

## Ćwiczenie 86

# Laser półprzewodnikowy

### *Cel ćwiczenia*

Badanie właściwości lasera półprzewodnikowego. W ćwiczeniu wyznacza się: długość fali światła lasera, moc i sprawność lasera, próg akcji laserowej, polaryzację i profil poprzeczny wiązki.

### *Wprowadzenie*

Laserem nazywamy źródło światła, w którym światło wytwarzane jest w procesie *wymuszonej emisji promieniowania*. (W zwykłych źródłach światła, od palącego się ogniska do diody świecącej, zachodzi *emisja spontaniczna*.) Wykorzystanie emisji wymuszonej jest źródłem niezwykłych własności wiązki światła lasera, którą cechuje:

- (a) równoległość (mały kąt rozbieżności),
- (b) monochromatyczność
- (c) duży stopień polaryzacji
- (d) duża gęstość mocy
- (e) obok pracy ciągłej, możliwe jest wytwarzanie b. krótkich impulsów światła (nawet femtosekundowych)

### Zjawisko emisji wymuszonej jako podstawa działania laserów

Dla zrozumienia działania lasera wykorzystać trzeba elementy kwantowej teorii oddziaływania światła z materią. Od czasu modelu Bohra stało się jasne, że emisja względnie absorpcja fotonów związana jest z przejściami między poziomami energetycznymi układu kwantowego (atomu, cząsteczki czy ciała stałego). Układ kwantowy ma zazwyczaj dużo różnych poziomów energetycznych, ale jak długo rozpatrujemy jego oddziaływanie ze światłem o energii fotonu  $h\nu$  wystarczy rozpatrywać tylko te dwa, dla których zachodzi związek wynikający z prawa zachowania energii:

$$E_k - E_i = h\nu. \quad (1)$$

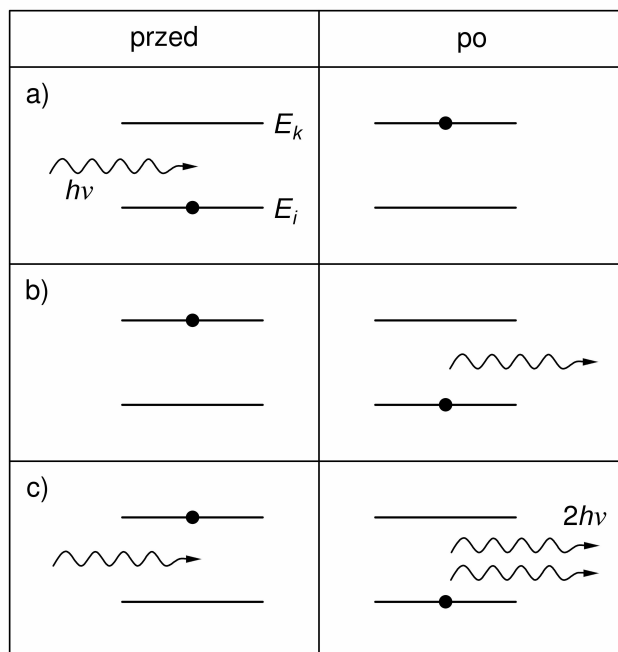
W procesie *absorpcji* (rys. 1a) padający foton o energii  $h\nu$  znika, a jego energia idzie na przeniesienie elektronu z poziomu niższego o energii  $E_i$  na wyższy  $E_k$ .

W procesie *emisji spontanicznej* elektron przechodzi z poziomu wyższego na niższy, a różnica energii jest wypromieniowana w formie fotonu (rys. 1b). Ważnym parametrem emisji spontanicznej jest jego prawdopodobieństwo zajścia w czasie, które ilościowo opisuje parametr zwany średnim czasem życia  $\tau$ .

Wydawać by się mogło, że te dwa procesy wyczerpują wszystkie możliwości. Trzeba było geniuszu Alberta Einsteina, by teoretycznie przewidzieć (praca z 1917 r), że istnieje trzecia możliwość – *emisja wymuszona*. Nazwana jest tak dlatego że, jak pokazuje rys. 1c, padający foton o energii  $h\nu$  wymusza przejście układu kwantowego ze stanu o energii

wyższej do niższej. Różnica energii idzie na wytworzenie drugiego fotonu. Obydwa fotony są pod każdym względem identyczne – mają tę samą energię, kierunek czy stan polaryzacji.

