

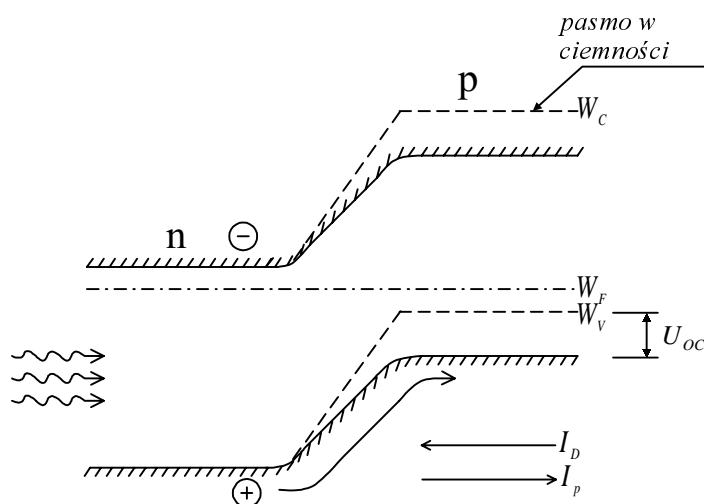
6

PRZYRZĄDY OPTOELEKTRONICZNE

Półprzewodnikowe przyrządy optoelektroniczne obejmują swym zakresem zarówno źródła promieniowania: diody elektroluminescencyjne, lasery półprzewodnikowe, jak również detektory promieniowania: fotoogniwa, fotodiody, fototranzystory oraz przyrządy będące w istocie połączeniem źródeł i detektorów promieniowania w postaci jednolitych konstrukcji zwane transoptorami.

6.1. FOTOOGNIWO

Fotoogniwa są wytwarzane obecnie wyłącznie w oparciu o struktury złączowe typu p-n, p-i-n lub struktury heterozłączowe. Zasadę powstawania napięcia w prostej strukturze p-n ilustruje rys.6.1. Złącze na rysunku jest oświetlone w taki sposób, że pochłanianie światła następuje w obszarze n.



Rys.6.1. Ilustracja powstawania napięcia fotowoltaicznego

Wygenerowane w tym obszarze nośniki nadmiarowe dyfundują w kierunku bariery i nośniki mniejszościowe, w tym przypadku dziury, zostaną przeciągnięte do obszaru typu p (dla dziur bariera nie istnieje) i będą dyfundowały w głąb kryształu. Nośniki te dają prąd świetlny I_p . Prąd ten spowoduje, że obszar p będzie się ładował dodatnio a n ujemnie i między elektrodami fotoogniwa powstanie różnica potencjałów. Powstanie różnicy potencjałów spowoduje zwiększenie przeciwnie skierowanego prądu dyfuzyjnego I_D , tj. prądu dziur z obszaru p do n i prądu elektronów z n do p. Jeżeli ogniwo jest rozwarne to ustala się

takie napięcie U_{OC} , przy którym oba prądy się zrównują

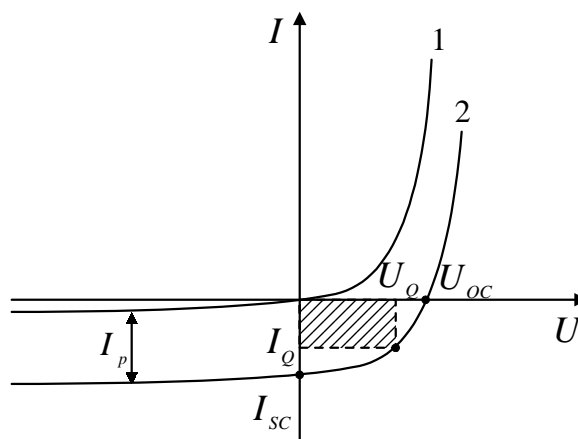
$$I = I_D - I_p = 0$$

Jeżeli fotoogniwo zostanie obciążone zewnętrzną rezystancją to napięcie spadnie poniżej U_{OC} i prąd wypadkowy będzie różny od zera

