
IM - 25 – Od diody LED do lasera półprzewodnikowego

Materiały przeznaczone dla studentów kierunku
Zaawansowane Materiały i Nanotechnologia
realizowanego w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego

1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie optycznych i prądowych własności półprzewodnikowych źródeł światła. W pierwszej części ćwiczenia mierzony będzie szereg parametrów, takich jak natężenie i rozkład spektralny światła emitowanego z kilku diod elektroluminescencyjnych (diod LED - Light Emitting Diode). W drugiej części ćwiczenia badane będą własności światła emitowanego przez laser diodowy. Celem jest zbadanie zależności długości fali i natężenia emitowanego światła w funkcji temperatury oraz natężenia prądu płynącego przez diodę laserową.

Słowa kluczowe: pasmowa teoria budowy ciał stałych (pasmo walencyjne, pasmo przewodnictwa, przerwa wzbroniona, elektrony, dziury, rekombinacja), półprzewodniki domieszkowane (domieszki donorowe, domieszki akceptorowe, nośniki większościowe), złącze n-p (prosta i skośna przerwa energetyczna), diody elektroluminescencyjne (diody LED), diody laserowe, laser homozłączowy i heterozłączowy, rezonator optyczny, dyfrakcja, akcja laserowa, przejścia wymuszone, mody lasera.

2 Aparatura i materiały

Do dyspozycji studentów oddano zestaw diod LED wraz z układem zasilania (0–10 V). **Proszę nie przekraczać 10 V napięcia zasilania diody LED, gdyż może to spowodować jej trwałe uszkodzenie.**

Studenci dysponują również laserem półprzewodnikowym pracującym w oparciu o diodę laserową QL63DSA firmy Roithner Laser-Technik. Parametry pracy diody kontrolowane są przy pomocy sterowników laserowych, z których pierwszy pozwala na regulację natężenia prądu płynącego przez złącze z dokładnością do 0,1 mA, drugi zaś kontroluje temperaturę pracy diody. **Temperatura pracy złącza nie powinna być mniejsza niż 15°C i większa niż 40°C. Bardzo ważne jest aby parametry pracy diody laserowej (natężenie prądu i temperatura) były tak dobrane, że moc wyjściowa emitowanego światła nie przekraczała 5 mW. Przekroczenie tej wartości mocy może spowodować uszkodzenie diody!!!**

Do dyspozycji studentów oddany jest również spektrometr wyposażony w detektor światła w postaci linijki CCD, który jest kontrolowany przy pomocy komputera. Układ ten pozwala na pomiar widma światła emitowanego z diody LED lub diody laserowej.

Dodatkowym elementem zestawu jest detektor światła.

3 Problemy do przestudiowania

- Teoria pasmowa budowy ciał stałych.
- Półprzewodniki i ich własności.
- Złącze n-p.
- Zasada działania diod elektroluminescencyjnych (LED).
- Lasery: inwersja obsadzeń, akcja laserowa, rezonator optyczny.
- Właściwości światła laserowego.
- Laser półprzewodnikowy.

Niniejsza instrukcja nie jest wystarczającym źródłem informacji dla pełnego zrozumienia i przeprowadzenia ćwiczenia. Zawiera ona tylko podstawowe informacje dotyczące tematyki ćwiczenia.

4 Zasady BHP

Proszę **bezwzględnie** zastosować się do następujących zasad bezpieczeństwa:

- Przed rozpoczęciem pracy proszę zdjąć z rąk rzeczy, które mogą spowodować przypadkowe odbicia wiązki światła (pierścionki, obrączki, zegarki, itp.).
- Pod żadnym pozorem nie wolno kierować wiązki światła bezpośrednio do oka.
- Nie wolno dotykać elementów optycznych palcami, gdyż może to doprowadzić do ich uszkodzenia.

5 Podstawy teoretyczne

5.1 Półprzewodniki i złącze n-p

W myśl pasmowej teorii budowy materii, ciała stałe dzielą się na trzy grupy: *przewodniki*, *półprzewodniki* i *izolatory*. Kryterium klasyfikacji jest *szerokość przerwy energetycznej* E_{wzb} pomiędzy *pasmem walencyjnym* i *pasmem przewodnictwa*, która, dla półprzewodników, porównywalna jest z energią termicznego ruchu elektronów ($E_{wzb} \approx kT$, gdzie k jest stałą Boltzmana, zaś T temperaturą). Szerokość przerwy wzbronionej w półprzewodnikach waha się od ok. 1 eV (german) do 6 eV (azotek glinu).

