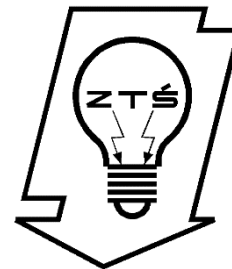


Ćw. 5. Badanie rozkładu widmowego promieniowania elektrycznych źródeł światła

Opracował: dr hab. inż. Sławomir Zalewski



1. Wprowadzenie teoretyczne

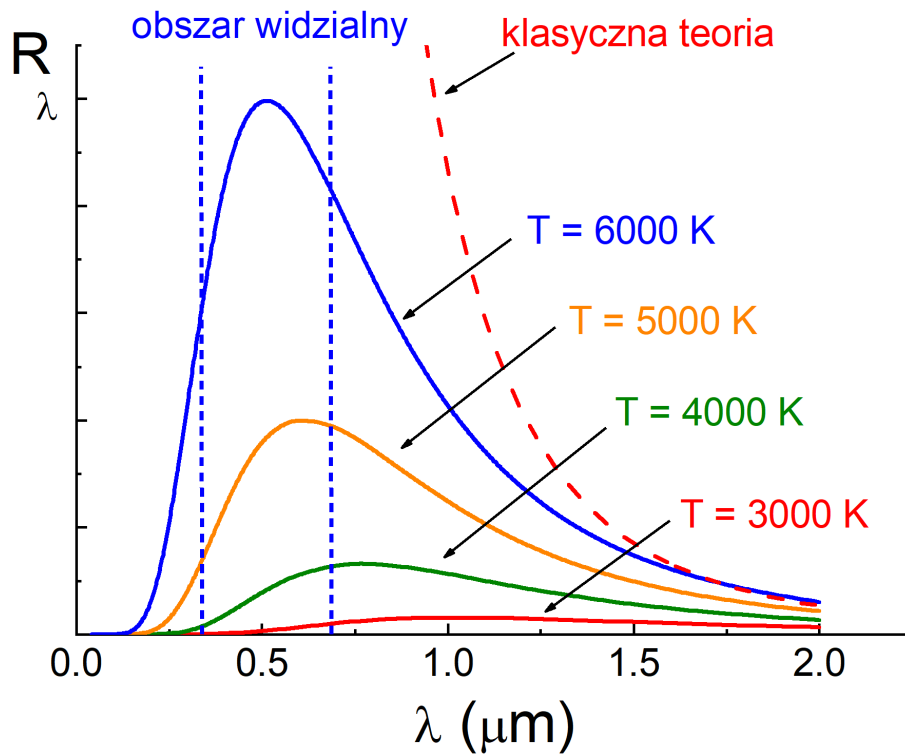
1.1. Rozkłady widmowe promieniowania różnych źródeł światła

Światło jest to wąski wycinek spectrum promieniowania elektromagnetycznego ograniczony zakresem jego percepcji przez ludzkie oko. Fale monochromatyczne (o jednej długości fali) wywołują wrażenie określonej barwy w zależności od długości fali. Jednak większość światła występującego w otoczeniu człowieka ma charakter polichromatyczny, czyli zawiera mieszaninę fal o różnych długościach w różnych proporcjach. Postrzegana przez obserwatora barwa światła zależy od składu widmowego światła, przede wszystkim od wzajemnej proporcji energii niesionej przez fale o poszczególnych długościach. Skład widmowy danej próbki promieniowania zależy od tego w jaki sposób zostało to światło wytworzone i ewentualnie przetworzone (odfiltrowane). Dwie próbki promieniowania o różnym składzie widmowym podczas prostej obserwacji mogą dawać wrażenie tej samej barwy, jednak oddziałując z materiałami barwnymi będą tworzyć różne wrażenia barwne, tworząc wrażenie zakłamania barw. Do stworzenia odpowiedniej jakości oświetlenia (odpowiedniego oddania barw poszczególnych materiałów) trzeba odpowiednio dobierać źródła generujące światło o odpowiednim składzie widmowym.

