

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 7

Badanie właściwości optycznych półprzewodnikowych źródeł światła

Lublin 2025 r.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości optycznych i elektrycznych półprzewodników, wyznaczenie szerokości pasma wzbronionego w badanych półprzewodnikach oraz przeprowadzenie badań zjawiska elektroluminescencji w złączach p - n. Ponadto zdobycie praktycznych umiejętności w obsłudze spektrofotometru i dedykowanego oprogramowania.

Zakres ćwiczenia

Pierwszym etapem ćwiczenia jest przeprowadzenie pomiarów widmowych dwóch wybranych materiałów półprzewodnikowych: arsenku galu (GaAs) oraz tellurku kadmu (CdTe). Po dokonaniu odczytu widma falowego dla obu próbek, uzyskane dane należy wyeksportować do plików w odpowiednim formacie. Eksportowane dane zostaną następnie wykorzystane do sporządzenia wykresów przedstawiających zależność współczynnika transmisji światła od długości fali. Na podstawie tych wykresów możliwe będzie obliczenie energii pasma wzbronionego badanych półprzewodników, co stanowi istotny parametr opisujący ich właściwości fizyczne i optyczne.

W drugiej części ćwiczenia zostaną przeprowadzone analogiczne pomiary dla diod elektroluminescencyjnych (LED) emitujących światło o różnych barwach. Proces ten obejmuje odczytanie widma falowego każdej diody oraz analizę danych w celu wyznaczenia energii emitowanego światła. Wnioski z analizy pozwolą na lepsze zrozumienie zależności pomiędzy długością fali emitowanego światła a energią fotonów.

Stanowisko pomiarowe

W niniejszym ćwiczeniu laboratoryjnym zastosowano specjalistyczne stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko to zostało starannie zaprojektowane w celu precyzyjnego pomiaru widma światła w kontrolowanych warunkach. Kluczowym elementem stanowiska jest szczelna komora pomiarowa, której wewnątrz zostało pomalowane na kolor czarny (rysunek 2). Zabieg ten ma na celu minimalizację efektów rozpraszania światła oraz wyeliminowanie

niepożądanych odbić, które mogłyby wpłynąć na dokładność pomiarów.

Wewnątrz komory umieszczono źródło światła w postaci halogenowej żarówki o maksymalnej mocy $P_{\max} = 10 \text{ W}$ (1) zasilana napięciem stałym 12 V. Konstrukcja oprawy żarówki umożliwia jej szybką i wygodną wymianę w razie potrzeby. Emitowane przez żarówkę światło jest kierowane do spektrofotometru USB 2000, produkowanego przez firmę Ocean Optics (3). Spektrofotometr ten jest podłączony do światłowodu, który doprowadza padające światło do urządzenia w celu analizy widma. Wyniki pomiarów są przekazywane za pośrednictwem kabla USB (2) do komputera wyposażonego w dedykowane oprogramowanie producenta, które umożliwia wizualizację widma w czasie rzeczywistym.

Istotnym elementem stanowiska jest prowadnica trójpołożeniowa (4), umieszczona pomiędzy źródłem światła, a światłowodem (5). Prowadnica umożliwia badanie właściwości optycznych zamontowanych na niej próbek materiałów półprzewodnikowych. Na prowadnicy umieszczono próbki tellurku kadmu (CdTe) o średnicy 7mm i grubości 2mm oraz arsenek galu (GaAs) o średnicy 20mm i grubości 1,5mm. W zależności od ustawienia prowadnicy, światło generowane przez żarówkę halogenową może padać bezpośrednio na sondę spektrofotometru lub przechodzić przez jedną z próbek, co skutkuje modyfikacją widma transmitowanego światła w wyniku właściwości optycznych badanych materiałów.

Dodatkowo, wewnątrz komory pomiarowej zainstalowano dziewięć diod elektroluminescencyjnych (LED) o różnych barwach światła (6):

- Zielona (L-53GC),
- Żółta (HB5-434FY-B),
- Czerwona (HB5-435AOR-C),
- Czerwona (HB5-436ARA-C),
- Niebieska (OSUB56A1A-IJ),
- Żółto - zielona (HB5-433CG),
- Biała (LED5W-LC),
- Nadajnik podczerwieni (L-53F3C),
- Nadajnik podczerwieni (L-53SF4C).

