

XII. PRZYRZĄDY FOTONOWE

1 Obszar optyczny widma promieniowania elektromagnetycznego

Oko człowieka odbiera i rozróżnia promieniowanie o długościach fal

$$\sim 400\text{nm} \leq \lambda_{\text{widzialne}} \leq \sim 700\text{nm} , \quad (1)$$

Obszar promieniowania widzialnego odpowiada energiom fotonów w przedziale

$$\sim 3.1\text{eV} \geq h\nu_{\text{widzialne}} \geq \sim 1.77\text{eV} . \quad (2)$$

Przypomnienie:

Długość fali przeliczamy na energię fotonu wg. wzoru

$$h\nu[\text{eV}] = \frac{1.24}{\lambda[\mu\text{m}]} . \quad (3)$$

Promieniowanie nadfioletowe i podczerwone

Do obszaru promieniowania widzialnego przylegają obszary promieniowania:

- **nadfioletowego** o długościach fal

$$\sim 10\text{nm} \leq \lambda_{\text{nadfiolet}} \leq \sim 400\text{nm} , \quad (4)$$

- **podczerwonego** o długościach fal

$$\sim 700\text{nm} \leq \lambda_{\text{podczerwien}} \leq \sim 10^6\text{nm} . \quad (5)$$

Półprzewodnikowe przyrządy fotonowe (stosowane w szeroko rozumianej optyce) działają głównie w zakresie długości fal

$$\sim 300\text{nm} \leq \lambda_{\text{opt}} \leq \sim 1500\text{nm} , \quad (6)$$

czyli od **bliskiego nadfioletu** do **bliskiej podczerwieni**.

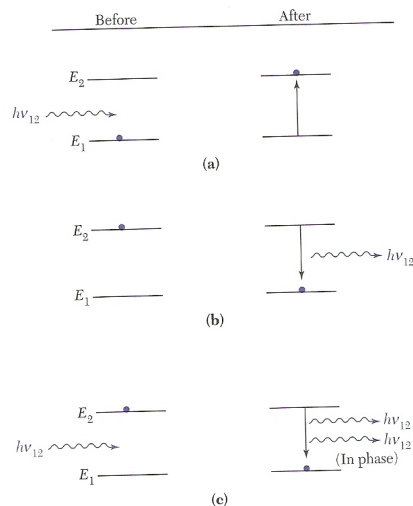
2 Absorpcja i emisja fotonów

Rozważamy procesy absorpcji i emisji fotonu o energii

$$h\nu_{12} = \hbar\omega_{12} = E_2 - E_1 , \quad (7)$$

gdzie E_1 i E_2 są energiami poziomów kwantowych, pomiędzy którymi zachodzą **przejścia promieniste** ($E_2 > E_1$).

W atomach swobodnych oraz w ciałach stałych promieniowanie może być pochłaniane w procesie **absorpcji**, a wysyłane w procesach **emisji spontanicznej i stymulowanej (wymuszonej)**.



Rysunek 1: Schemat procesów (a) absorpcji oraz (b) emisji spontanicznej i (c) emisji stymulowanej fotonu o energii $h\nu_{12} = E_2 - E_1$.

Absorpcja

W wyniku absorpcji fotonu o energii $h\nu_{12}$ elektron przechodzi ze stanu kwantowego o niższej energii E_1 do stanu o wyższej energii E_2 . Zwykle stan o energii E_1 jest **stanem podstawowym układu** (atomu lub ciała stałego).

Szybkość absorpcji $R_{12,abs}$, czyli liczba zaabsorbowanych fotonów w jednostce czasu, jest proporcjonalna do:

- gęstości $\varrho(h\nu_{12})$ padających fotonów o energii $h\nu_{12} = E_2 - E_1$,
- liczby N_1 elektronów obsadzających stan o energii E_1 .