Znane są obecnie dwa sposoby generowania światła: inkandescencja czyli emisja temperaturowa opisana prawem Plancka i luminescencja czyli emisja kwantu energii (fotonu) w wyniku przejścia elektronu w atomie z orbity o wyższej energii na orbitę niższą. Ze względu na różny mechanizm powstawania promieniowania w tych dwóch zjawiskach rozkład widmowy światła generowanego temperaturowo zasadniczo różni się od rozkładu widmowego światła generowanego za pomocą luminescencji.

Emisja temperaturowa (inkandescencja) charakteryzuje się ciągłym widmem promieniowania elektromagnetycznego w zakresie od minimalnej długości fali zależnej od temperatury, do jakiej zostało podgrzane ciało emitujące, do nieskończoności. Rozkład (udział poszczególnych długości fal w całościowej emisji) zależy od temperatury emitera i dany jest wzorem Plancka [1]. Rozkład widmowe promieniowania emitowanego przez ciało czarne w różnych temperaturach zostały przedstawione na rys. 1. Źródła o niskiej temperaturze (ok. 2000 K) emitują promieniowanie, w którym dominują fale długie (wysoki udział składowej czerwonej), które odbierane jest przez obserwatora jako ciepłe (światło pomarańczowe, żółte). Im temperatura źródła jest wyższa maksimum gęstości promieniowania przesuwa się w kierunku fal krótszych a światło staje się chłodniejsze (białe). Przy bardzo wysokich temperaturach, praktycznie nieosiągalnych poza warunkami laboratoryjnymi (powyżej 3300 K) światło zaczyna być postrzegane jako błękitne. Źródłami światła wykorzystującymi zjawisko inkandescencji są wszelkiego rodzaju źródła żarowe,

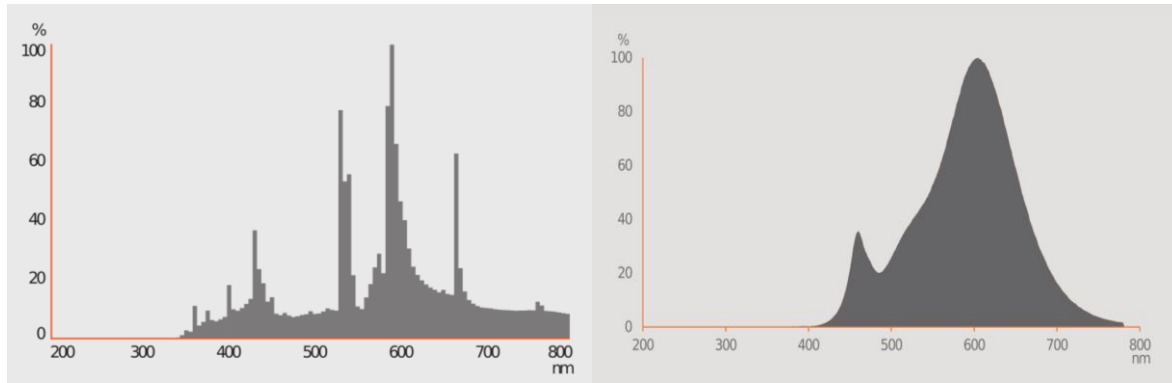
czyli wszystkie odmiany żarówek (tradycyjne: gazowane i niegazowane oraz halogenowe i kryptonowe).