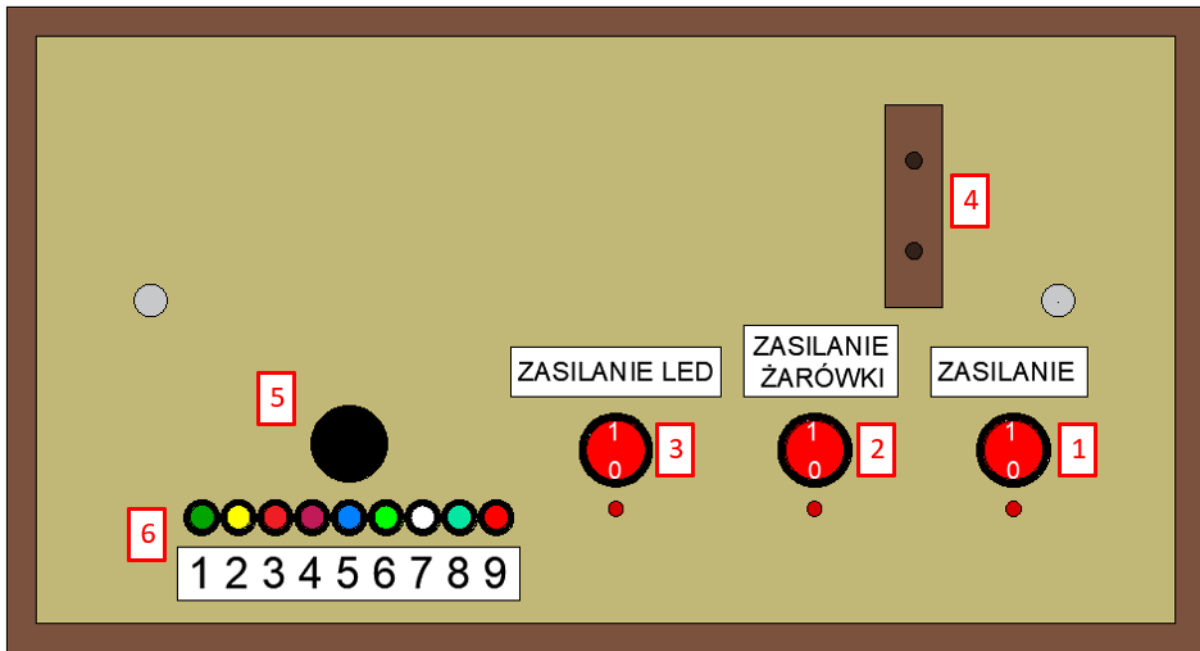
Przełącznik obrotowy (5) umieszczony na płycie czołowej stanowiska pozwala na selektywne załączanie poszczególnych diod, podczas gdy zastosowanie przekaźnika

3



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

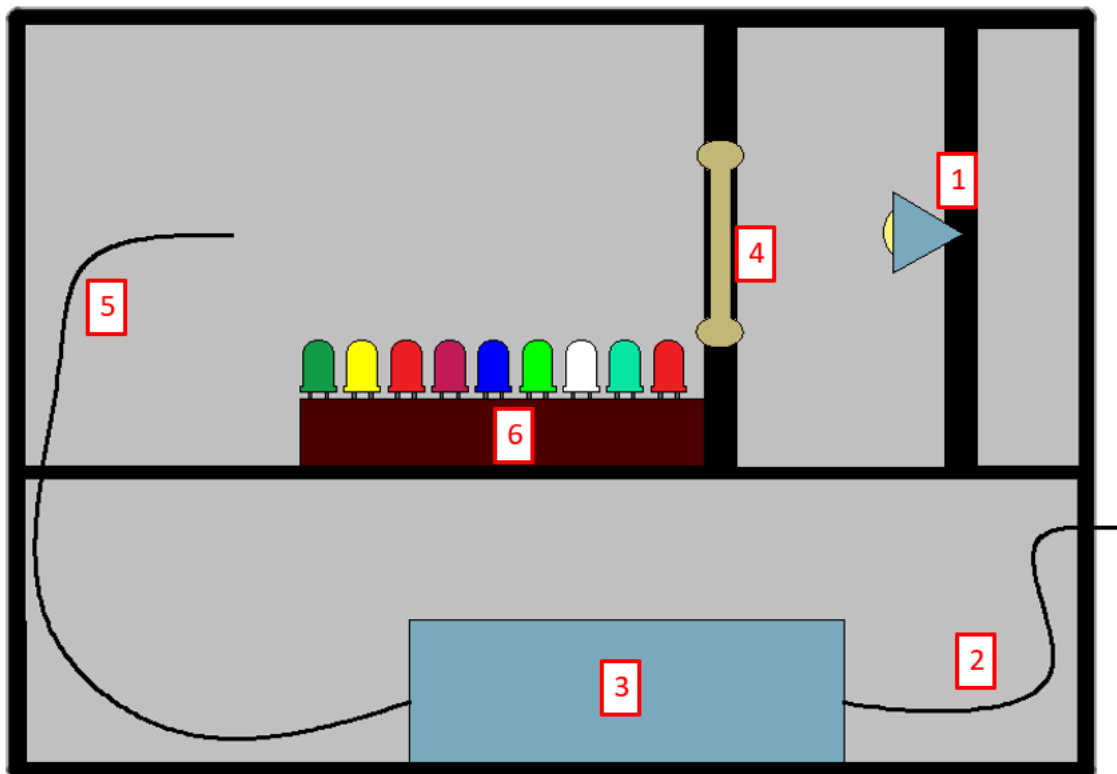
JZC-4123-12VDC umożliwia jednoczesne włączenie wszystkich diod. Widmo światła emitowanego przez diody LED jest rejestrowane za pomocą tego samego spektrofotometru USB 2000 firmy Ocean Optics. Całość układu zasilana jest napięciem stałym o wartości 12 V, dostarczonym przez zasilacz. Konstrukcja stanowiska oraz zastosowane komponenty zapewniają wysoki poziom precyzji pomiarowej i pozwalają na kompleksową analizę optycznych właściwości badanych materiałów i źródeł światła.