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{n\phi_T}\right) - 1 \right] - I_p \quad (6.1)$$

gdzie $\phi_T \equiv kT/q$, a n jest tzw. współczynnikiem nieidealności złącza. Charakterystyka prądowo-napięciowa fotoogniwa wg (6.1) pokrywa się z charakterystyką diody, przy czym dodatkowo przesunięta jest o wartość prądu świetlnego I_p , rys.6.2. Przy zwarcu ogniwa ($U = 0$) występuje prąd zwarcia I_{SC} , którego wartość jest równa I_p . Przy rozwarciu ogniwa prąd $I=0$ i napięcie $U = U_{OC}$ można wyznaczyć z zależności (6.1)

$$U_{oc} = n\phi_T \ln\left(1 + \frac{I_p}{I_s}\right) \quad (6.2)$$



Rys.6.2. Charakterystyka prądowo-napięciowa fotoogniwa w przypadku braku oświetlenia (1) i przy oświetleniu (2); obszar zakreskowany oznacza prostokąt maksymalnej mocy elektrycznej jaką można uzyskać z ogniwa przy danym oświetleniu

Tak więc ze wzrostem oświetlenia, czyli ze wzrostem I_p , wzrasta foto-SEM ogniwa. Wartość foto-SEM nie może jednak przekroczyć stykowej różnicy potencjałów złącza p-n, czyli w najkorzystniejszym przypadku $U_{OCmax} \approx (W_C - W_V)/q$ (rys.6.1).

Maksymalną moc (zakreskowane pole na rys.6.2) uzyskuje się dla określonego punktu pracy fotoogniwa I_o , U_o , tzn. przy odpowiednio dobranej rezystancji obciążenia. Wraz ze zmianą strumienia padającego światła taka rezystancja powinna być zmieniona i w praktyce dobiera się

średnią wartość rezystancji obciążenia dla dużego natężenia oświetlenia. Miarą „prostokątności” krzywej w czwartej ćwiartce (rys.6.2) jest tzw. współczynnik wypełnienia FF (fill factor)

$$FF = \frac{I_q U_q}{I_{sc} V_{oc}}$$

który często podawany jest jako wartość katalogowa przez producentów ogniw słonecznych.

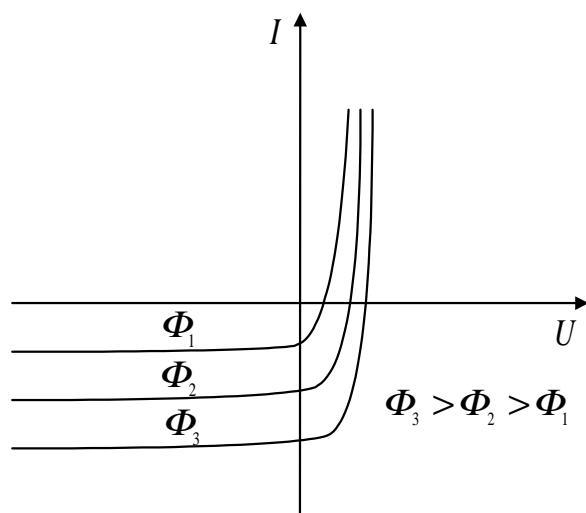
6.2. FOTODIODA

Fotodiode różni od fotoogniwa nieduża powierzchnia światłoczuła, rzędu kilku mm^2 , a poza tym jako fotodetektor fotodiode pracuje z reguły z polaryzacją zewnętrzną w kierunku zaporowym. Fotodiode, w zależności od przeznaczenia wykonuje się w kilku odmianach [97]:

- Fotodiode krzemowe, pracujące w zakresie od UV (nadfiolet) do NIR (bliska podczerwień); typowe zastosowania to czujniki w sprzęcie fotograficznym, kolorymetrii, spektrofotometrach, czujniki UV, czujniki dymu.
- Fotodiode Si typu p-i-n, charakteryzujące się dużą szybkością działania (czas odpowiedzi krótszy od 1 ns) używane w telekomunikacji optycznej, zdalnym sterowaniu optycznym, dyskach optycznych, detekcji promieniowania.
- Fotodiode Si lawinowe, charakteryzujące się dużym wzmocnieniem wewnętrznym, rzędu 100 i małym czasem odpowiedzi.
- Fotodiode GaAsP o charakterystyce spektralnej podobnej do charakterystyki ludzkiego oka; typowe zastosowania to sprzęt fotograficzny, spektrofotometry, detektory kolorów.
- Układy fotodiod (matryce jedno- i dwuwymiarowe) stosowane w spektrometrach wielokanałowych, analizatorach spektralnych, detektorach położenia.

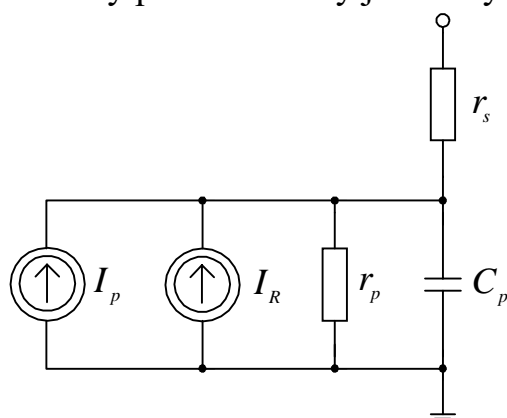
Charakterystyki fotodiode, przedstawione na rys.6.3 pokazują, że zwarciový prąd wsteczny fotodiode jest proporcjonalny do oświetlenia oraz niezależny od napięcia i ten obszar pracy jest wykorzystywany najczęściej. Na podstawie równania (6.1), obowiązującego dla fotoogniwa, oraz warunku $I_p = S\Phi$, gdzie S jest czułością prądową fotodiode otrzymuje się

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{n\phi_T}\right) - 1 \right] - S\Phi \quad (6.3)$$



Rys.6.3. Statyczne charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiody dla różnych natężeń padającego promieniowania

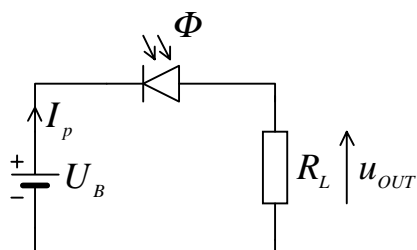
Przyjmując $U < 0$, otrzymuje się z (6.3) dla napięć dużo większych od napięcia termicznego ($\phi_T = 25\text{mV}$ dla $T = 300\text{ K}$), proporcjonalną zależność między I oraz Φ . Zmiennoprądowy schemat zastępczy fotodiody przedstawiony jest na rys.6.4.



Rys.6.4. Układ zastępczy fotodiody;
 I_p - prąd fotoelektryczny,
 I_R - prąd ciemny,
 r_p - rezystancja upływu,
 r_s - rezystancja szeregową,
 C_p - pojemność złączowa fotodiody

Graniczna częstotliwość pracy uwarunkowana jest wielkością pojemności C_p i wynosi $f_c = 1/(2\pi r_s C_p)$, zatem ujemna polaryzacja diody zmniejszająca C_p jest korzystna. Fotodiody p-i-n o małej pojemności C_p osiągają częstotliwości graniczne rzędu 1 GHz.

Podstawowy układ pracy fotodiody, przedstawiony na rys.6.5, wykorzystuje fotodiode jako nieliniowy „fotorezystor”.