\implies Szybkość absorpcji dana jest wzorem

$$R_{12,abs} = b_{12}N_1\varrho(h\nu_{12}), \quad (8)$$

gdzie b_{12} jest współczynnikiem Einsteina dla absorpcji (jest to prawdopodobieństwo absorpcji pojedynczego fotonu).

Emisja

Istnieją dwa rodzaje emisji:

- (1) **emisja stymulowana (wymuszona),**

(2) emisja spontaniczna.

Emisja stymulowana, podobnie jak absorpcja, zależy od promieniowania padającego.

W analogii do wzoru (8) szybkość emisji stymulowanej zapisujemy jako

$$R_{21,stim} = b_{21}N_2\rho(h\nu_{12}) , \quad (9)$$

gdzie b_{21} jest współczynnikiem Einsteina dla emisji stymulowanej (jest to prawdopodobieństwo emisji wymuszonej pojedynczego fotonu), a N_2 jest liczbą elektronów obsadzających stan o energii E_2 .

Emisja spontaniczna nie zależy od padającego promieniowania.

Szybkość emisji spontanicznej jest proporcjonalna do liczby N_2 elektronów obsadzających stan o energii E_2 , czyli

$$R_{21,spont} = a_{21}N_2 , \quad (10)$$

gdzie a_{21} jest współczynnikiem Einsteina dla emisji spontanicznej (jest to prawdopodobieństwo emisji spontanicznej pojedynczego fotonu).

Procesy promieniste dominujące w przyrządach fotonowych

- emisja spontaniczna w **diodach emitujących światło (LED)**,
- emisja stymulowana w **laserach**,
- absorpcja w **fotodetektorach i ogniwach słonecznych**.

W stanie równowagi liczba fotonów pozostaje stała, a zatem szybkość absorpcji jest równa sumie szybkości obu procesów emisji

$$R_{12,abs} = R_{21,stim} + R_{21,spont} . \quad (11)$$

Równanie (11) przepisujemy jako

$$b_{12}N_1\rho(h\nu_{12}) = b_{21}N_2\rho(h\nu_{12}) + a_{21}N_2 . \quad (12)$$

Na podstawie (12) obliczamy stosunek szybkości emisji stymulowanej do szybkości emisji spontanicznej

$$\frac{R_{21,stim}}{R_{21,spont}} = \frac{b_{21}}{a_{21}}\rho(h\nu_{12}) . \quad (13)$$

\implies W celu wzmocnienia emisji stymulowanej musimy stosować promieniowanie o dużej gęstości fotonów (dużym natężeniu fali świetlnej).

Duża gęstość fotonów jest osiągana w **optycznej wnęce rezonansowej**, którą może być np. **rezonator Fabry-Perota**.

Stosunek szybkości emisji wymuszonej do szybkości absorpcji wg. (12) wynosi

$$\frac{R_{21,stim}}{R_{12,abs}} = \frac{b_{21} N_2}{b_{12} N_1} . \quad (14)$$

Zwykle $b_{21} = b_{12}$, a zatem otrzymujemy następujący **warunek dominowania emisji wymuszonej nad absorpcją**:

$$\frac{N_2}{N_1} > 1 , \quad (15)$$

który oznacza, że liczba elektronów w stanie wzbudzonym musi być większa od liczby elektronów w stanie podstawowym.[†]

[†]W półprzewodnikach liczby N_1 i N_2 odnoszą się do liczb obsadzeń przez elektrony pasma walencyjnego i przewodnictwa, natomiast w gazach są to liczby atomów w stanie podstawowym i wzbudzonym.

Warunek (15) jest **warunkiem koniecznym wystąpienia akcji laserowej**.

Inaczej jest to warunek **wystąpienia inwersji obsadzeń**.