W półprzewodnikach w temperaturze 0 K całkowicie obsadzone jest pasmo walencyjne. Z tego powodu półprzewodniki w tej temperaturze są idealnymi izolatorami. Wraz ze wzrostem temperatury dochodzi do przeniesienia elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, co w konsekwencji prowadzi do powstania dwóch typów nośników: *elektronów* (e^-) w paśmie przewodnictwa i *dziur* (e^+) w paśmie walencyjnym. Im wyższa temperatura T tym więcej jest nośników w obu pasmach, a co za tym idzie tym większe jest przewodnictwo ($R_p \sim 1/T$, gdzie R_p jest rezystancją półprzewodnika).

Ważnym zjawiskiem fizycznym zachodzącym w półprzewodnikach jest tzw. *rekombinacja*. Zjawisko to polega na wychwycie elektronów przez jony sieci krystalicznej i wykorzystaniu ich do tworzenia wiązań chemicznych. W myśl teorii pasmowej rekombinacja to łączenie się ze sobą elektronu z pasma przewodnictwa i dziury z pasma walencyjnego, czego skutkiem jest przejście tego pierwszego do pasma walencyjnego. Uzyskana w ten sposób energia wypromieniowywana jest w postaci kwantu energii, która jest w przybliżeniu równa jest szerokości przerwy wzbronionej. Z uwagi na określoną szerokość przerwy wzbronionej, w półprzewodnikach rekombinacja powoduje emisję światła widzialnego lub światła podczerwonego.

Wprowadzenie do materiału, z którego wykonane są półprzewodniki, specjalnych domieszek tzw. *domieszek donorowych* lub *domieszek akceptorowych*, powoduje zmianę jego właściwości. W materiale pojawiają się dodatkowe nośniki tzw. *nośniki większościowe*, które są głównie odpowiedzialne za przewodnictwo. Dodanie do materiału półprzewodnikowego atomów donora (*półprzewodnik typu n*) sprawia, że w półprzewodniku zaczyna dominować przewodnictwo e^- , zaś dodanie atomów akceptora (*półprzewodnik typu p*) sprawia, że dominujące jest przewodnictwo e^+ . Wprowadzenie domieszek powoduje również zmianę struktury energetycznej półprzewodnika. Po wprowadzeniu donora *poziom Fermiego* przesuwa się w kierunku pasma przewodnictwa, podczas gdy w przypadku domieszek akceptorowych poziom ten przesuwa się w kierunku pasma podstawowego.

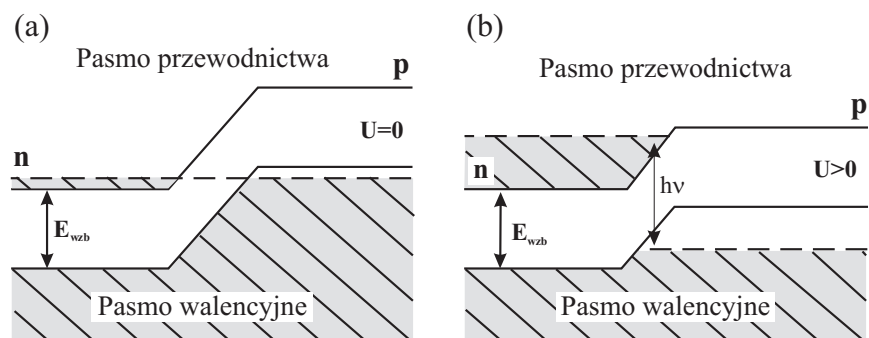
Łącząc ze sobą półprzewodnik domieszkowany donorowo i półprzewodnik domieszkowany akceptorowo w pewnym obszarze tzw. *obszarze złącza n-p* (patrz Rys. 1) dochodzi do dyfuzji nośników większościowych pomiędzy półprzewodnikami, a na ich granicy powstaje bariera potencjału. Prowadzi to do zmiany struktury energetycznej półprzewodnika. Spolaryzowanie złącza n-p w kierunku przewodnictwa powoduje generację w obszarze złącza dodatkowych nośników: elektronów w paśmie przewodnictwa i dziur w paśmie walencyjnym. Dzięki temu możliwa jest bardziej efektywna rekombinacja elektronów oraz dziur, a co za tym idzie wydajniej emitowane jest światło. Długość fali emitowanego światła jest określona przez różnicę energii pomiędzy pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa