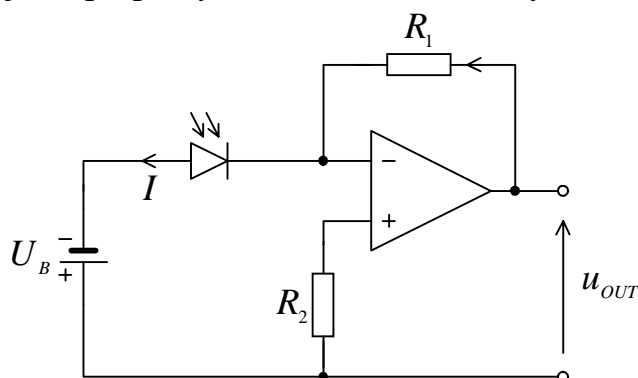
Rys.6.5. Układ pracy fotodiody z zewnętrzną polaryzacją w kierunku zaporowym i szeregową rezystancją

Napięcie wyjściowe równe

$$u_{OUT} = R_L I_P = R_L S \Phi \quad (6.4)$$

może zmieniać się od zera (dla $\Phi = 0$) do wartości maksymalnej rzędu U_B , co daje znacznie większą dynamikę zmian napięcia niż dla ogniwa niespolaryzowanego.

Fotodiody, ze względu na małe wartości prądu fotoelektrycznego, często wymagają współpracy ze wzmacniaczem, rys.6.6.

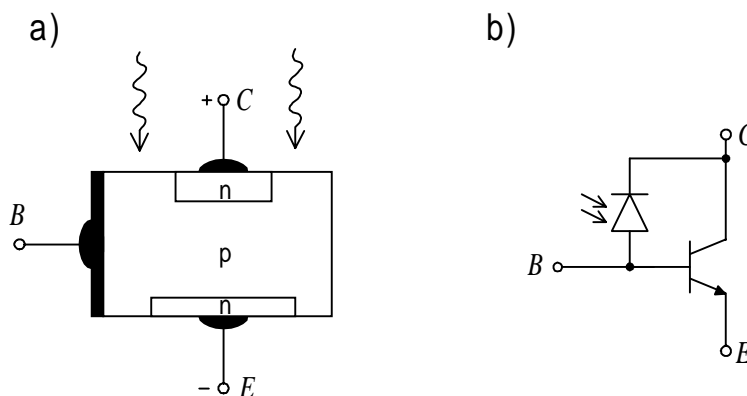


Rys.6.6. Fotodioda w układzie przetwornika prąd-napięcie; dla $R_1 = R_2$ napięcie wyjściowe jest równe $u_{OUT} = R_1 I = R_1 (I_P + I_R)$

W układzie przetwornika prąd-napięcie fotodioda spolaryzowana napięciem zaporowym ($5V < U_B < 20V$) zapewnia dużą szerokość pasma oraz dużą dynamikę zmian sygnału.

6.3 FOTOTRANZYSTOR

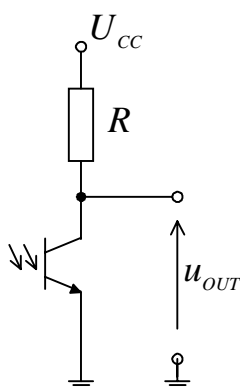
Tranzystor, w którym istnieje możliwość oświetlenia obszaru bazy (złącze kolektor-baza pełni rolę fotodiody) nazywamy fototranzystorem, rys.6.7 [89].



Rys.6.7. Budowa (a) i schemat zastępczy (b) fototranzystora

W wyniku oświetlenia bazy powstające w tym obszarze elektrony przedyfundują przez złącze kolektorowe (jako nośniki mniejszościowe) zwiększając jego prąd. Powstałe równocześnie w bazie nośniki większościowe - dziury nie przejdą przez barierę potencjału złącza emiterowego i wytworzą nieskompensowany ładunek dodatni obniżający barierę baza-emiter. Powoduje to zwiększoną iniekcję elektronów z emitera do bazy. Elektrony te osiągają następnie złącze kolektorowe i zwiększają silnie prąd kolektora co daje duże wzmocnienie i sprawia, że czułość fototranzystora jest dużo większa niż czułość fotodiody.

Zacisk bazy może być niewyprowadzony. W takich zastosowaniach fototranzystor jest nazywany podwójną fotodiodą. Pracę fototranzystora jako detektora optycznego objaśnia rys.6.8.