Najważniejszym rezultatem ilościowym analizy Einsteina było dowiedzenie, że *prawdopodobieństwa absorpcji oraz emisji wymuszonej są takie same* – niezależnie od rodzaju rozpatrywanego układu kwantowego.



**Rys. 1.** Trzy elementarne procesy opisujące oddziaływanie fotonu z układem kwantowym:  
a) absorpcja, b) emisja spontaniczna, c) emisja wymuszona.

Przeprowadźmy zatem doświadczenie myślowe: rzucamy grupę fotonów na zespół atomów, z których  $N_i$  jest w stanie o energii niższej  $E_i$ , zaś  $N_k$  – w stanie o energii wyższej  $E_k$ . W stanie równowagi termodynamicznej liczba atomów o energii wyższej jest zawsze mniejsza,  $N_k < N_i$ , co opisuje ilościowo rozkład Boltzmanna:

$$\frac{N_k}{N_i} = \exp\left(-\frac{E_k - E_i}{k_B T}\right). \quad (2)$$

Jeżeli prawdopodobieństwo wystąpienia każdego z procesów są takie same, sumaryczna liczba aktów absorpcji będzie większa od liczby aktów emisji wymuszonej i fotonów będzie coraz mniej – padająca wiązka będzie pochłaniana.

Jeżeli jednak wytworzymy stan, w którym liczba atomów w stanie o wyższej energii będzie większa od liczby atomów w stanie o niższej energii,  $N_k > N_i$ , to procesy emisji wymuszonej zaczną przeważać nad procesami absorpcji. Uzyskanie stanu, dla którego zachodzi taka *inwersja obsadzeń*, jest możliwe na koszt energii dostarczonej z zewnątrz. Proces ten zwany jest potocznie *pompowaniem*.

Inwersja obsadzeń jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym do powstania samorzutnej generacji światła spójnego. Drugim warunkiem jest, by część fotonów wracała z powrotem do ośrodka czynnego, czyli realizacja dodatniego sprzężenia zwrotnego. W przypadku laserów gazowych stosowane są półprzezroczyste zwierciadła zewnętrzne, w laserach półprzewodnikowych wystarcza odbicie części światła od gładkiej powierzchni

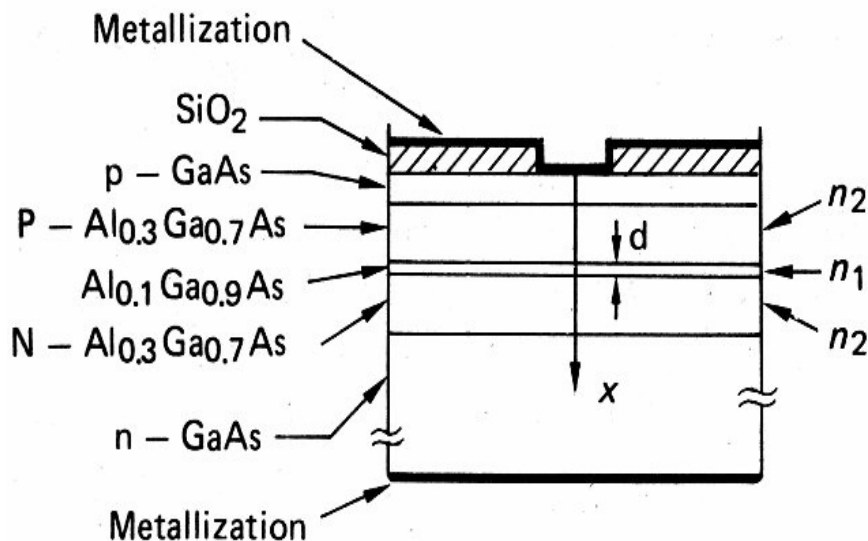
kryształu półprzewodnika. Ośrodek czynny będący wzmacniaczem światła, razem z układem sprzężenia zwrotnego, tworzą samowzbudny generator fali świetlnej – czyli *laser*.

Wielka różnorodność rodzajów laserów wynika z wyboru ośrodka czynnego, którym może być gaz atomowy (np. laser He-Ne, argonowy), gaz cząsteczkowy (laser CO<sub>2</sub>), ciecz (lasery barwnikowe) czy różne rodzaje ciała stałego. Różne też są sposoby uzyskania inwersji obsadzeń. Zobaczmy, jak ogólne zasady działania lasera realizowane są w przypadku najpowszechniej używanych laserów półprzewodnikowych.