Rys. 1. Rozkłady widmowe promieniowania ciała czarnego w różnych temperaturach

Luminescencja charakteryzuje się liniowym lub pasmowym widmem w zależności od stopnia swobody atomu w ośrodku, w którym dochodzi do emisji. Im atom silniej jest związany z otoczeniem (np. ułożony w sieci krystalicznej) tym szerokość pojedynczego pasma jest większa. Liczba i położenie poszczególnych pasm zależy od dostępnych poziomów energetycznych w atomie danego pierwiastka. Emisja światła przez wzbudzone w niskim ciśnieniu gazy i pary charakteryzuje się wąskimi liniami widmowymi, odpowiadającymi różnicom energii poziomów dopuszczonych w atomie danego pierwiastka. Atomy uwięzione w cząsteczkach lub w sieci krystalicznej emitują rozszerzone pasma widmowe. Warunkiem wystąpienia zjawiska luminescencji jest uprzednie wzbudzenie atomów (przesunięcie elektronów walencyjnych z poziomów podstawowych na poziomy wyższe poprzez dostarczenie im odpowiedniej energii).

Luminescencja ma wiele różnych form. Ich nazwy zależą od sposobu wzbudzenia atomów. W źródłach światła wykorzystuje się zjawiska tryboluminescencji (np. mechaniczne zderzenia elektronów z atomami w wyładowaniu elektrycznym np. w gazach), fotoluminescencji (wzbudzenie atomów poprzez naświetlanie ich fotonami wysokoenergetycznymi: fluorescencja, fosforescencja), elektroluminescencji (przepływ prądu elektrycznego w kryształach) czy termoluminescencji (wzbudzanie atomów w wyniku poddawania ich wysokiej temperaturze). Skład widmowy promieniowania powstałego na drodze luminescencji zależy od zawartości dostępnych poziomów przejść pomiędzy stanami wzbudzonymi a podstawowymi. Luminescencja jest wykorzystywana w wielu różnych rodzajach źródeł światła: w wysoko- i niskoprężnych lampach wyładowczych (rtęciówki, sodówki, świetlówki, lampy metalohalogenkowe), LED-ach. Przykładowe rozkłady widmowe promieniowania świetlówki i źródła LED przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Rozkłady widmowe promieniowania lampy metalohalogenkowej i LED
(źródło: strona internetowa Ledvance)

1.2. Metody pomiaru rozkładów widmowych promieniowania

Jedyną dostępną metodą poznania składu widmowego danej próbki promieniowania jest wykonanie pomiaru rozkładu widmowego poprzez rozłożenie jej na składowe monochromatyczne.

Do badania i pomiaru rozkładów widmowych promieniowania służą dwa rodzaje przyrządów. Pierwszy to pojedyncze, za to bardzo złożone przyrządy zwane foto(radio)spektrometrami (człon „radio” występuje w nazwach przyrządów mierzących rozkład widmowy nie tylko w widzialnym zakresie promieniowania ale także w podczerwieni i nadfiolecie). Drugi to stosunkowo prosty monochromator, jednak jego użycie wymaga rozbudowanego układu pomiarowego, złożonego z kilku dodatkowych przyrządów. Zarówno w foto(radio)spektrometrze jak i w monochromatorze zachodzi rozszczepienie światła (promieniowania optycznego w foto(radio)spektrometrach) na pryzmatach lub siatkach dyfrakcyjnych. Rozszczepienie polega na zmianie kierunku propagacji fali promieniowania elektromagnetycznego w funkcji jej długości.