Dla układu atomów w stanie równowagi termicznej obsadzenie N stanu o energii E może być przedstawione za pomocą rozkładu Boltzmanna

$$N(E) = const e^{-E/k_B T} . \quad (16)$$

Stosunek (15) liczb obsadzeń określony jest zatem przez

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2-E_1)/k_B T} = e^{-h\nu_{12}/k_B T} . \quad (17)$$

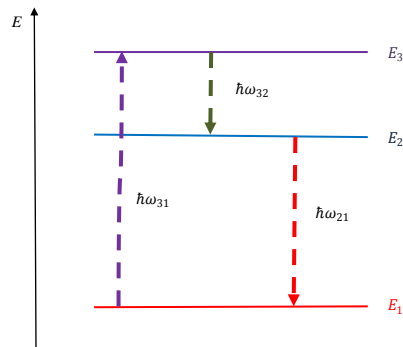
W równowadze termicznej obsadzane są w większości stany o energii niższej (E_1). Inwersja obsadzeń występuje, gdy stany o energii wyższej (E_2) są częściej obsadzane.

⇒ Akcja laserowa zachodzi, gdy układ nie jest w stanie równowagi termicznej.

Stymulowany charakter emisji światła laserowego powoduje, że fotony emitowane przez laser posiadają **własności identyczne** z tymi, które posiada foton padający. Są to:

- (1) **częstość,**
- (2) **polaryzacja,**
- (3) **kierunek rozchodzenia się,**
- (4) **faza.**

⇒ Proces emisji stymulowanej jest procesem **spójnym (koherentnym)**.



Rysunek 2: Trójpoziomowy schemat akcji laserowej.

3 Lasery

Wyjaśnienie nazwy

LASER = Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation

Lasery jest **przyrządem wzmacniającym światło**, w którym wypadkowa emisja przeważa nad wypadkową absorpcją. Podstawowym procesem emisji w laserze jest emisja stymulowana, natomiast prawdopodobieństwo emisji spontanicznej jest zanedbywalnie małe.

Wzmocnienie światła polega na tym, że natężenie światła emitowanego (liczba fotonów emitowanych) przez laser jest znacznie większa od natężenia światła padającego (liczby fotonów padających).

Zgodnie ze schematem trójpoziomowym układ (atom, kryształ) pochłania promieniowanie o częstotliwości ω_{31} i przechodzi ze stanu (zwykle podstawowego) o energii E_1 do stanu wzbudzonego o energii E_3 . Proces ten nazywamy **pompowaniem optycznym**.

Czas życia stanu (3) jest bardzo krótki (jest to stan metastabilny), natomiast stan wzbudzony (2) posiada długi czas życia. Układ w stanie (3) szybko emituje foton o energii $\hbar\omega_{32}$ przechodząc do długożyciowego stanu (2).

⇒ Obsadzenie stanu (2) rośnie, aż spełniony zostanie warunek (15) wystąpienia akcji laserowej.

⇒ Układ emituje spójne promieniowanie laserowe o dużym natężeniu.

Promieniowanie laserowe uwięzione jest we wnęce (rezonatorze Fabry-Perot), którą stanowią dwa płaskie zwierciadła, pomiędzy którymi wytwarzane są fale stojące.

Aby promieniowanie mogło wydostać się na zewnątrz, jedno ze zwierciadeł jest półprzepuszczalne.

3.1 Lasery gazowe

Wybrane typy laserów gazowych:

- laser helowo-neonowy (He-Ne): emituje światło o długości fali $\lambda = 543$ nm lub 633 nm
- laser argonowy (Ar): $\lambda = 458$ nm, 488 nm lub 514.5 nm
- laser kryptonowy (Kr) jonowy: $\lambda = 647.1$ nm lub 676.4 nm
- laser na dwutlenku węgla: $\lambda = 10.6$ μm

3.2 Lasery krystaliczne

Wybrane typy laserów krystalicznych:

- laser rubinowy (substancją czynną jest rubin $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{+3}$, $\lambda = 694.3$ nm)
 - **pierwszy laser skonstruowany przez Theodore'a Maimana w roku 1960**
- lasery na YAG-u (neodymowy, erbowy, tulowy holmowy) YAG = $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ = syntetyczny granat itrowo-glinowy (Yttrium-Aluminum Garnet)
 $\lambda = \sim 1000 \div \sim 2000$ nm