### Laser półprzewodnikowy

Lasery półprzewodnikowe nazywane są też *diodami laserowymi*, bo ich konstrukcja jest rozwinięciem diody świecącej i wykorzystuje te same rodzaje półprzewodników. Dioda świecąca to w najprostszym przypadku złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Swobodne elektrony z obszaru *n* oraz swobodne dziury z obszaru *p* płyną naprzeciw siebie i spotykają się w obszarze złącza. Elektron z pasma przewodnictwa przeskakuje do pasma walencyjnego zapełniając dziurę. W efekcie obydwie kwazicząstki znikają, a energia związana z przeskakiem (równanie (1)) wyemitowana jest w postaci fotonu.

Proces taki, nazwany *rekombinacją promienistą*, zachodzi z wystarczającą wydajnością w półprzewodnikach z tzw. prostą przerwą energetyczną. Najczęściej wykorzystywane są związki pierwiastków grupy III i V układu okresowego. Energia wyemitowanego fotonu jest w przybliżeniu równa szerokości przerwy,  $h\nu \cong E_g$ . Przykładowo, diody z arsenku galu GaAs ( $E_g = 1,4$  eV) emitują światło z zakresu bliskiej podczerwieni. Dla uzyskania światła czerwonego wykorzystuje się np. układy potrójny Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As, w których podstawienie znaczącej części atomów arsenu przez atomy aluminium ( $x \cong 0,3$ ) daje potrzebne powiększenie szerokości przerwy.



**Rys. 2.** Struktura czerwonego lasera półprzewodnikowego. Rzeczywiste wymiary kostki są rzędu ułamka milimetra, szerokość *d* studni kwantowej  $0,1 \div 0,5$   $\mu\text{m}$ . Wg.: A. Bar-Lev, *Semiconductors and Electronic Devices*, Prentice Hall 1984.

Akcję laserową uzyskać można dla zwykłego złącza p-n przez zastosowanie wysokiej wartości prądu (co jest możliwe przy zasilaniu impulsowym) i obniżenie temperatury. Aby uzyskać ciągłą emisję laserową w temperaturze pokojowej potrzebne jest skoncentrowanie

dziur i elektronów w małej objętości. Uzyskuje się to przez wytworzenie między obszarami typu p i n cienkiego obszaru czynnego (*active region* na rys. 2) o zmniejszonej wartości  $E_g$ , zwanego też studnią kwantową. Płynące z obydwu stron elektrony i dziury „wpadają” do studni i tam już pozostają aż do zajścia procesu emisji wymuszonej.

Potrzebne do działania lasera sprzężenie zwrotne uzyskuje się przez odbicie światła od gładkich bocznych ścian kryształka (odbija się ok. 30%). Niska cena czerwonych laserów możliwa jest dlatego, że wykorzystuje się dobrze opanowaną technologię wytwarzania warstw na podłożu GaAs, a gładkie ściany boczne wytwarza się przy okazji łupania monokrystalicznego waferu na indywidualne elementy o rozmiarze rzędu 0,5 mm.

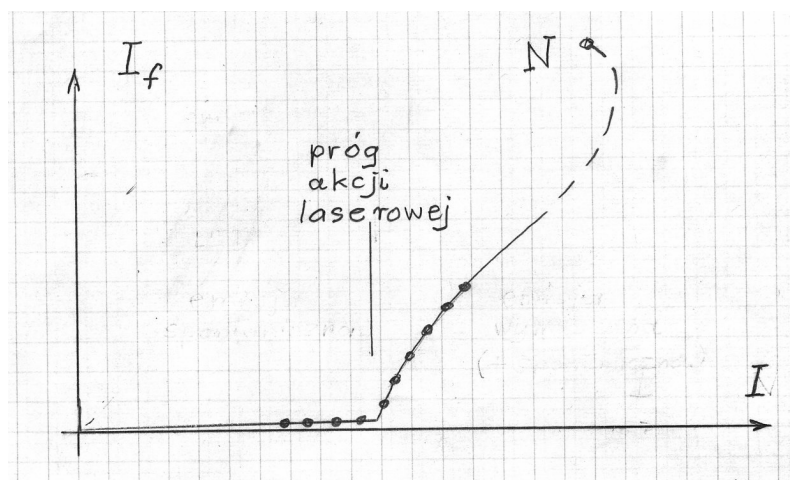
Światło wydobywające się z boku kryształka nie jest wcale równoległe. Opuszczając kryształ podlega dyfrakcji na wąskim „otworze” studni kwantowej, w wyniku tworzy się wiązka rozbieżna. Utworzenie wiązki równoległej jest wynikiem zastosowania soczewki (nie pokazanej na rys. 2). Sama studnia kwantowa działa jak optyczny falowód, czego efektem jest wysoki stopień polaryzacji emitowanego światła.