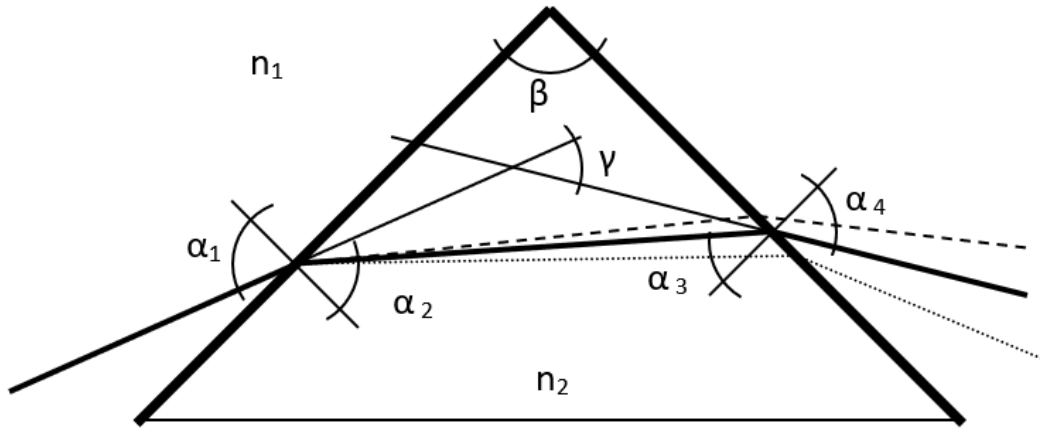
Do opisu rozszczepienia światła w pryzmatach wykorzystuje się prawo Snelliusa. Każdy ośrodek optyczny charakteryzuje się pewnym współczynnikiem załamania, definicyjnie związanym z prędkością rozprzestrzeniania się w nim fali elektromagnetycznej. Dla wielu przezroczystych ciał stałych prędkość rozprzestrzeniania się światła, a zatem także ich współczynnik załamania, zależy od częstotliwości fali, a zależność ta jest nieliniowa. Prawo Snelliusa przyjmuje postać funkcji długości fali:

$$\sin \alpha_1 n_1(\lambda) = \sin \alpha_2(\lambda) n_2(\lambda) \quad (1)$$

gdzie:

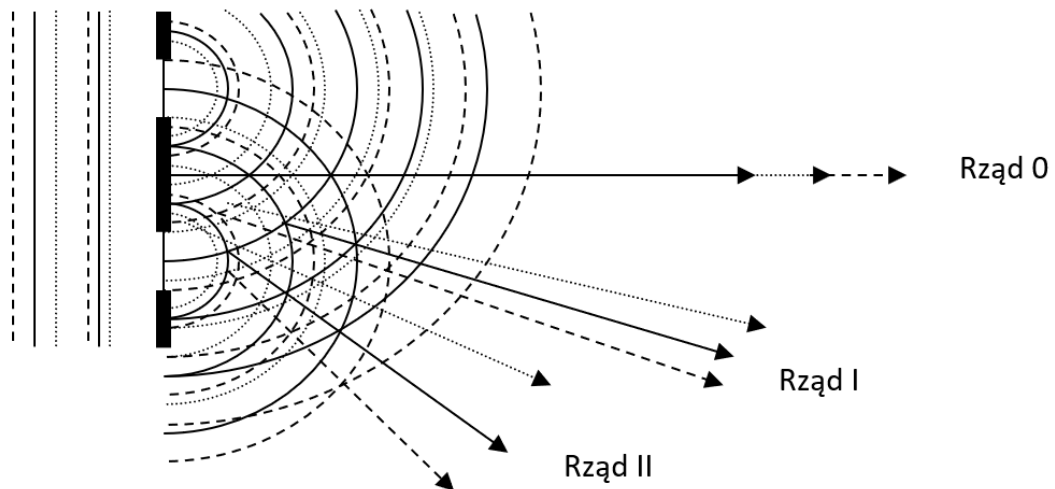
n_1, n_2 są współczynnikami załamania odpowiednio pierwszego i drugiego ośrodka, $\sin \alpha_1$ i $\sin \alpha_2$ są kątami zawartymi pomiędzy normalną do powierzchni granicznej i kierunkiem propagacji fali w tych ośrodkach.

Pryzmat (Rys. 3.) jest to element optyczny, mający postać klina o kącie rozwarcia ścian β wykonanego z materiału przezroczystego o dużym współczynniku załamania $n_2(\lambda)$ umieszczonego w otaczającym go ośrodku o współczynniku załamania n_1 . Kąt odchylenia pryzmatu zależy od kąta padania światła na pryzmat α_1 , kąta rozwarcia ścian pryzmatu β oraz współczynników załamania otoczenia n_1 i pryzmatu n_2 . Jeżeli pryzmat pracuje w powietrzu lub próżni $n_1 = 1$.