Rysunek 1. Schemat płyty czołowej stanowiska do precyzyjnego badania transmisji światła w półprzewodnikach

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – włącznik główny,
- 2 – włącznik żarówki,
- 3 – włącznik diod LED,
- 4 – trójpołożeniowa prowadnica,
- 5 – pokrętło obrotowe do załączania diod,
- 6 – sygnalizacja zasilania diod LED.



Rysunek 2. Przekrój pionowy stanowiska pomiarowego do badania transmisji światła w półprzewodnikach

Oznaczenia do rysunku 2:

- 1 – żarówka halogenowa,
- 2 – przewód USB transmisji danych,
- 3 – spektrofotometr USB 2000 firmy Ocean Optics,
- 4 – trójpołożeniowa prowadnica,
- 5 – światłowód,
- 6 – listwa zawierająca 9 diod o różnym widmie światła.

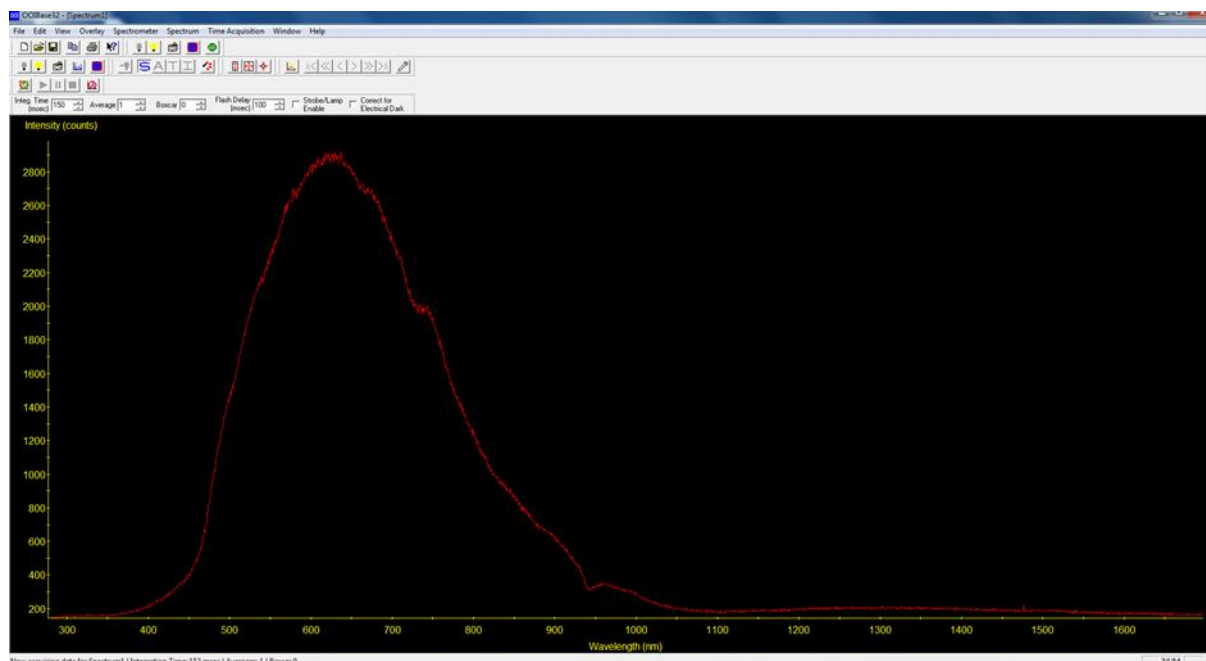
Wykaz urządzeń i aparatury

- Stanowisko do badania transmisji światła w półprzewodnikach
- Spektrofotometr USB 2000 firmy Ocean Optics
- Komputer