$$E_{wzb} \approx h \frac{c}{n\lambda}, \quad (1)$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni, n współczynnikiem załamania ośrodka, zaś λ długością fali. Opisany proces schematycznie zilustrowany jest na Rys. 1.

Z zasady zachowania pędu wynika, że najbardziej prawdopodobna jest emisja fotonu, kiedy w procesie rekombinacji elektronu nie zmienia się jego pęd. Takie procesy zachodzą wtedy, gdy minimum energii pasma przewodnictwa i maksimum energii pasma walencyjnego przypadają dla tej samej wartości pędu. W takim przypadku mówi się o *prostej przerwie energetycznej*. Często zdarza się jednak, że maksimum pasma walencyjnego i minimum pasma przewodnictwa przypadają dla różnych wartości pędu. Taki przypadek nazywa się *skośną przerwą energetyczną*. W większości stosowanych obecnie półprzewodnikowych źródeł światła wykorzystywana jest prosta przerwa energetyczna.

Powszechnie stosowane są dwa typy źródeł światła wykorzystujące właściwości półprzewodników. Są nimi: *diody elektroluminescencyjne* zwane diodami LED (ang. light emitting diode) oraz *diody laserowe*. W Tablicy 1 zestawiono dla porównania właściwości obu typów diod półprzewodnikowych.



Rysunek 1: Struktura energetyczna złącza n-p bez (a) oraz z napięciem zewnętrznym (b). W obszarze złącza dochodzi do modyfikacji struktury energetycznej materiału. Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia powoduje generację nowych nośników w paśmie przewodnictwa i paśmie walencyjnym, a co za tym idzie zdecydowanie efektywniejszą rekombinację i emisję światła.

Właściwości	Diody LED	Diody laserowe
Szerokość spektralna	5 - 50 nm	0.000001 - 5 nm
Natężenie prądu	50 mA	150 mA
Moc wyjściowa	5 mW	100 mW
Pasmo modulacji	100 MHz	100 GHz
Czas życia	10 000 godzin	50 000 godzin
Cena	0.1 - 1 500 \$	1 - 100 000 \$

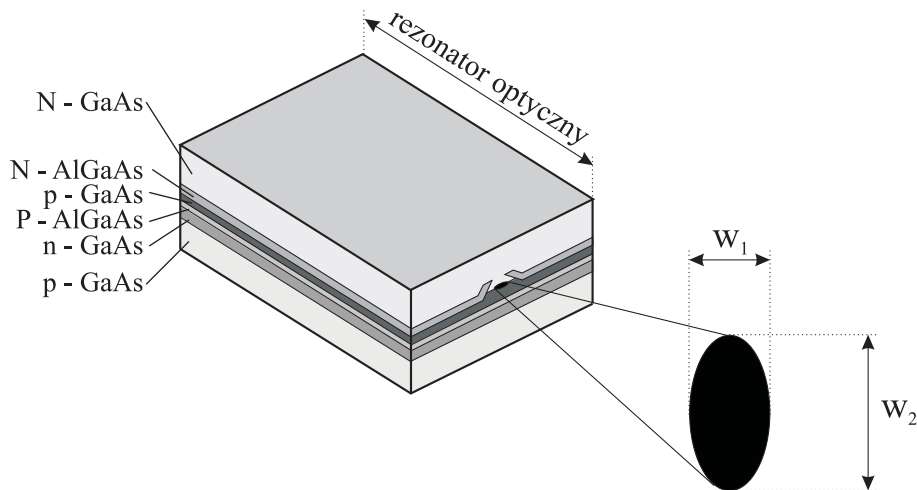
Tablica 1: Porównanie parametrów diod świecących typu LED i diod laserowych.