3.3 Lasery półprzewodnikowe

W laserach półprzewodnikowych

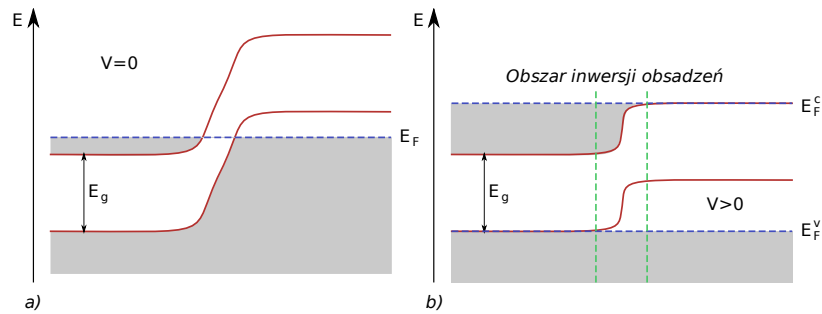
$$E_2 > E_{c,min} , \quad E_1 < E_{v,max} ,$$

czyli emitowane są fotony o energiach z zakresu

$$E_g < h\nu < E_{F,c} - E_{F,v} , \quad (18)$$

gdzie $E_{F,c}$ ($E_{F,v}$) jest poziomem Fermiego pasma przewodnictwa (walencyjnego).

W silnie domieszkowanej heterostrukturze *pn* dno pasma przewodnictwa warstwy *n* leży poniżej pułapu pasma walencyjnego warstwy *p*. Jeżeli napięcie zewnętrzne $V = 0$, to oba pasma wypełnione są elektronami do wspólnego poziomu Fermiego E_F . Po przyłożeniu napięcia V w kierunku przewodzenia ($V > 0$) powstaje **inwersja obsadzeń** w wąskiej warstwie złączonej. Źródło prądu o napięciu V dostarcza nośniki ładunku w sposób ciągły, co prowadzi do podtrzymywania inwersji obsadzeń. W wyniku rekombinacji par elektron-dziura w obszarze złącza powstają fotony, które z kolei prowadzą do stymulowanej emisji i akcji laserowej.



Rysunek 3: Realizacja inwersji obsadzeń w półprzewodnikowym złączu np . Obszar typu n (p) znajduje się po lewej (prawej) stronie schematu. Lewy rysunek: $V = 0$, prawy rysunek: $V > 0$ (napięcie przyłożone w kierunku przewodzenia).

W celu uzyskania ciągłej akcji laserowej układ emitujący fotony umieszczony jest we wnęce rezonującej (rezonator Fabry-Perota), która posiada ścianki silnie odbijające promieniowanie. W rezonatorze tym emitowane fotony są reabsorbowane przez półprzewodnik, co prowadzi do rekreacji pary elektron-dziura, która następnie ulega rekombinacji wnosząc wkład do kolejnego procesu emisji stymulowanej.

Cykl ten powtarza się wielokrotnie, co prowadzi do rezonansowego wzmocnienia optycznego.

Schematy budowy i działania laserów półprzewodnikowych

Laser typu nip

Obszarem czynnym w laserze typu nip jest izolator (i) (zwykle jest to czysty GaAs o własnościach półizolujących), który jest umieszczony pomiędzy dwiema warstwami silnie domieszkowanego AlGaAs, jednej typu n , drugiej typu p .