### Badanie progu akcji laserowej

Właściwością laserów wszystkich rodzajów (nie tylko półprzewodnikowych) jest występowanie progu akcji laserowej. Światło laserowe pojawia się dopiero po przekroczeniu określonej wartości czynnika wymuszającego, potrzebnego do uzyskania inwersji obsadzeń i dodatniego sprzężenia zwrotnego. W naszym laserze tym czynnikiem jest prąd zasilający  $I$ , natomiast miarą natężenia uzyskanej wiązki jest prąd fotodiody  $I_f$ , wykorzystywanej jako detektor światła.

Dla wartości  $I$  poniżej progu, daje się zmierzyć niewielkie natężenie światła. Laser działa wtedy jak zwykła dioda świecąca (LED), w której zachodzi emisja spontaniczna. Mierzone natężenie jest małe, gdyż kierunek emitowanych fotonów jest przypadkowy i tylko niewielka ich część może wydostać się z lasera.

Po przekroczeniu progu obserwuje się szybki wzrost natężenia światła, powstającego w wyniku procesów emisji wymuszonej. Najciekawsza część charakterystyki to obszar poniżej progu i powyżej, do mniej więcej 1/3 maksymalnej wartości  $I_f$ . Można zmierzyć całą charakterystykę, aż do znamionowego punktu pracy  $N$ , ale dalsza część funkcji  $I_f = f(I)$  wynika z działania elektronicznego ogranicznika prądu, chroniącego diodę laserową przed uszkodzeniem.