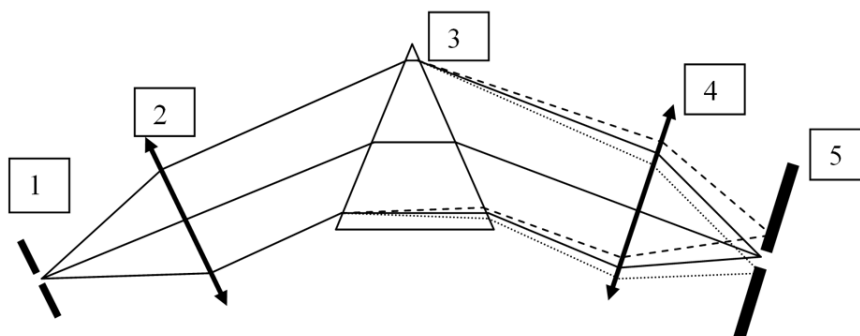
Rys.3. Przejście światła przez pryzmat powoduje zmianę kierunku propagacji fali oraz rozszczenie wiązki.

Podobnie jak w pryzmacie, rozszczenie wiązki światła polichromatycznego następuje na siatce dyfrakcyjnej (rys. 4.). Każda szczelina siatki jest źródłem wtórnej fali kolistej. Fale te za siatką interferują ze sobą i w pewnych kierunkach wzmacniają się (widmo rzędu 0, I, II, III...), a w pewnych osłabiają. Widmo rzędu 0 jest najsilniejsze, ale nie jest rozszczone. Każde kolejne widmo jest co prawda silniej rozszczone niż niższego rzędu – posiada większy kąt między kierunkami propagacji promieniowania o różnych długościach fali, ale jednocześnie jest słabsze od poprzedniego – niesie mniejszą energię. Do pomiarów wykorzystuje się zatem widmo rzędu I.



Rys. 4. Zasada rozszczenia światła na siatce dyfrakcyjnej.

Monochromator, niezależnie od tego czy do rozszczenia wykorzystuje pryzmat czy siatkę dyfrakcyjną ma podobną budowę (wiele konstrukcji pozwala na zamienne używanie pryzmatów wykonanych z różnych materiałów jak i siatek dyfrakcyjnych). Istotnymi elementami monochromatora są: szczelina wejściowa (poz. 1 na rys. 5) przez którą badane światło dostaje się do wnętrza monochromatora, element kolimujący wiązkę (poz. 2) w postaci soczewki bądź zwierciadła sferycznego, pryzmat (poz. 3) umieszczony na „bębnie” pozwalającym na jego precyzyjny obrót, element dekolimujący (poz 4.) i szczelina wyjściowa (poz. 5), za którą umieszczany jest detektor promieniowania.



Rys. 5. Schemat budowy monochromatora.

Światło polichromatyczne, które dostaje się przez szczelinę wejściową jest przetwarzane na wiązkę równoległą i przepuszczone przez pryzmat. Elementy układu są tak dobrane, że gdyby pryzmat nie rozszczepiał, to na szczelinie wyjściowej powstałby ostry obraz szczeliny wejściowej. Tak się dzieje dla każdej długości fali monochromatycznej, jednak obraz każdej barwy powstaje w innym miejscu. Obrót pryzmatu powoduje, że monochromatyczne obrazy szczeliny wejściowej przesuwają się po szczelinie wyjściowej. Odpowiednie odczekanie bębna, na którym zamontowany jest pryzmat pozwala określić jaką długość fali w danym położeniu pryzmatu pada na szczelinę wyjściową.

Istnieje wiele różnych konstrukcji monochromatorów. Największą popularność zyskały urządzenia, których budowa pozwala na wysoką uniwersalność przyrządu np. dzięki wymienności pryzmatów a także monochromatory z podwójną monochromatyzacją. Te ostatnie cechują się tym, że wiązka światła dwukrotnie przechodzi przez pryzmat dzięki czemu jest dużo mocniej rozszczepiona niż po jednokrotnym przejściu przez pryzmat.