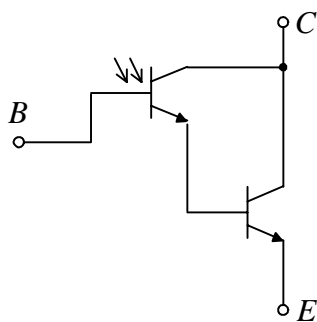


Rys.6.8. Fototranzystor w układzie fotodetektora

Jeżeli prąd złącza kolektor-baza jest równy I_p to na wyjściu uzyska się napięcie równe

$$u_{OUT} = U_{cc} - \beta I_p R \quad (6.5)$$

Duże wzmocnienie prądowe uzyskuje się w układzie Darlingtona z udziałem fototranzystora, rys.6.9.



Rys.6.9. Fototranzystor w układzie Darlingtona

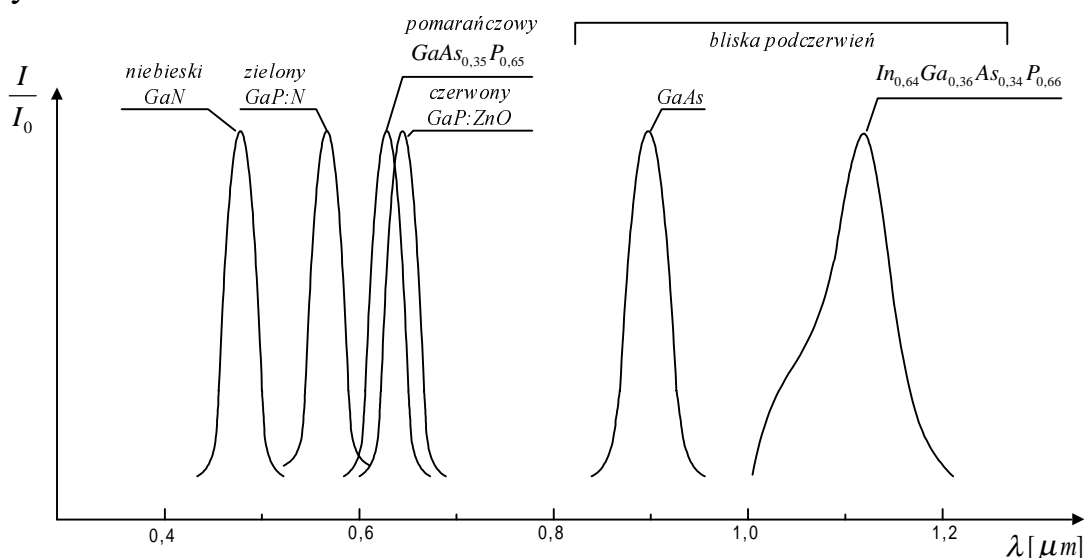
Zakres widmowy fototranzystorów jest taki jak odpowiadających

im fotodiod (rys.6.7b). Częstotliwość graniczna fototranzystora jest jednak znacznie mniejsza niż fotodiody i nie przekracza kilkuset kHz. Dla układu z rys.6.9 jest jeszcze mniejsza i wynosi $f_g \sim 30$ kHz.

6.4. DIODA ELEKTROLUMINESCENCYJNA (LED - Light Emitting Diode)

Promieniowanie optyczne w diodzie elektroluminescencyjnej powstaje w wyniku rekombinacji promienistej nośników ładunku w złączu p - n w procesie ich wstrzykiwania przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia. Wstrzyknięte nośniki mniejszościowe rekombinują z nośnikami większościowymi emitując fotony o energii odpowiadającej różnicy energii poziomów, pomiędzy którymi zachodzi rekombinacja. Do wytwarzania diod elektroluminescencyjnych wykorzystuje się zasadniczo półprzewodniki z tzw. prostą przerwą energetyczną (GaAs, GaN), co zapewnia wymaganą sprawność kwantową rekombinacji promienistej (stosunek ilości wygenerowanych fotonów do ilości nośników ładunku wstrzykniętych do złącza).