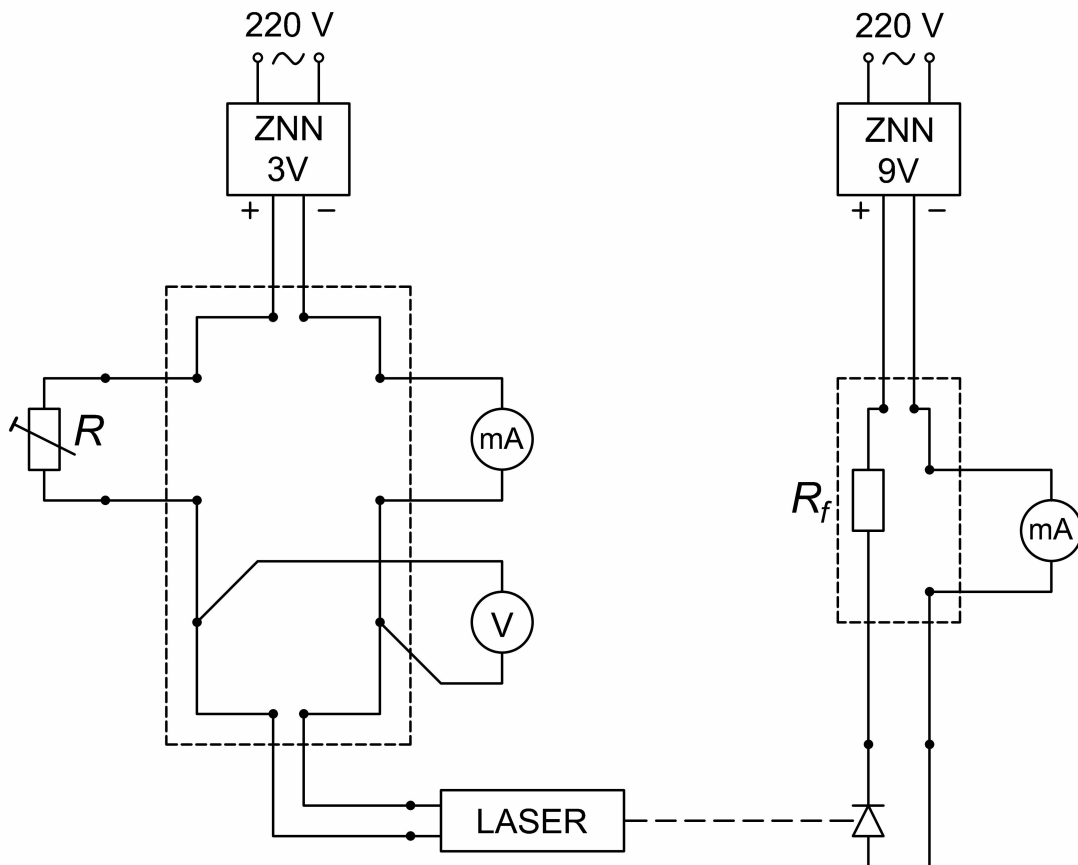


**Rys. 3.** Zależność natężenia światła wiązki laserowej od prądu lasera. Rysunek schematyczny, objaśnienia symboli w tekście.

## Aparatura

Wspólny dla wszystkich wariantów wykonania ćwiczenia jest układ zasilania lasera i detekcji światła, pokazany na rys. 4. W obwodzie zasilania lasera mamy: zasilacz 3 V, woltomierz i amperomierz, oraz opornik dekadowy umożliwiający regulację prądu lasera (za wyjątkiem pomiaru C winien być nastawiony na zero).

Obwód detekcji światła jest jeszcze prostszy. Jego elementy to: zasilacz 9 V, fotodioda i opornik  $R_f$  zabezpieczający fotodiode i miliamperomierz.



**Rys. 4.** Schemat elektryczny zasilania lasera i detekcji generowanego światła.

Ława optyczna umożliwia stabilne ustawienie elementów wykorzystywanych w eksperymentach. Są to:

- laser. Aktualnie mamy do wykorzystania dwa lasery, czerwony i fioletowy.
- fotodioda z układem przesuwu w poziomie i pionie, oraz możliwością ustawienia ekranika lub szczeliny przed elementem czynnym fotodiody,
- siatka dyfrakcyjna,
- ekran do obserwacji obrazu wytwarzanego przez siatkę dyfrakcyjną,
- polaryzator ze skalą kątową.

Używane lasery o mocy wiązki do 5 mW, emitujące światło widzialne, są uważane za bezpieczne, a ochrona oka jest zapewniona przez naturalne reakcje organizmu. Niemniej, nie wolno patrzeć wprost w wiązkę lasera, podobnie jak nie wolno patrzeć wprost na Słońce.

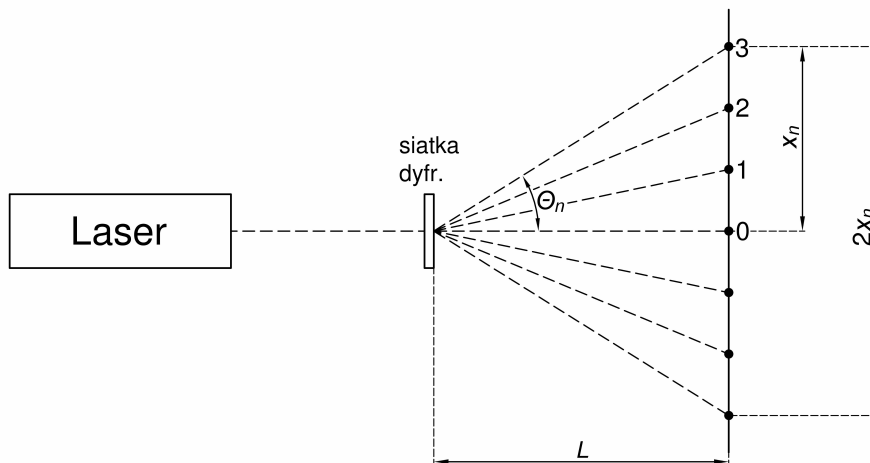
## Wykonanie ćwiczenia

Pomiary A – E opisane poniżej można zrealizować, w przypadku zajęć 3-godzinnych, dla jednego z laserów. Alternatywnie wykonać można wybrane pomiary dla dwóch różnych laserów.