Wykonanie ćwiczenia

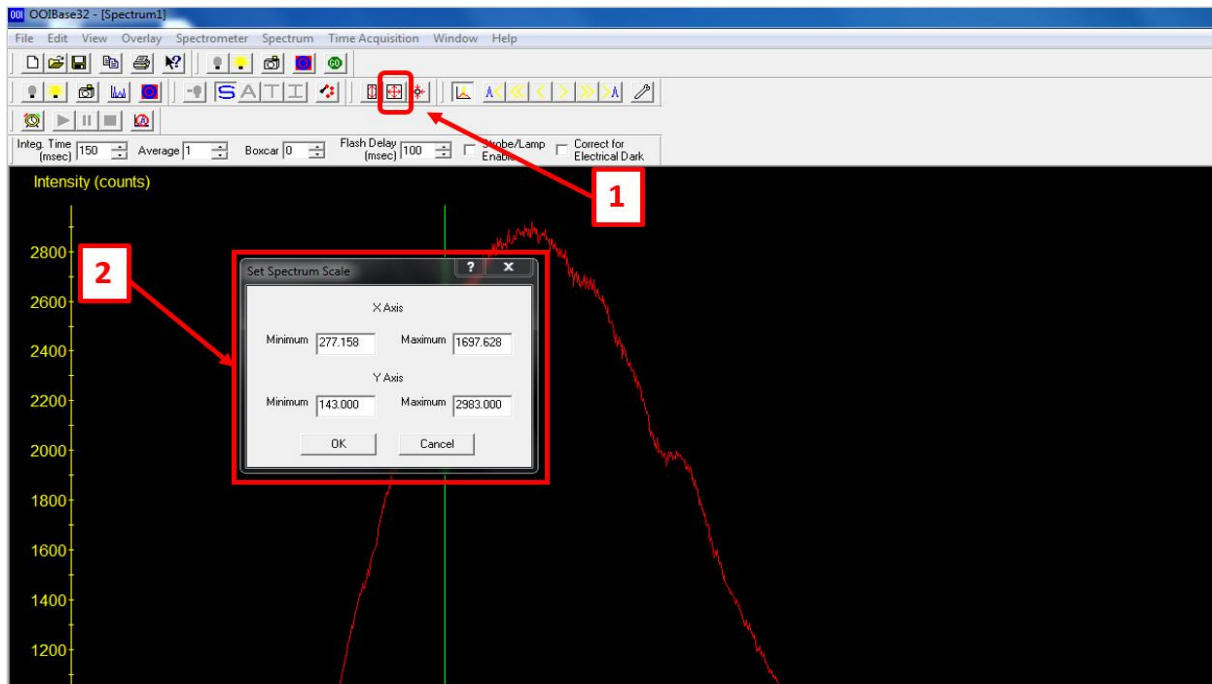
Obsługa oprogramowania OOIBase32

Dedykowane oprogramowanie OOIBase32 firmy Ocean Optics zostało zaprojektowane w celu kompleksowej obsługi spektrofotometru będącego integralną częścią stanowiska laboratoryjnego. Program umożliwia zarówno podgląd w czasie rzeczywistym zarejestrowanego widma promieniowania, jak i zapis wyników pomiarów w dedykowanym formacie pliku. Widmo promieniowania jest automatycznie generowane i wyświetlane bezpośrednio po uruchomieniu aplikacji, co ułatwia natychmiastową analizę danych. Okno programu wraz z widmem zostało przedstawione na rysunku 3.



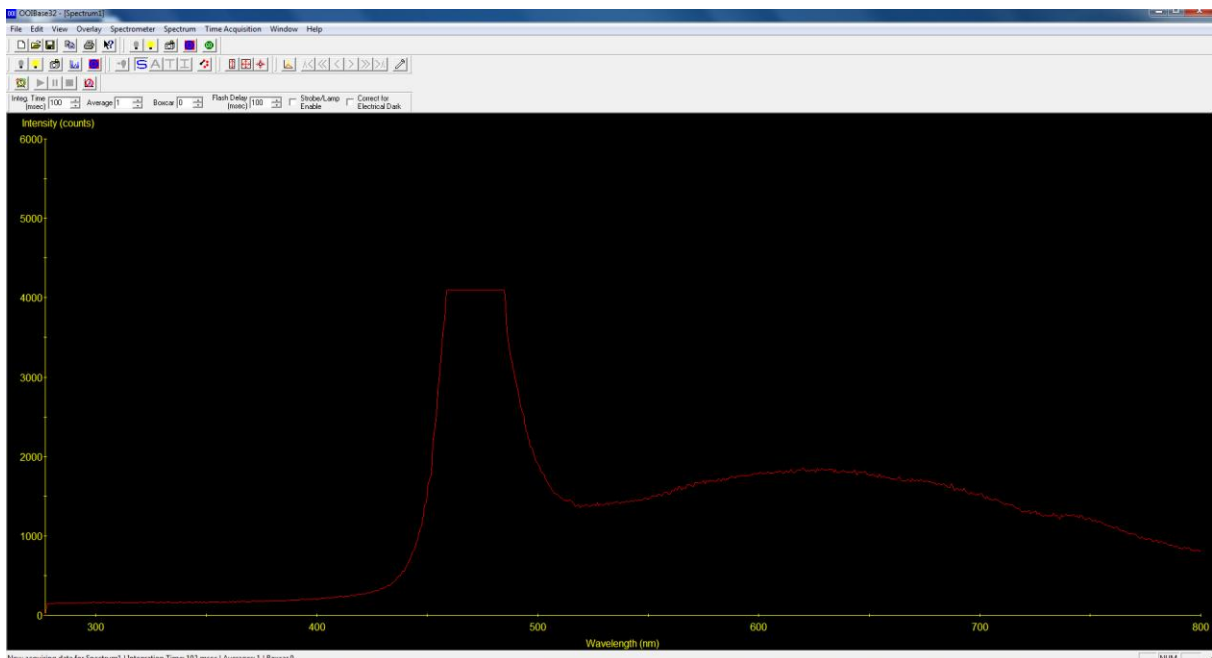
Rysunek 3. Interfejs programu OOIBase32 z wyświetlonym przykładowym widmem światła.