5.2 Diody LED

Diody LED należą do prostszych z półprzewodnikowych źródeł światła. Ich zaletami jest cena, niski pobór mocy oraz bardzo długi średni czas życia. Kolor światła emitowanego przez diodę LED zależy od materiału z jakiego została ona wyprodukowana, a konkretnie od szerokości przerwy energetycznej, zaś natężenie emitowanego przez nie światła uzależnione jest od płynącego przez złącze n-p prądu.

5.3 Diody laserowe

Podstawową różnicą pomiędzy diodami LED i diodami laserowymi polega na wykorzystaniu w tych drugich *rezonatora optycznego*. Rezonator taki tworzą zazwyczaj dwie przeciwległe, wzajemnie równoległe wypolerowane krawędzie diody laserowej. Obszar laserujący w diodzie laserowej ma niewielkie rozmiary (ok. $2\ \mu\text{m}$ wysokości, $10\ \mu\text{m}$ szerokości i $400\ \mu\text{m}$ długości). Nie jest on zatem dużo większy od długości fali emitowanego przez nią światła. Z tego powodu światło opuszczając diodę ulega silnej *dyfrakcji*, której skutkiem jest duża, różna w każdym kierunku, rozbieżność wiązki. Obrazuje to Rys. 2.



Rysunek 2: Budowa warstwowa diody laserowej heterozłączowej. Wiązka światła opuszczającego diodę podlega dyfrakcji, czego rezultatem jest jej silna eliptyczność różna w każdym z kierunków. Dużymi literami N i P oznaczono półprzewodniki typu n i p o większej przerwie energetycznej.

Dla małych wartości natężenia prądu płynącego przez złącze półprzewodnikowe dioda laserowa działa jak typowa dioda LED. Jednakże wraz z przekroczeniem wartości progowej prądu I_{pr} w diodzie dochodzi do powstania *akcji laserowej*. Wysokie natężenie prądu płynącego przez złącze półprzewodnikowe zapewnia, że w paśmie przewodnictwa i w paśmie walencyjnym znajduje się duża liczba nośników, które mogą ze sobą efektywnie rekombinować. Rezonator optyczny sprawia, że fotony emitowane wzdłuż osi złącza, odbijają się od lusterek, przechodzą wielokrotnie przez obszar złącza. Poruszając się w ten sposób mogą one powodować tzw. *przejścia wymuszone* polegające na emisji fotonu o dokładnie takich samych parametrach (kierunek propagacji, długość fali oraz

faza) co foton wymuszający. Każdy nowowygenerowany foton może następnie wymuszać emisję kolejnych fotonów. To właśnie emisja wymuszona i lawinowa generacja fotonów w określonym stanie kwantowych odpowiedzialna jest za wyjątkowe właściwości światła laserowego: *dużą gęstość mocy, wysoką spójność oraz wąski zakres spektralny*.

Rozróżnia się dwa typy laserów półprzewodnikowych. Pierwszy typ stanowią tzw. *lasery homozłączowe*. Laserami takimi są diody półprzewodnikowe składające się tylko jednego półprzewodnika typu p i jednego półprzewodnika typu n (np. GaAs). Drugi typ laserów stanowią tzw. *lasery heterozłączowe* zbudowane z kilku półprzewodników o różnej szerokości przerwy energetycznej (np. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, gdzie x jest ułamkiem opisującym średnią zawartość aluminium w związku). Różny stopień domieszkowania aluminium umożliwia modyfikację właściwości optycznych materiału półprzewodnika np. jego współczynnika załamania. Dzięki zastosowaniu budowy heterowarstwowej w tego typu laserach możliwe jest bardziej efektywne wstrzykiwanie nośników w obszar świecący, a co za tym idzie lepiej spełnione są warunki akcji laserowej.

Diody laserowe charakteryzują się bardzo wysoką wydajnością. Moc emitowanego światła może dochodzić nawet do 50% mocy prądu płynącego przez złącze. Tak wysoka efektywność nie jest osiągnięta w żadnym z innych typów laserów.