### A. Pomiar długości fali

W tym eksperymencie nie wykonuje się żadnych pomiarów elektrycznych. W przestrzeni między laserem i diodą detekcyjną (której nie należy usuwać) ustawiamy siatkę dyfrakcyjną oraz ekran, na którym obserwujemy obraz dyfrakcyjny. Parametrem charakteryzującym siatkę dyfrakcyjną jest odległość między szczelinami  $d$  (producenci siatek podają zwykle liczbę szczelin na milimetr, z której można obliczyć wartość  $d$ ).

W zależności od odległości ekranu i stałej siatki obserwujemy tylko plamki pierwszego rzędu  $n = 1$  lub również plamki wyższych rzędów ( $n > 1$ ). Wygodnie jest założyć na ekran papier i zaznaczać ołówkiem położenia plamek. Następnie mierzy się odległość  $L$  siatka – ekranu i odległość  $2x_n$  dla danej pary plamek dyfrakcyjnych.



**Rys. 5.** Pomiar długości fali światła lasera przy pomocy siatki dyfrakcyjnej.

Z równania siatki dyfrakcyjnej  $d \sin \theta_n = n\lambda$  otrzymujemy roboczy wzór

$$\lambda = \frac{x_n d}{n \sqrt{L^2 + x_n^2}} \quad (3)$$

Tylko dla pomiaru długości fali wykonujemy rachunek niepewności pomiaru. Uzyskaną wartość  $\lambda$  należy porównać ze specyfikacją producenta (jeśli jest znana).

### B. Pomiar mocy wiązki i sprawności lasera.

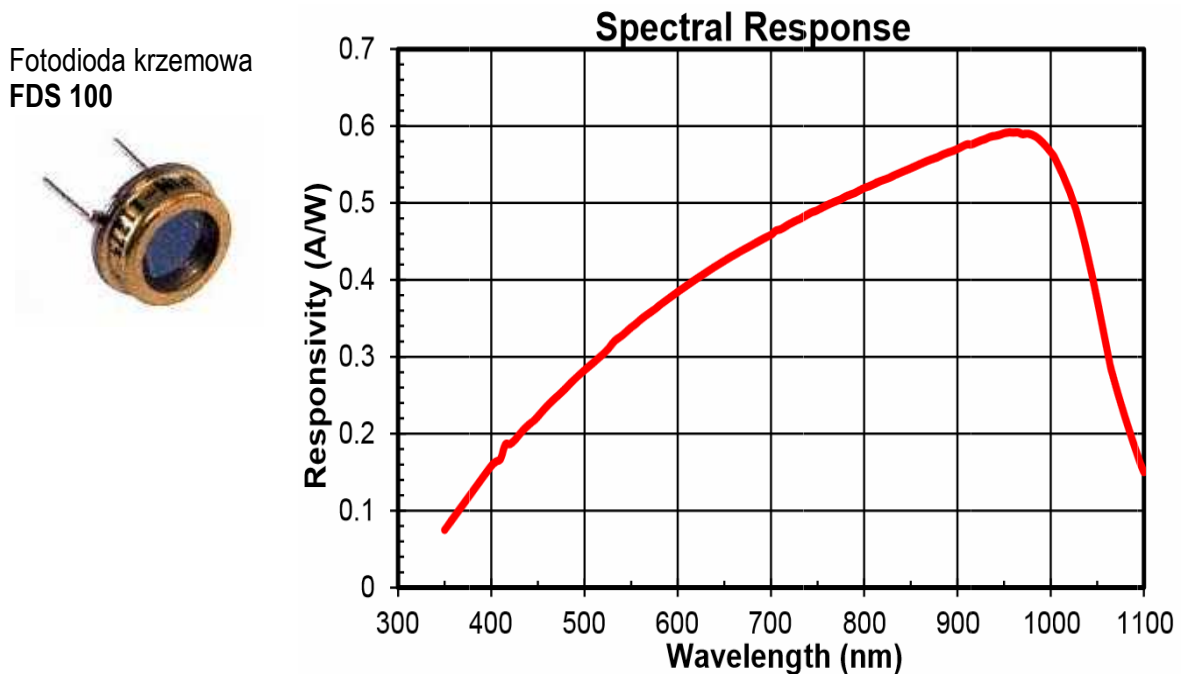
Pozostałe eksperymenty B – E wykonywane w ćwiczeniu wykorzystują półprzewodnikowy detektor światła w postaci fotodiody krzemowej FSD 100. Jej obszar czynny jest kwadracikiem o wymiarach  $3,6 \text{ mm} \times 3,6 \text{ mm}$  (rys. 6).