W niektórych sytuacjach program wyświetla wykres widma w sposób ograniczony lub mało czytelny. Jeśli wyświetlany zakres wartości jest nieodpowiedni, wówczas należy dostosować skalę wykresu. Aby to zrobić, należy wybrać ikonę zaznaczoną numerem 1 na rysunku 4. Następnie wyświetla się okno (2) w którym należy ręcznie wybrać interesujący zakres osi X i Y oraz zatwierdzić.



Rysunek 4. Edycja zakresu wyświetlanego wykresu.

W przypadku gdy po zwiększeniu zakresu osi Y wartości prezentują się tak jak na rysunku 5 tzn. widać ewidentnie, że jest to ograniczone od góry mimo zmiany skali, oznacza to, że intensywność promieniowania wykracza poza zakres pomiarowy spektrofotometru.

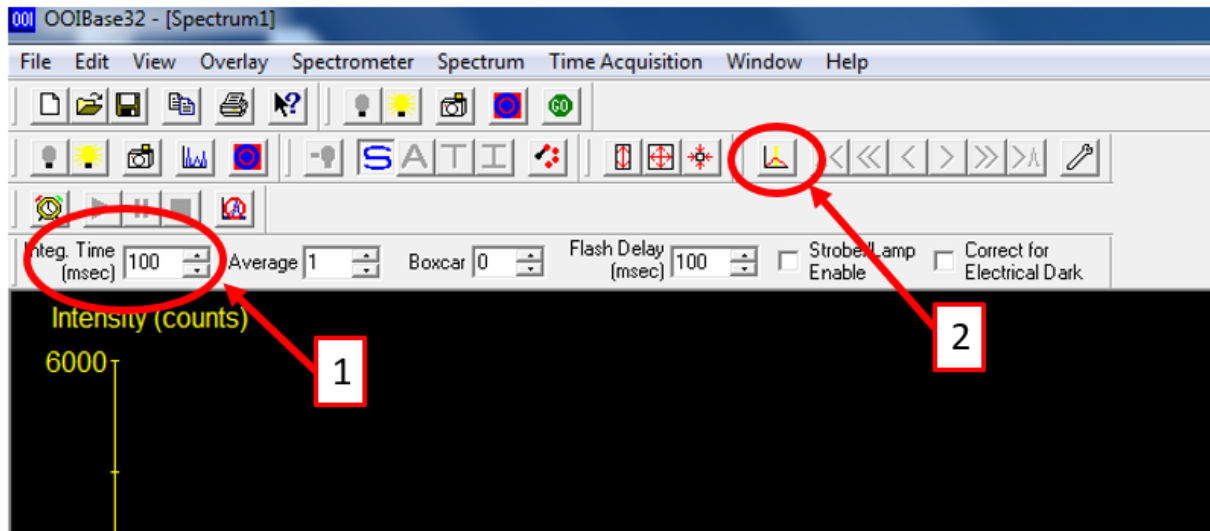


Rysunek 5. Interfejs programu OOIBase32 z wyświetlonym przykładowym widmem wskazującym przesycenie detektora.