Długość fali światła emitowanego przez laser zdeterminowana jest przez tzw. *krzywą wzmocnienia ośrodka* oraz rezonator optyczny (Rys. 3). Krzywa wzmocnienia ma zazwyczaj szerokość od kilku do kilkudziesięciu nanometrów. Ponieważ przedział spektralny rezonatora dany jest zależnością

$$\nu_{FSR} = \frac{c}{2nd}, \quad (2)$$

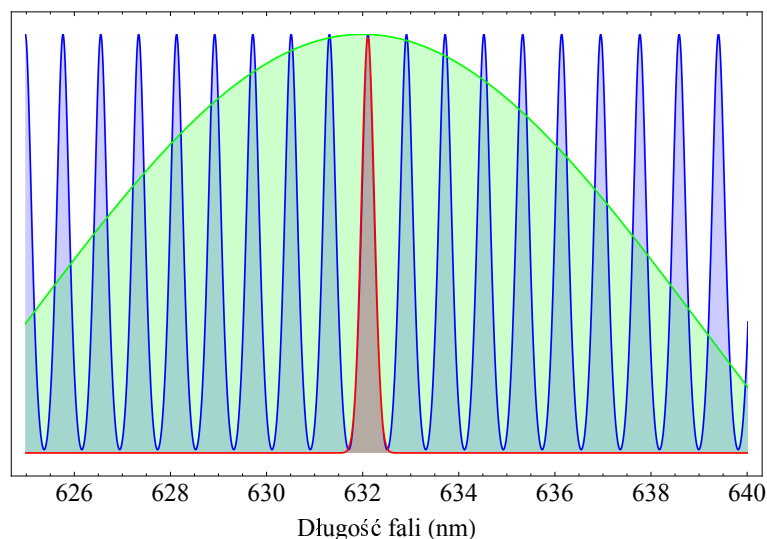
gdzie d jest długością rezonatora, dla diody emitującej światło z obszaru o długości 100 μm kolejne mody rezonatora oddalone są od siebie o kilkadziesiąt GHz.¹ W laserach o tzw. *poszerzeniu jednorodnym*, tj. laserach, w których emisja jednego fotonu powoduje obniżenie krzywej wzmocnienia dla wszystkich długości fali, z lasera emitowane jest tylko jedna długość fali, tzw. *mod podłużny*. Emitowany mod to ten mod rezonatora, który przypada najbliższej krzywej wzmocnienia.

Zmianę długości fali światła emitowanego z diody laserowej osiągnąć można przez zmianę parametrów pracy złącza laserowego tj. zmianę jego temperatury pracy oraz ilości znajdujących się w nim nośników. Zmiana temperatury powoduje zmianę szerokości przerwy wzbronionej. Dodatkowo zmiana temperatury powoduje rozszerzenie się termiczne diody, a co za tym idzie zmianę długości złącza. Skutkiem tego jest przesunięcie modów rezonatora. Przesunięcie modów rezonatora można również osiągnąć przez zmianę prądu płynącego przez złącze. Zmiana temperatury powoduje zmianę liczby nośników prądu w obszarze złącza, a co za tym idzie zmianę współczynnika załamania n materiału.

6 Przebieg ćwiczenia

Przed rozpoczęciem ćwiczenia zmontowany układ należy bezwzględnie pokazać prowadzącemu ćwiczenie.

¹Dla długości fali 600 nm taka odległość spektralna odpowiada różnicy długości fali kolejnych modów rzędu 0.1 pm.



Rysunek 3: Schemat różnych przyczynków do wypadkowego wzmocnienia optycznego lasera w funkcji długości fali. Zielona krzywa pokazuje krzywą wzmocnienia materiału, zaś niebieska strukturę modową rezonatora o stosunkowo niewielkim współczynniku odbicia ($R = 0.2$). Czerwoną krzywą zaznaczono mod rezonatora, który będzie ulegał wzmocnieniu w diodzie. Światło o takiej długości fali emitowane będzie z rezonatora.