Natężenie emitowanego światła jest proporcjonalne do wielkości prądu przewodzenia. Zakres widmowy promieniowania jest ostro ograniczony a barwa światła zależy od rodzaju użytego półprzewodnika, rys.6.10.



Rys.6.10. Charakterystyki widmowe (krzywe znormalizowane) różnych półprzewodnikowych diod elektroluminescencyjnych.

Najbardziej intensywne jest promieniowanie o energiach kwantów odpowiadających szerokości przerwy energetycznej W_g danego półprzewodnika (energia kwantów jest wprawdzie związana z położeniem poziomów rekombinacyjnych, ale przy zastosowaniu

płytkich domieszek poziomy te położone są blisko krawędzi pasma walencyjnego i przewodnictwa). Środkowa długość fali widma diody jest zatem równa

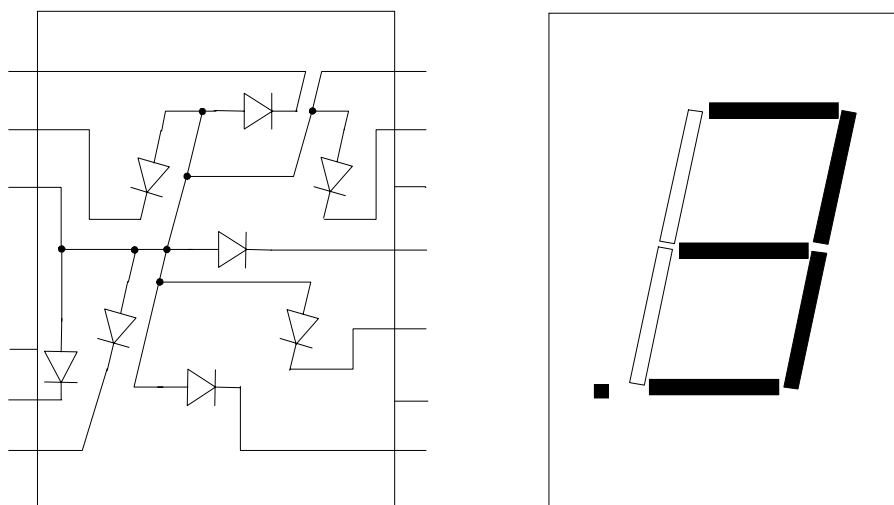
$$\lambda_p = \frac{hc}{W_g} \quad (6.6)$$

Na intensywność i barwę światła ma również wpływ temperatura obszaru czynnego diody. Z podwyższeniem temperatury maleje intensywność promieniowania, rośnie szerokość połówkowa widma i rośnie λ_p (maleje przerwa energetyczna). Spadek intensywności narzuca ograniczenie na maksymalną temperaturę pracy diod świecących.

Charakterystyki prądowo-napięciowe diod LED są zbliżone do zwykłych diod. Wynika stąd, że napięcie w kierunku przewodzenia, przy danym prądzie, będzie tym większe, im większa jest szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika. Przykładowo, dla $I_F = 10 \text{ mA}$, napięcie przewodzenia dla danej diody (o określonej barwie λ_p) zmienia się następująco

<i>GaAs</i>	(900 nm)	1,3...1,5 V
<i>GaAsP</i>	(655 nm)	1,6...1,8 V
<i>GaP</i>	(565 nm)	2,2...2,4 V
<i>GaN</i>	(490 nm)	3 ...5 V

Diody LED mają płaskie złącze p-n, z czym związany jest mały kąt wierzchołkowy stożka promieniowania emitowanego przez diodę (zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia). Z tego względu diody dla celów wskaźnikowych wyposaża się w sferyczne lub paraboliczne soczewki z żywicy syntetycznych co zwiększa widzialność promieniowania dochodzącą do kąta półpełnego.



