujące lub rozpraszające).

Wiązki laserowe należy prowadzić na poziomie różnym od poziomu oczu.

A. Wyznaczenie stałej siatki dyfrakcyjnej z użyciem lasera półprzewodnikowego o znanej długości fali.

1. Zamocować laser w uchwycie
2. **Sprawdzić , zgodnie z warunkami BHP, czy laser nie będzie skierowany w kierunku niczych oczu!**
3. Włączyć zasilanie lasera.
4. Sprawdzić czy elementy układu ustawione są tak, aby światło przechodziło przez siatkę do ekranu po linii prostej, tak jak na rysunku.
5. Uzyskać na ekranie obraz interferencyjny światła lasera (bez użycia soczewki skupiającej)
6. Zmierzyć odległość L siatki interferencyjnej od ekranu.
7. Zmierzyć na ekranie odległość prążków interferencyjnych kolejnych rzędów widma po prawej i lewej stronie od prążka zerowego rzędu.
8. Wyniki zapisać w tabeli Tab.2.
9. Po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie lasera.

Tab.2

Rząd widma	X[mm]		X_{sr} [mm]	L[mm]
	Po lewej	Po prawej		
m=1				
m=2				

X-odległość od zerowego rzędu prążków

L-odległość siatki od ekranu

B. Wyznaczenie długości fali światła emitowanego przez diody LED z użyciem siatki dyfrakcyjnej (ze stała siatki wyznaczoną w części A ćwiczenia)

1. Umieścić oprawę z diodą LED w uchwycie.
2. Zmierzyć odległość L siatki interferencyjnej od ekranu.
3. Włączyć zasilanie.
4. Sprawdzić czy elementy układu ustawione są tak, aby światło przechodziło przez soczewkę i siatkę do zerowego rzędu widma na ekranie po linii prostej, tak jak na rysunku.
5. Dobrać odległość soczewki od diody tak, aby uzyskać na ekranie minimalny rozmiar obrazu.
6. Zmierzyć na ekranie odległość prążków interferencyjnych kolejnych widocznych rzędów widma po prawej i lewej stronie od prążka zerowego rzędu. Pomiar powtórzyć pięć razy
7. Wyniki zapisać w tabeli Tab.3.
8. Czynności od punktu 4 do 7 wykonać dla trzech barw.
9. Po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie.

Tab.3

Barwa światła wybranej diody	Rząd widma	X[mm]		L[mm]
		Po lewej	Po prawej	
	m=1			
	m=2			

x - odległość od zerowego rzędu

L - odległość siatki od ekranu

44.4 Opracowanie wyników pomiarów

CZĘŚĆ A - Wyznaczanie stałej siatki dyfrakcyjnej

1. Obliczyć średnie odległości X_{SR} dla pomiarów po lewej i prawej stronie zerowego rzędu oddzielnie dla każdego rzędu widma dla światła lasera (dane w Tab.2).
2. Obliczyć sinusy kątów ugięcia, dla każdego rzędu widma, a wyniki wpisać do Tab.4.

$$\sin\alpha = \frac{X_{SR}}{\sqrt{X_{SR}^2 + L^2}}$$

Tab.4

Rząd widma	X_{SR} [mm]	$\sin\alpha$	d [mm]	d_{SR} [mm]
m=1				
m=2				

3. Obliczyć odległość d między szczelinami siatki dyfrakcyjnej dla podanej długości światła lasera w oparciu o wzór:

$$d_m = \frac{m\lambda}{\sin\alpha}$$

4. Obliczyć średnią odległość d_{SR} między szczelinami siatki dyfrakcyjnej.
5. Wyznaczyć niepewność standardową $u(L)$ dla pomiarów bezpośrednich wg. wzoru W.8, który w tym przypadku przyjmuje postać:

$$u(L) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}}$$

gdzie ΔL jest równe dokładności przyrządu pomiarowego.

6. Wyznaczyć niepewność standardową $u(X_{SR})$ średniej wartości odległości X_{SR} dla każdego rzędu widma wg. wzoru W.7, który w tym przypadku przyjmuje postać:

$$u_m(X_{SR}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{SR})^2}{n(n-1)}}$$

7. Dla każdego rzędu widma wyznaczyć względną niepewność standardową złożoną $u_{mCr}(d)$ odległości między szczelinami wg. wzoru W.13, który w tym przypadku przyjmuje postać:

$$u_{mCr}(d) = \sqrt{[(u(L)/L) L^2 / (X_{SR}^2 + L^2)]^2 + [(u(X_{SR})/X_{SR}) L^2 / (X_{SR}^2 + L^2)]^2}$$

8. Dla każdego rzędu widma wyznaczyć bezwzględną niepewność standardową złożoną $u_{mC}(d)$ odległości między szczelinami wg. wzoru W.13.

9. Wyznaczyć bezwzględną niepewność standardową złożoną $u_c(d)$ dla wszystkich odległości między szczelinami.

$$u_c(d) = 1/2 \sqrt{(u_{1c}(d))^2 + (u_{2c}(d))^2}$$

10. Wyniki z punktów 5-7 wpisać do tabeli Tab.5

Tab.5

Rząd widma	d[mm]	d_{SR} [mm]	$u(X_{SR})$ [mm]	$u(L)$ [mm]	$u_{cr}(d)$	$u_c(d)$ [mm]
m=1						
m=2						

CZĘŚĆ B- Wyznaczenie długości fali światła

- Obliczyć średnie odległości X_{SR} dla pomiarów po lewej i prawej stronie zerowego rzędu oddzielnie dla każdego rzędu widma.
- Obliczyć sinusy kątów ugięcia, a następnie długości fali λ , dla każdego rzędu widma, dla wszystkich wybranych barw.
- Obliczyć średnie długość fali dla wszystkich wybranych barw.
- Wyniki wpisać do Tab.6
- Wyznaczyć niepewność standardową $u(X_{SR})$ średniej wartości odległości X_{SR} (patrz część A).

Tab.6

Barwa światła wybranej diody	L[mm]	Rząd widma	X_{SR} [mm]	$\sin(\alpha)$	$\lambda[\mu m]$	$\lambda_{SR}[\mu m]$
		m=1				
		m=2				
		m=1				
		m=2				

- Wyznaczyć niepewność standardową złożoną $u_c(\lambda)$ odległości między szczelinami wg. wzoru W.12, dla parametrów d , L , X_{SR}
- Otrzymane wyniki przedstawić zgodnie z zasadami zapisu wyników i niepewności pomiarowej.
- Przeanalizować otrzymane wyniki i przedstawić wnioski.

Pytania kontrolne

- Jak jest zbudowane złącze półprzewodnikowe p-n?
- Jaka jest zasada działania diody LED?
- Od czego zależy barwa światła emitowanego przez diodę?
- Co to jest dyfrakcja i interferencja?
- Jakie są rodzaje dyfrakcji?
- Co to jest spójność czasowa?
- Co to jest długość drogi koherencji?

Grupa, zespół w składzie

3.1 Wartości teoretyczne wielkości wyznaczanych lub określanych:

3.2 Należy potwierdzić na stanowisku wartości parametrów i ich niepewności:

3.3 Pomiary i uwagi do ich wykonania:

Niepewność każdego pomiaru położenia

Wybrana dioda	X[mm] <i>odległość od zerowego rzędu</i>				L[mm] <i>odległość siatki od ekranu</i>
	Po lewej		Po prawej		
Wzorcowa 635 nm <i>(bez użycia soczewki skupiającej)</i>					

3.4 Data i podpis osoby prowadzącej