6.1 Badanie właściwości diod LED

6.1.1 Charakterystyki natężeniowa diod LED

Proszę zbadać zależność natężenia światła emitowanego z diody LED w funkcji przykładanego do niej napięcia. W tym celu proszę zmieniać napięcie na zasilaczu tego układu w przedziale od 0 do 10 V co 0,5 V. Proszę zapewnić możliwie efektywne skupienie światła emitowanego z diody na detektorze. Pomiaru należy przeprowadzić dla kilku różnych diod LED. Jaki wpływ na uzyskane wyniki może mieć charakterystyka spektralna czułości fotodetektora?

6.1.2 Charakterystyki spektralne diod LED

Przy użyciu spektroskopu proszę zbadać charakterystyki spektralne dostarczonych diod LED. Proszę sprawdzić czy charakterystyki te ulegają zmianie dla różnych wartości napięcia przykładanych do złącza.

6.1.3 Charakterystyki emisji kątowej diod LED

Przy użyciu układu przesłon należy zbadać zależność natężenia światła emitowanego z diody w funkcji kąta. Do tego pomiaru proszę dobrze skolimować wiązkę światła oraz dokonać pomiaru natężenia w kierunku poprzecznym do kierunku rozchodzenia się światła.

6.2 Badania właściwości diod laserowych

6.2.1 Natężenie światła emitowanego w funkcji prądu płynącego przez diodę

Dla kilku wartości temperatury diody laserowej (między 15°C a 40°C) proszę zbadać jak zmienia się moc światła laserowego w funkcji prądu płynącego przez złącze. Ważne jest, aby pomiar rozpoczynać od możliwie najmniejszych wartości prądu płynącego przez złącze. W szczególności proszę zaobserwować zależność natężenia krytycznego prądu I_{pr} , dla którego rozpoczyna się akcja laserowa, od temperatury złącza. Proszę również określić efektywność akcji laserowej przez zbadanie współczynników kierunkowych otrzymanych krzywych powyżej I_{pr} .

6.2.2 Badanie charakterystyk spektralnych

Wiązkę laserową należy skierować do spektrometru i zaobserwować charakterystykę częstotliwościową emitowanego światła. Proszę określić centralną długość fali światła. Następnie proszę sprawdzić jak zmienia się ona wraz ze zmianą natężenia prądu płynącego przez złącze oraz zmianą temperatury diody laserowej. Czy zaobserwowane zależności są identyczne?

Może się również zdarzyć, że dla pewnych parametrów pracy lasera na spektrometrze obserwowane będzie widmo światła z wieloma maksimami emisji. Co to oznacza?

6.2.3 Pomiar profilu wiązki światła emitowanej z lasera

Przy pomocy układu optycznego oraz układu przesłon należy zmierzyć profil natężenia światła emitowanego z diody laserowej w kierunku poprzecznym do kierunku propagacji wiązki.

7 Opracowanie wyników

Uzyskane wyniki należy przedstawić w następujący sposób:

- Charakterystyki spektralne otrzymane dla diod LED należy przedstawić w postaci serii wykresów. Wykresy te powinny być wykresami trójwymiarowymi w których na osi x jest długość fali, na osi z napięcie przykładane do diody, zaś na osi y natężenie rejestrowanego światła.
- Proszę wykreślić zależności długości fali i amplitudy, dla których obserwowane jest maksimum zarejestrowanych zależności spektralnych w funkcji napięcia przykładanego do diody.
- W oparciu o otrzymane zależności proszę spróbować zidentyfikować materiał z jakiego wykonane są diody LED.
- Zarejestrowane dla diody laserowej wartości natężenia progowego I_{pr} , dla którego rozpoczyna się akcja laserowa, należy przedstawić na wykresie w funkcji temperatury złącza.
- Proszę przedstawić na wykresie zależność współczynnika efektywności akcji laserowej w funkcji temperatury złącza. Proszę obliczyć zmianę tego współczynnika w funkcji temperatury.
- Proszę spróbować policzyć jak zmienia się długość fali emitowanego światła w funkcji temperatury diody laserowej.

Literatura

- [1] W. Dementroder, *Spektroskopia laserowa*, Warszawa 1993, PWN.
- [2] B. Zietek *Optoelektronika*, Toruń 2004, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.
- [3] T. Pustelny *Physical and technical aspects of optoelectronic sensors*, Gliwice 2005, Wydawnictwo Politechnii Śląskiej.