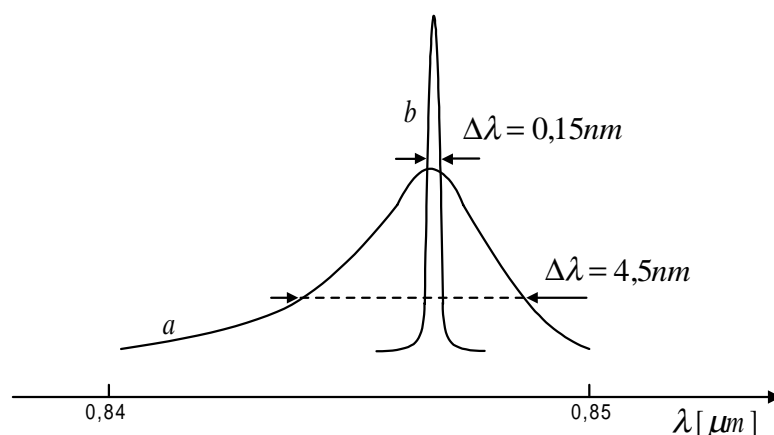
Rys.6.11. Diodowy układ do wyświetlania cyfr z lewą kropką dziesiętną w postaci tzw. wskaźnika siedmiosegmentowego (Hewlett Packard)

Diody LED wykonuje się nie tylko w postaci pojedynczych elementów ale także w postaci różnego rodzaju układów wskaźnikowych umożliwiających wyświetlanie cyfr, liter i innych znaków (rys.6.11).

6.5. LASER PÓŁPRZEWODNIKOWY

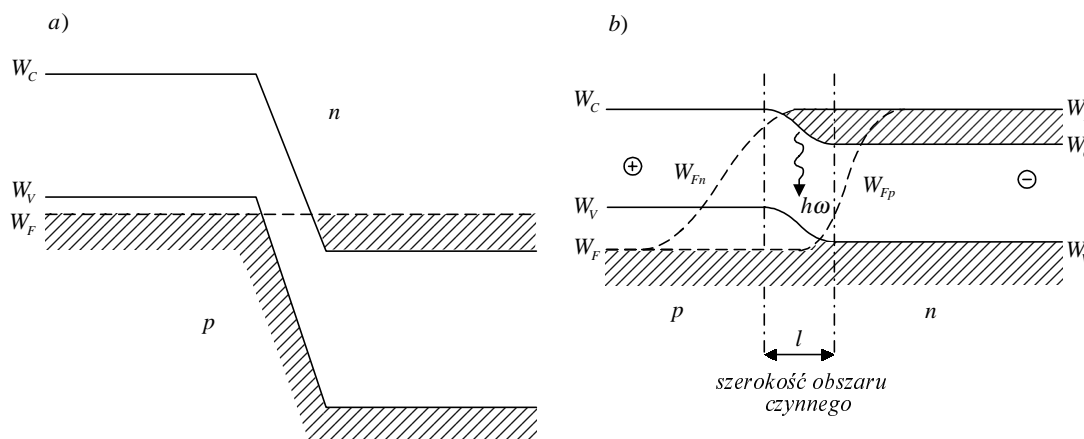
Jeżeli diodę elektroluminescencyjną z silnie domieszkowanymi obszarami p oraz n uformowaną w kształcie rezonatora optycznego zasilić prądem powyżej pewnej wartości progowej, to można uzyskać akcję laserową [63]. Widmo emisyjne lasera półprzewodnikowego po przekroczeniu progu wzbudzenia na tle widma emisyjnego diody przedstawia rys.6.12.

Emitowane przez laser promieniowanie o dużej gęstości energii wykazuje wysoką monochromatyczność, spójność przestrzenną i czasową oraz małą dyspersję kątową.