2. Cel i opis ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie Studentów z charakterystycznymi cechami rozkładów widmowych światła emitowanego ze źródeł światła różnych typów i porównanie ich między sobą. Podczas realizacji ćwiczenia powinny zostać zmierzone rozkłady widmowe promieniowania wybranej żarówki, źródeł wyładowczych (np. lampy sodowa, metalohalogenkowa) oraz przykładowej diody elektroluminescencyjnej.

Ćwiczenie polega na wykonaniu pomiarów rozkładów widmowych promieniowania emitowanego przez kilka różnych źródeł światła przy użyciu spektrofotometru i przeanalizowaniu uzyskanych rozkładów i wartości parametrów jakościowych światła. Układ pomiarowy składa się z badanego źródła światła wraz z układem jego zasilania i spektrofotometru.

Wykonanie pomiarów

Przed głowicą spektrofotometru umieszcza się kolejne źródła badane, zasila, jeśli zachodzi taka potrzeba stabilizuje strumień świetlny, a następnie mierzy rozkład widmowy promieniowania. Z programu komputerowego zbierającego dane pomiarowe należy pobrać i zapisać rozkłady widmowe oraz parametry jakościowe takiej jak temperatura barwowa i wskaźnik oddawania barw.

3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy zamieścić tabele z obliczonymi rozkładami widmowymi energii promienistej badanych źródeł światła oraz wykres porównawczy rozkładów widmowych promieniowania. Poszczególne wykresy należy tak przeskalować, by pole powierzchni pod każdym z wykresów $\Phi(\lambda)$ było jednakowe. Przeskalowanie takie pozwala na porównanie rozkładów promieniowania o jednakowym strumieniu energetycznym. Należy porównać parametry jakościowe poszczególnych źródeł światła.

UWAGA:

Wstępu teoretycznego do sprawozdania nie należy przygotowywać na podstawie informacji zawartych w tej instrukcji laboratoryjnej.

4. Pytania weryfikacyjne

Jakie są rodzaje zjawisk generacji promieniowania elektromagnetycznego i czym różni się światło emitowane w wyniku różnych zjawisk fizycznych?

Wyróżniamy dwa sposoby generowania światła: inkandescencję czyli emisję temperaturową i luminescencję czyli emisję wynikającą z kwantowej natury atomów, z których zbudowany jest obiekt świecący. W emisji temperaturowej rozkład widmowy promieniowania ma charakter ciągły i jest opisany wzorem Plancka. Rozkład jest taki sam dla wszystkich obiektów o tej samej temperaturze z dokładnością do charakterystyki rozkładu widmowego współczynnika odbicia na powierzchni materiału. W luminescencji rozkład widmowy jest nieciągły a występujące długości fal odpowiadają różnicom dopuszczalnych poziomów energetycznych poszczególnych atomów i cząsteczek ośrodka świecącego.

Co to jest rozkład widmowy promieniowania?

Rozkład widmowy promieniowania jest to funkcja gęstości mocy promienistej od długości fali promieniowania. Przedstawia zależność mocy promieniowania niesionej w pewnym, małym, stałym przedziale częstotliwości lub długości fali od tejże częstotliwości lub długości fali.

Dlaczego światło na granicy ośrodków jest rozszczepiane?

Współczynnik załamania fali elektromagnetycznej, charakterystyczny dla każdego materiału przezroczystego, jest zależny od długości fali. Jest on zależny od właściwości materiału, jego budowy cząsteczkowej i atomowej. Jego wartość jest równa $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, gdzie ϵ_r jest przenikalnością dielektryczną materiału, μ_r jest przenikalnością magnetyczną materiału. Obie te przenikalności są zależne od długości fali elektromagnetycznej. Jeżeli światło pada pod pewnym kątem na powierzchnię graniczną każda długość fali przemieszcza się z inną prędkością. Zmiana prędkości światła powoduje zmianę kierunku propagacji fali wewnątrz materiału, czyli załamanie. Skoro każda fala będzie propagowała z inną prędkością to w efekcie każda z nich będzie miała inny kierunek co jest obserwowane jako rozszczepienie.