Przekrój wiązki lasera jest mniejszy od rozmiaru obszaru czynnego detektora, zatem prąd fotodiody  $I_f$  jest proporcjonalny do liczby fotonów, czyli do całkowitej mocy wiązki. Należy tylko zadbać, by wiązka lasera mieściła się w całości na powierzchni czynnej fotodiody. Światło powinno padać na środek ekranika na powierzchni kapturki zamykającej fotodiody. Po odkręceniu kapturki należy, przy wykorzystaniu pokręteł przesuwu poziomego i pionowego, doprowadzić do położenia, w którym prąd detektora jest największy.

Przeliczenie prądu fotodiody  $I_f$  na moc wiązki  $P_2$ ,

$$P_2 = \frac{I_f}{C(\lambda)}, \quad (4)$$

wymaga znajomości krzywej czułości  $C(\lambda)$  (rys. 6). Potrzebną wartość  $C$  należy odczytać z podanego przez producenta wykresu, wykorzystując wyznaczoną w punkcie A długość fali. Niepewność współrzędnej pionowej, około 10%, ogranicza bezwzględną dokładność pomiaru. (Uzyskanie wyższej dokładności wymaga indywidualnego wzorcowania fotodiody.)



**Rys. 6.** Wygląd zewnętrzny i krzywa czułości  $C(\lambda)$  fotodiody (wg FSD-100-SpecSheet.pdf f-my THORLABS).

Lasery jest urządzeniem, które dostarczoną energię elektryczną przetwarza na energię wytworzonej wiązki światła. Sprawność lasera definiujemy jako stosunek mocy wiązki  $P_2$  (obliczonej poprzednio) do dostarczonej mocy elektrycznej  $P_1$ ,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{U I}. \quad (5)$$

### C. Zależność natężenia światła od prądu lasera. Próg akcji laserowej

Tylko w tym eksperymencie trzeba regulować prąd lasera przy użyciu opornika dekadowego  $R$ . Mierzmy prąd fotodiody  $I_f$  w funkcji prądu zasilania  $I$ . Pomiar wykonać należy do wartości  $I_f$  do około 1/3 wartości maksymalnej (zob. punkty na rys. 3)

Eksperyment ten pokaże, że laser zaczyna wyraźnie świecić powyżej progowej wartości prądu zasilania  $I$ , co jest pośrednim dowodem występowania zjawisk emisji wymuszonej i inwersji obsadzeń. Wartość prądu progowego odczytać z wykresu zależności  $I_f = f(I)$ .

### D. Badanie polaryzacji wiązki

Zjawisko polaryzacji światła i działanie polaryzatora omawiane jest w podręcznikach. Polaryzatory używane są m. in. w fotografii, gdzie nazywane są filtrami polaryzacyjnymi.

Jeżeli na polaryzator pada wiązka światła spolaryzowanego liniowo o natężeniu  $I_0$ , to natężenie wiązki przechodzącej  $I(\varphi)$  dane jest zależnością

$$I(\varphi) = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

gdzie  $\varphi$  jest kątem między płaszczyzną polaryzacji światła i kierunkiem osi polaryzatora. Wzór ten znany jest jako prawo Malusa.

Badanie polaryzacji wiązki wymaga ustawienia polaryzatora ze skalą kątową w dowolnym miejscu wiązki między laserem i detektorem. Mierzmy zależność prądu fotodiody  $I_f$  od kąta  $\alpha$  na skali kątowej polaryzatora w pełnym zakresie kątów od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

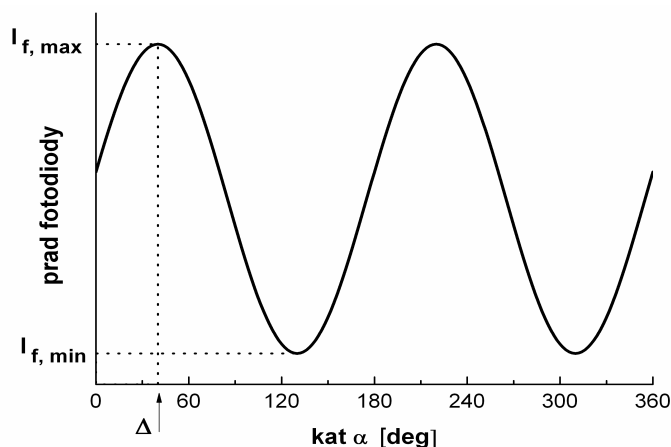
Obserwowaną zależność (rys. 6) opisuje roboczy wzór

$$I_f(\alpha) = I_{f, \min} + (I_{f, \max} - I_{f, \min}) \cos^2(\alpha - \Delta), \quad (7)$$

w którym:

- symbole  $I_{f, \max}$  oraz  $I_{f, \min}$  oznaczają maksymalną i minimalną wartość prądu fotodiody,
- $\alpha$  jest kątem odczytanym ze skali kątowej polaryzatora,
- stała  $\Delta$  (zdefiniowana na rys. 7) uwzględnia przesunięcie kątowe wynikające z niezgodności płaszczyzny polaryzacji lasera i położenia zera skali kątowej polaryzatora.

Opracowanie wyników pomiaru obejmuje wykonanie wykresu i jego jakościową interpretację

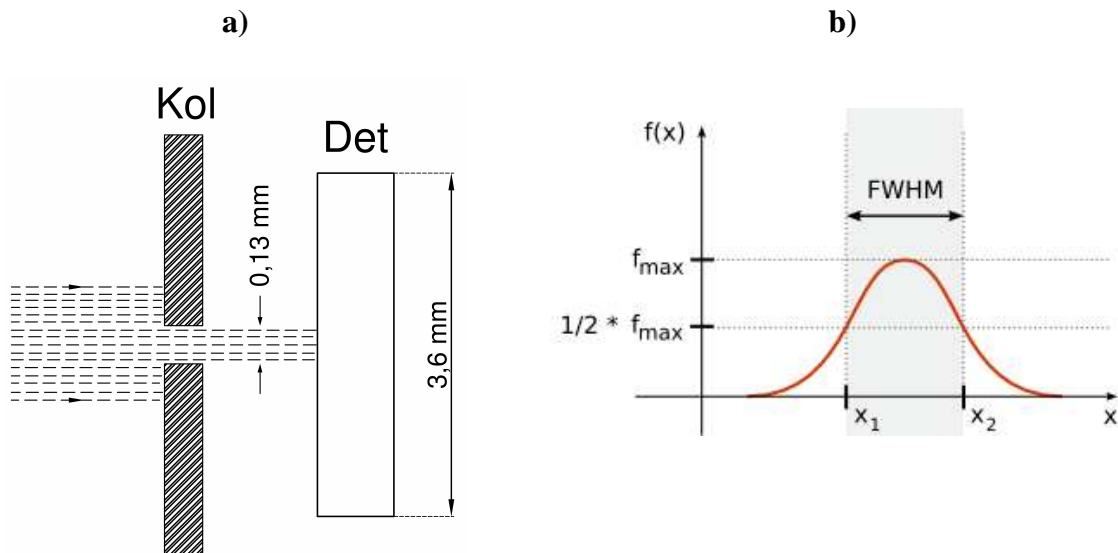


Rys. 7. Zależność prądu fotodiody od kąta obrotu polaryzatora



## E. Pomiar profilu wiązki

Potoczna obserwacja pokazuje, że wiązka lasera jest wąska. Profil poprzeczny wiązki możemy zmierzyć przy wykorzystaniu tej samej fotodiody, z tym, że trzeba użyć dodatkowo szczeliny kolimacyjnej (rys. 8a). Zespół szczelina – detektor przesuwamy w poprzek wiązki i odczytujemy prąd  $I_f$ . (Dla używanej w zestawie ćwiczeniowym śruby pełny obrót pokrętki odpowiada przesuwowi 0,75 mm, jedna działka tarczy to 1/6 obrotu, czyli 0,125 mm). Pomiar wykonać dla ustalonej odległości laser – dioda. Rezultatem pomiaru jest zależność  $I_f(x)$ .



**Rys. 8.** Badanie profilu wiązki: a) zależności geometryczne między rozmiarami elementu czynnego fotodiody (Det), kolimatora (Kol) i wiązki lasera, b) definicja szerokości połówkowej.

Jak scharakteryzować ilościowo szerokość piku? Powszechnie stosowaną miarą jest szerokość połówkowa FWHM (od ang. *Full Width at Half Maximum*), oznaczająca szerokość piku w połowie jego wysokości (rys. 7b). Należy ją wyznaczyć graficznie z wykonanego wykresu  $I_f(x)$ .