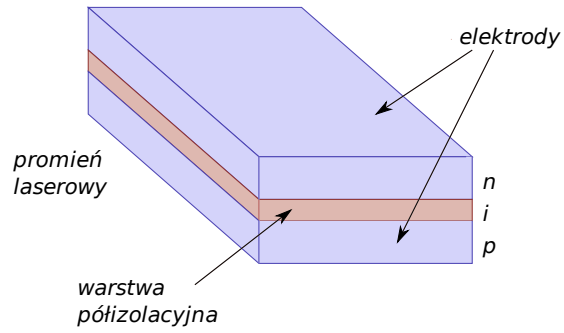
Lasery na złączu pn

Lasery na bazie studni kwantowej

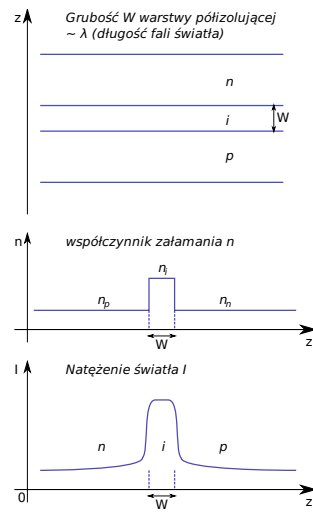
Laser na bazie heterostruktury złożonej z wielu studni kwantowych

Do budowy laserów na bazie studni kwantowej używane są najczęściej heterostruktury typu bariera/studnia:

- AlGaAs/GaAs
- GaAs/InGaAs



Rysunek 4: Schemat budowy lasera typu *nip*.



Rysunek 5: Laser typu *nip*: przekrój i własności optyczne warstw.

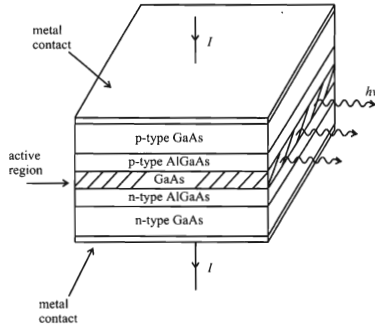
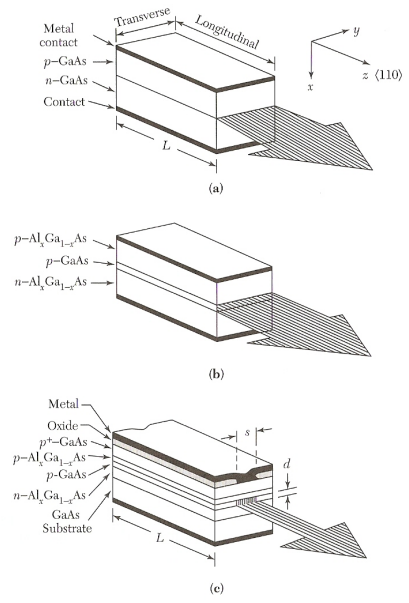
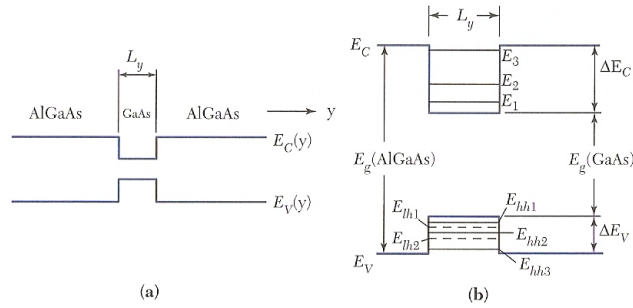


Figure 13.3.1. Schematic drawing of a p - n double-heterojunction laser.

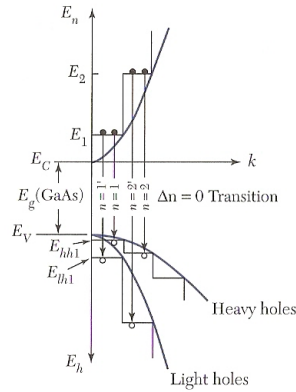
Rysunek 6: Schemat budowy lasera zawierającego heterostrukturę pn .