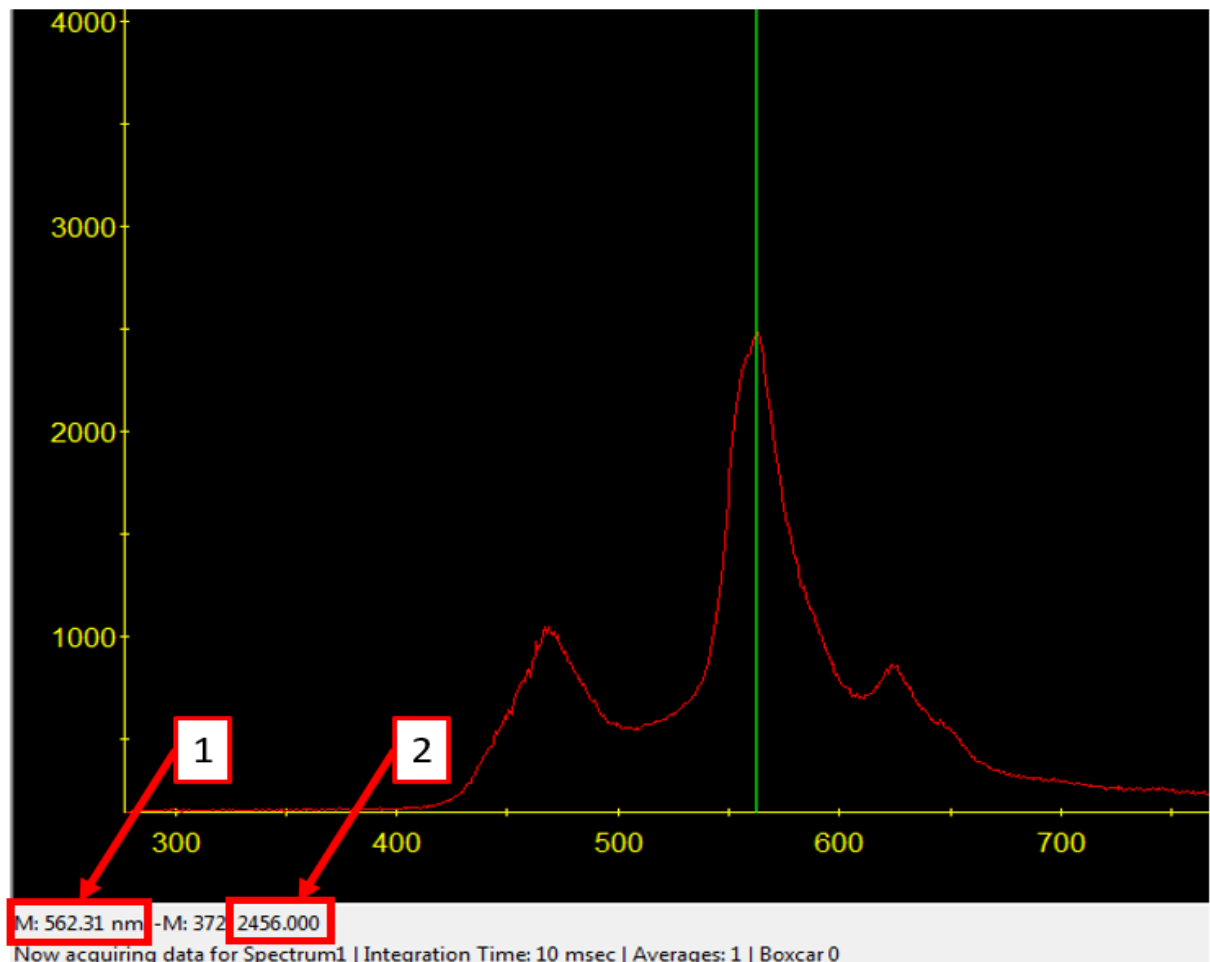
W takim przypadku należy zmienić czas próbkowania. Czas próbkowania spektrofotometru to okres, w którym urządzenie wykonuje pomiar natężenia światła. Jest to istotny parametr wpływający na dokładność i precyzję uzyskanych wyników. Jeśli natężenie światła wykracza poza zakres pomiarowy spektrofotometru (detektor jest "przesycony"), należy skrócić czas próbkowania. Skrócenie czasu zapobiegnie nasyceniu detektora i pozwoli na poprawne zarejestrowanie sygnału, który inaczej byłby poza skalą. Aby zwiększyć dokładność pomiarów należy czas próbkowania dobierać dłuższy co pozwala detektorowi zebrać więcej informacji o natężeniu światła. Uśrednia to szумы i fluktuacje sygnału, co prowadzi do bardziej precyzyjnych i stabilnych wyników, lecz należy pamiętać, że jeśli natężenie światła jest zbyt wysokie, długi czas próbkowania może przesycić detektor. Standardowa wartość czasu próbkowania wynosi 100 ms którą należy zmieniać tylko w przypadku pomiarów wykraczających poza skalę spektrofotometru. Aby zmienić czas próbkowania należy zmienić wartość *Integration Time* oznaczoną numerem 1 na rysunku 6.

Program ponadto umożliwia export odczytanych ze spektrofotometru danych w postaci widma do pliku. Aby to zrobić należy w zakładkach w lewym górnym rogu wybrać file/save/sample. Należy pamiętać, aby wybrać rozszerzenie *.sample. To rozszerzenie umożliwi odczyt zapisanych danych w arkuszu kalkulacyjnym takim jak np. Microsoft Excel.

Na rysunku 6 punktem numer 2 oznaczono włączanie oraz wyłączenie wskaźnika przesuwanego. Po włączeniu tej funkcji, na ekranie pojawia się pionowa zielona linia. Jest ona przydatna, ponieważ umożliwia odczytanie wartości natężenia światła dla wybranej długości fali. Aby odczytać te dane, wystarczy wybrać kursorem miejsce wstawienia wskaźnika, a informacje wyświetlają się w lewym dolnym rogu. Na rysunku 7 punktem numer 1 oznaczono wartość długości fali zaś numerem 2 wartość intensywności światła.



Rysunek 6. Interfejs programu OOI Base32: 1 - zmiana czasu próbkowania, 2 - wskaźnik przesuwany, pozwalający na dokładny odczyt długości fali oraz jej współczynnika intensywności.