Jaki jest mechanizm rozszczepienia światła na siatce dyfrakcyjnej?

Podstawą działania siatki dyfrakcyjnej jest interferencja fal pochodzących z sąsiadujących ze sobą pól siatki. Każde pole siatki jest wtórnym źródłem fali kolistej. Za siatką powstaje wtórna fala o tej samej częstotliwości (długości) i określonej zmianie fazy. Gdy na siatkę padnie

czoło płaskiej (quasiplaskiej) fali, fale wtórne interferują. W kierunkach, w których zachodzi zgodność faz fal pochodzących z sąsiednich pól następuje wzmocnienie, a w kierunkach, w których zachodzi przeciwieństwo faz, następuje osłabienie fali. W efekcie pojawiają się kierunki, w których fala propaguje przedzielone obszarami, w których nie propaguje. To zjawisko nazywa się dyfrakcją. Kierunki propagacji fal zależą od modułu (szerokości pól), różnicy faz między sąsiednimi polami i długości fali padającej. W efekcie fale o różnych długościach propagują, poza widmem zerowego rzędu w różnych kierunkach.

Po co rozszczepiamy światło?

Światło rozszczepiamy by z wiązki światła polichromatycznego, p. białego wydobyć i zmierzyć energię niesioną w bardzo wąskim zakresie długości fal. Jest to potrzebne do wyznaczenia rozkładu widmowego badanego promieniowania. Znajomość rozkładu widmowego pozwala obliczyć parametry jakościowe światła takie jak temperatura barwowa i wskaźnik oddawania barw a także ocenić jak dane promieniowanie będzie oddziaływało z różnymi powierzchniami barwnymi, czy to odbijającymi, czy przepuszczającymi.

Dlaczego na szczelinie wejściowej monochromatora wymagane jest powstanie ostrego obrazu źródła światła w skali 1:1?

Uzyskanie ostrego obrazu źródła światła na szczelinie wejściowej pozwala na maksymalizację strumienia świetlnego wykorzystywanego do pomiaru rozkładu widmowego. W przypadku rozszczepienia wiązki i wykonywaniu pomiarów na bardzo wąskich, quasimonochromatycznych wycinkach widma uzyskiwane są bardzo małe moce promieniste w poszczególnych odczytach. Im dokładniej chcemy zmierzyć rozkład, na tym węższe pasma dzielimy pełne widmo i w efekcie otrzymujemy mniejsze sygnały. Sygnał musi być wystarczająco silny by nie zakłócały go szумы. Uzyskanie obrazu pomniejszonego lub powiększonego powoduje, że do układu pomiarowego wewnątrz monochromatora dociera mniejsza moc promienista. W przypadku obrazu powiększonego dodatkowo ograniczony zostaje obszar źródła światła, z którego pobierany jest strumień wchodzący do układu pomiarowego, zatem zmierzony rozkład widmowy nie będzie odpowiadał całemu źródłu a jedynie fragmentowi jego powierzchni.

5. Literatura

- [1] Żagan W.: Podstawy techniki światłnej, OWPW, Warszawa, 2014, ISBN 978-83-7814-238-6
- [2] Mielicki J.: Zarys wiadomości o barwie, FRPK 1997, ISBN 83-908049-0-5
- [3] Oleszyński T.: Miernictwo Techniki Światłnej, PWN, Warszawa 1957
- [4] Felhorski W., Stanioch W.: Kolorymetria trójchromatyczna, WNT, Warszawa, 1973
- [5] Czyżewski D., Zalewski S.: Laboratorium fotometrii i kolorymetrii, OWPW, Warszawa, 2007, ISBN 978-83-7207-648-9