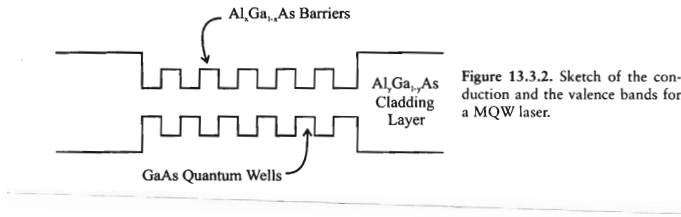
Rysunek 7: Schematy budowy podstawowych struktur laserów na złączu pn . (a) Laser na homozłączu pn , (b) laser na podwójnym heterozłączu, (c) paskowa geometria lasera na podwójnym heterozłączu.



Rysunek 8: Laser na bazie studni kwantowej. (a) Profil energii potencjalnej, (b) dyskretne poziomy energetyczne w studniach kwantowych dla elektronów w pasmie przewodnictwa i dziur w pasmie walencyjnym.



Rysunek 9: Laser na bazie studni kwantowej. Uwięzienie elektronów (dziur) w studni kwantowej w pasmie przewodnictwa (walencyjnym) prowadzi do powstanie stanów kwantowych o dyskretnych poziomach energetycznych. Gęstość i obsadzenie tych stanów zmienia się w sposób schodkowy, co powoduje, że przejścia promienne zachodzą pomiędzy stanami o dobrze określonych energiach, np. E_1 w pasmie przewodnictwa i E_{hh1} w pasmie walencyjnym.



Rysunek 10: Schemat potencjału uwięzienia w strukturze wielokrotnej studni kwantowej.

Typowe szerokości studni kwantowej: $\simeq 1 \div 10$ nm.

Lasery na bazie heterostruktury modulowanej

Stosowane w tych laserach modulowane domieszkowanie prowadzi do stopniowej zmiany współczynnika załamania światła i powstania lejkowatego obszaru czynnego optycznie.

Lasery niebieskie i fioletowe na bazie GaN

Ze względu na szerokie zastosowanie laserów do zapisu informacji, np. na płytach CD i DVD, istotne jest otrzymanie możliwie dużej gęstości upakowania zapisanej informacji. Dla plamki promienia laserowego o średnicy $d \simeq \lambda$ (λ = długość fali promieniowania) gęstość zapisu informacji na płycie CD jest rzędu

$$\sim \frac{1}{\lambda^2}.$$

\implies Korzystne jest stosowanie promieniowania o małej długości fali (dużej energii fotonu).

\implies Lasery niebieskie i fioletowe na GaN (półprzewodnik o szerokiej przerwie energetycznej $E_g \simeq 3$ eV).

Budowa laserów na bazie GaN: struktura warstwowa

- (1) podłoże szafirowe: niedopasowanie stałych sieciowych $\sim 16\%$, gęstość dyslokacji $\leq 10^{10}$ cm⁻², Szafir = kryształ trójtlenku glinu Al₂O₃ domieszkowanego jonami metali (Fe, Ti, Cr, V)
 - pierwsza realizacja komercyjna: Nakamura (2001) w laboratorium Nochia (Japonia)
- (2) GaN/GaN: metoda MOCVD, gęstość dyslokacji $\leq 10^4$ cm⁻², pierwsza realizacja laboratoryjna: Unipress, Warszawa (2001)

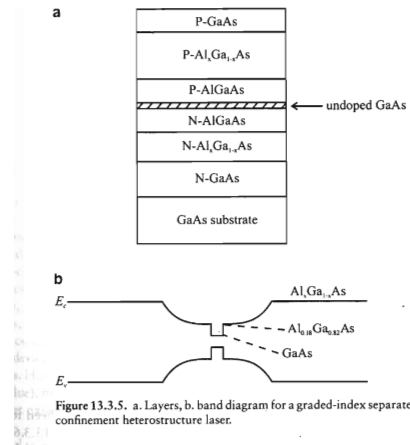


Figure 13.3.5. a. Layers, b. band diagram for a graded-index separate confinement heterostructure laser.

Rysunek 11: (a) Schemat warstw, (b) profil potencjału uwięzienia w heterostrukturze modulowanej.