Rysunek 7. 1 – długość fali wskaźnika przesuwanego, 2 – wartość intensywności światła

Badanie właściwości optycznych półprzewodnikowych źródeł światła

W celu wyznaczenia szerokości przerwy energetycznej na podstawie widma falowego półprzewodników arsenek galu (GaAs), tellurek kadmu (CdTe) należy:

- Włączyć komputer, do którego przewodem podłączony jest spektrofotometr USB 2000, produkowanego przez firmę Ocean Optics,
- Przełącznik „ZASILANIE” (1) ustawić w pozycji 1, co skutkuje włączeniem spektrofotometru,
- Przełącznik „ZASILANIE ŻARÓWKI” (2) ustawić w pozycji 1,
- Upewnić się, że przełącznik „ZASILANIE LED” (3) jest ustawiony w pozycji 0,
- Wsunąć prowadnicę trójpołożeniową (4) maksymalnie do środka, widmo światła żarówki pokaże się automatycznie na ekranie monitora,
- Jeżeli istnieje taka konieczność należy dostosować skalę wykresu widma,
- Jeżeli wykres wychodzi poza zakres spektrofotometru, należy go dopasować za pomocą modyfikacji wartości próbkowania,
- Odczytane dane należy wyeksportować w postaci pliku na dysk. Aby to zrobić należy przejść do zakładki i wybrać file/save/sample. Należy pamiętać, aby plik zapisać z rozszerzeniem *.sample. Zapisany plik będzie zawierał widmo żarówki halogenowej co należy uwzględnić w nazwie pliku,
- Wysunąć prowadnicę (4) do momentu zatrzaśnięcia w pozycji środkowej. W tej pozycji światło żarówki halogenowej przechodzi przez próbkę arsenku galu. Należy przeanalizować wyświetlane na ekranie widmo światła zmieniając skalę wykresu widma, a następnie wyeksportować w sposób analogiczny do punktu poprzedniego,
- Wysunąć prowadnicę (4) maksymalnie i powtórzyć czynność dla próbki z tellurku kadmu analogicznie do poprzedniego punktu.
- Wyeksportowane pliki zależności intensywności światła od długości fali należy zapisać na nośniku pamięci, ponieważ będą niezbędne do obliczeń szerokości przerwy energetycznej.
- Po zakończeniu pomiarów należy wsunąć prowadnicę trójpołożeniową (4) maksymalnie do środka oraz przełącznik „ZASILANIE ŻARÓWKI” (2) ustawić w pozycji 0.

W celu wyznaczenia energii emitowanej przez diody LED na podstawie widma falowego należy:

- Przełącznik „ZASILANIE” (1) ustawić w pozycji 1, co skutkuje włączeniem spektrofotometru,
- Przełącznik „ZASILANIE LED” (3) ustawić w pozycji 1,
- Upewnić się, że przełącznik „ZASILANIE ŻARÓWKI” (2) jest ustawiony w pozycji 0,
- Kolejne diody można włączać za pomocą pokrętła obrotowego (5), a ich aktywność wewnątrz obudowy jest wskazywana przez zapalenie odpowiednich diod na obudowie (6). Dwie ostatnie diody po prawej stronie, zielona i migająca czerwona, sygnalizują działanie nadajników podczerwieni. Widmo promieniowania każdej z diod wyświetlane jest automatycznie na ekranie monitora,
- Jeżeli istnieje taka konieczność należy dostosować skalę wykresu widma,
- Jeżeli wykres wychodzi poza zakres spektrofotometru należy go dopasować za pomocą modyfikacji wartości próbkowania,
- Odczytane dane każdej z diod należy wyeksportować w postaci pliku na dysk. Aby to zrobić należy przejść do zakładki i wybrać file/save/sample. Należy pamiętać, aby plik zapisać z rozszerzeniem *.sample. Rodzaj diody należy uwzględnić w nazwie pliku,
- Po zakończeniu pomiaru należy przełącznik „ZASILANIE LED” (3) oraz „ZASILANIE” (1), ustawić w pozycji 0,
- Wyeksportowane pliki zależności intensywności światła w zależności od długości fali dla każdej z diod należy zapisać na nośniku pamięci, ponieważ będą niezbędne do obliczeń energii emitowanej przez diody LED.

Opracowanie wyników

Wyznaczenie szerokości przerwy energetycznej na podstawie widma falowego

W celu wyznaczenia szerokości przerwy energetycznej na podstawie widma falowego półprzewodników, arsenku galu (GaAs) oraz tellurku kadmu (CdTe), należy przeanalizować zapisane wyniki uzyskane w pierwszej części ćwiczenia. Analiza powinna obejmować zależność współczynnika transmisji światła od długości fali.