Rys.6.12. Charakterystyka widmowa diody LED (a) i lasera półprzewodnikowego po przekroczeniu prądu progowego (b)

Aby dioda mogła spełnić wymagania konieczne do wzbudzenia akcji laserowej trzeba w złączu p-n wytworzyć tzw. inwersję obsadzeń (obsadzenie wyżej położonych poziomów jest większe od obsadzenia poziomów niższych i fala elektromagnetyczna rozchodząca się w takim ośrodku nie jest pochłaniana lecz wzmacniana). Stan taki uzyskuje się w wyniku iniekcji nośników mniejszościowych powyżej pewnej wartości progowej w złączu p-n utworzonym z silnie domieszkowanych materiałów, rys.6.13.



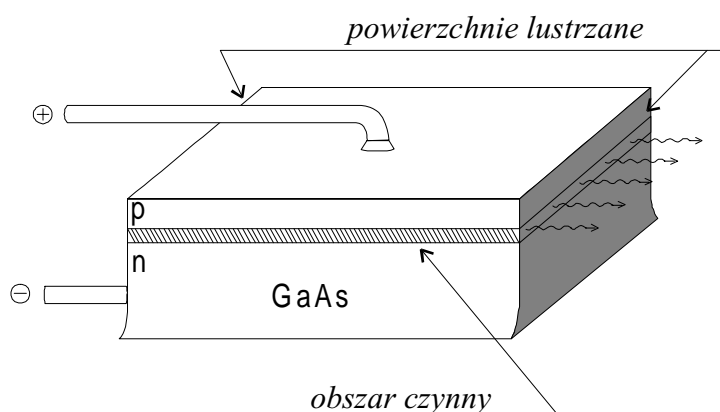
Rys.6.13. Zdegenerowane złącze p-n lasera półprzewodnikowego bez zewnętrznego napięcia (a) i spolaryzowanego w kierunku przewodzenia napięciem $U \geq (W_C - W_V)/q$ (b); w obszarze czynnym rozszczepienie poziomu Fermiego spełnia związek $W_{Fn} - W_{Fp} \geq W_g$

W obszarze czynnym złącza fotony o energiach zawartych w przedziale

$$W_{Fn} - W_{Fp} < \hbar\omega < W_g$$

nie wywołują przejść elektronowych, a zatem nie będą pochłaniane. Przejścia odwrotne, pasmo przewodnictwa-pasmo walencyjne, są dozwolone i będzie występowała emisja fotonów na skutek rekombinacji elektronów i dziur.

Innym istotnym warunkiem zajścia akcji laserowej jest istnienie rezonatora optycznego, rys.6.14.



Rys.6.14. Laser półprzewodnikowy w postaci rezonatora optycznego

Rezonator optyczny jest konieczny dla spełnienia warunku dodatniego sprzężenia zwrotnego. Dwie przeciwległe i równoległe do siebie powierzchnie lustrzane sprawiają, że fotony przebiegają wielokrotnie drogę między zwierciadłami powodując emisję wymuszoną. Zwierciadła nadają również promieniowaniu ściśle określony kierunek.

Charakterystyki laserów półprzewodnikowych można polepszyć stosując zamiast zwykłych złącz p-n, heterozłącza np. typu GaAs-AlGaAs, w wyniku czego uzyskuje się struktury, w których ograniczona jest dyfuzja nośników mniejszościowych. Pozwala to istotnie ograniczyć prąd progowy i zrealizować ciągłą generację w niechłodzonych złączach w temperaturze pokojowej. Stosując mieszane kryształy półprzewodnikowe (CdZnS, CdSSe, InGaAs, AlGaAs, GaAsP, PbSnTe) uzyskuje się lasery promieniujące w pełnym zakresie długości fal z obszaru widzialnego i podczerwieni.

Lasery półprzewodnikowe dzięki swoim zaletom takim jak małe rozmiary, duża sprawność energetyczna, prostota zasilania, łatwość modulacji promieniowania i niskie koszty wytwarzania, znalazły zastosowanie w telekomunikacji światłowodowej, optoelektronice, odtwarzaczach laserowych, zestawach alarmowych, sensorach i wielu innych urządzeniach.