11

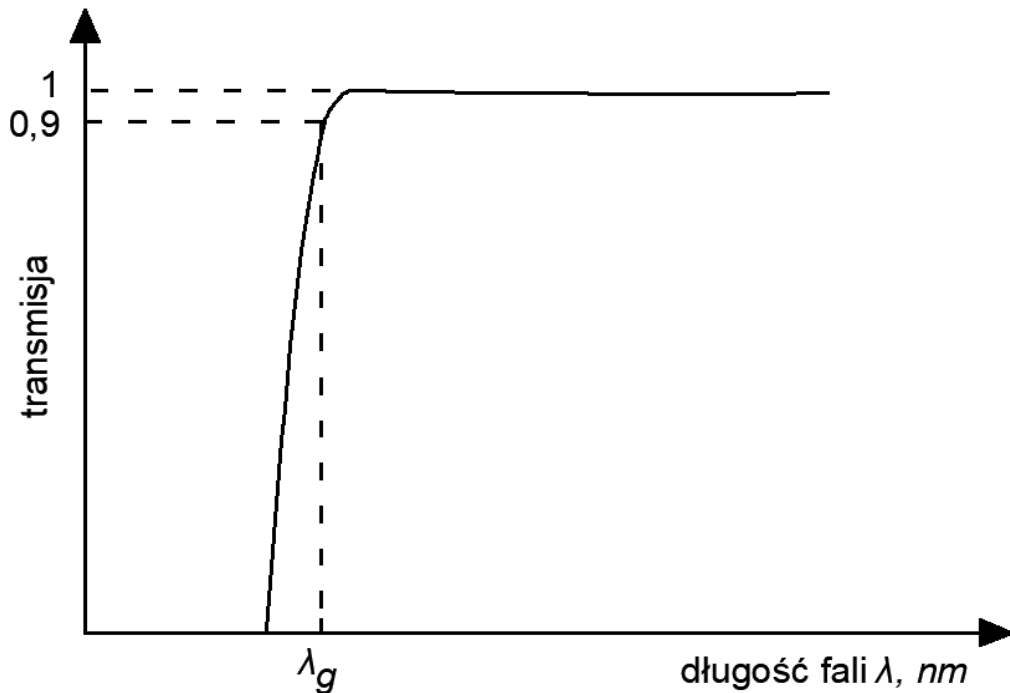


This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

Kluczowym etapem jest zidentyfikowanie maksymalnej wartości współczynnika transmisji w badanym zakresie widma. Na podstawie tej wartości należy następnie wyznaczyć wartość równą 90% tej maksymalnej wartości ($0,9 T_{max}$), a następnie odczytać graniczną długość fali λ_g . Wyznaczoną w ten sposób wartość λ_g należy podstawić do wzoru określającego szerokość pasma wzbronionego:

$$\Delta E_G = \frac{c \cdot h}{\lambda_g}$$

gdzie: ΔE_G - energia pasma wzbronionego badanej próbki, c - prędkość światła, $c = 299\,792\,458$ m/s, h - stała Plancka, $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV·s, λ_g – wyznaczona graniczna długość fali odpowiadająca wartości 0,9 maksymalnego współczynnika transmisji (wartość ta została przedstawiona na rysunku 8). Zmierzone wartości granicznej długości fali oraz szerokość przerwy energetycznej należy zamieścić w tabeli 1.



Rysunek 8. Krzywa teoretyczna widma transmisji

Tabela 1. Wyniki obliczeń granicznej długości fali oraz energii pasma wzbronionego

Badana próbka	λ_g	ΔE_G
	nm	eV
Źródło światła (żarówka halogenowa)		
Arsenek Galu		
Tellurek kadmu		

Po wyznaczeniu granicznej długość fali λ_g i obliczenia szerokości pasma wzbronionego, za pomocą wyeksportowanych danych należy wykonać trzy wykresy zawierające widmo źródła światła w przypadku żarówki halogenowej oraz widma transmisji światła dla próbek GaAs i CdTe w funkcji długości fali.

Wyznaczenie energii emitowanej przez diody LED na podstawie widma falowego

Aby wyznaczyć energię emitowaną przez diody LED na podstawie widma falowego należy wykorzystać zapisane wyniki w celu sporządzenia wykresów zależności współczynnika transmisji światła w funkcji długości fali. Na podstawie opracowanych wykresów należy określić wartość energii emitowanej przez diody LED. W tym celu należy zidentyfikować maksymalny współczynnik transmisji, a następnie odczytać odpowiadającą mu długość fali λ . Uzyskaną wartość długości fali należy wprowadzić do wzoru opisującego energię emitowaną przez diodę:

$$E = \frac{c \cdot h}{\lambda}$$

gdzie: E - energia emitowana przez diodę, c - prędkość światła, $c = 299\,792\,458$ m/s, h - stała Plancka, $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV·s, λ - długość fali odpowiadająca maksymalnej wartości współczynnika transmisji, λ [nm] = $\lambda \cdot 10^{-9}$ [m].

Wyniki obliczeń dla każdej z diod należy zanotować w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń granicznej długości fali oraz energii pasma wzbronionego

Badana dioda	λ , nm	E , eV
1. L-53GC (zielona)		
2. HB5-434FY-B (żółta)		
3. HB5-435AOR-C (czerwona)		
4. I IB5-436ARA-C (czerwona)		
5. OSUB56A1A-IJ (niebieska)		
6. HB5-433CG (żółto-zielona)		
7. L-53F3C (nadajnik podczerwieni)		
8. L-53SF4C (nadajnik podczerwieni)		
9. LED5W-LC (biała) - szerokość widma		

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- stronę tytułową,
- wykresy zależności współczynnika transmisji w funkcji długości fali, opracowane na podstawie zarejestrowanych danych,
- wykres zawierający widmo źródła światła oraz widma transmisji światła w funkcji długości fali dla próbek GaAs i CdTe,
- obliczenia szerokości pasma wzbronionego badanych próbek oraz energii emitowanej przez diody,
- wykresy zawierające widma diod LED,
- uwagi i wnioski z przeprowadzonych pomiarów.