4 Dioda elektroluminescencyjna (dioda świecąca, LED)

Dioda elektroluminescencyjna (dioda świecąca, Light-Emitting Diode = LED) jest przyrządem zbudowanym na bazie złącza *pn*, który może wysyłać promieniowanie w procesach spontanicznej emisji. Promieniowanie wysyłane należy do zakresu widzialnego, nadfioletowego lub podczerwonego.

Energia potrzebna do emisji promieniowania dostarczana jest z zewnętrznego źródła napięcia, które powoduje obsadzenie pasma przewodnictwa (walencyjnego) nadmiarowymi elektronami (dziurami).

Zjawisko emisji promieniowania zachodzące w wyniku dostarczenia energii przez pole elektryczne nazywamy **elektroluminescencją**.

W diodzie elektroluminescencyjnej emisja promieniowania jest najbardziej efektywna, gdy złącze *pn* jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Wtedy elektrony płynące z obszaru *n* do obszaru *p* napotykały dziury w obszarze *p* i zachodzi rekombinacja elektron-dziura o dużej efektywności.

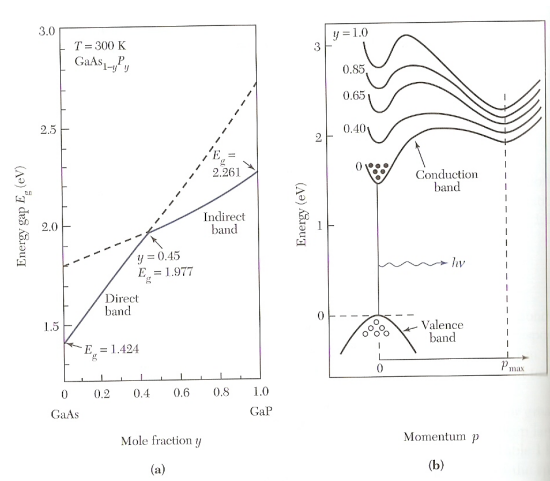
W obszarze złącza *pn* zachodzi rekombinacja pary elektron-dziura, co prowadzi do emisji fotonu o energii

$$E = h\nu \simeq E_g, \quad (19)$$

a zatem emitowany foton posiada długość fali

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}. \quad (20)$$

W zależności od półprzewodnika użytego do budowy diody LED światło emitowane przez diodę może mieć następującą barwę:



Rysunek 12: (a) Zależność przerwy energetycznej E_g od składu stopu $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$. Dla $y = 0.45$ przerwa energetyczna zmienia się z prostej na skośną. (b) Elektronowa struktura pasmowa dla różnych y . Pokazane jest obsadzenie elektronami (dziurami) dna pasma przewodnictwa (pułapu pasma walencyjnego).

- **czerwoną** dla $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ i $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$,
- **zieloną** dla GaP ,
- **niebieską** dla GaN .

Użycie elementu świecącego złożonego z trzech diod LED, emitujących światło czerwone, zielone i niebieskie, jest podstawą konstrukcji **lampy LED** (nie żarówki !!!) emitującej **światło białe** wskutek zmieszania światła czerwonego, zielonego i niebieskiego.

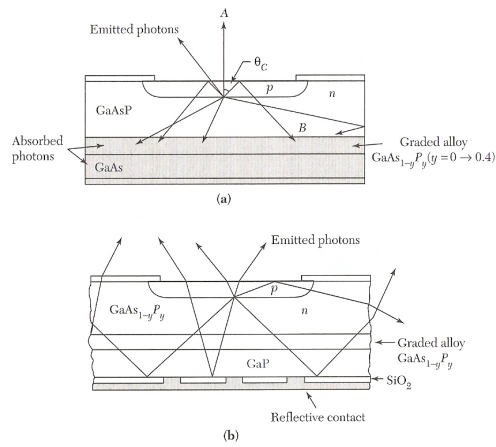
Odkrycie niebieskiej diody LED na bazie GaN zostało uhonorowane w 2014 roku nagrodą Nobla, przyznanej trzem fizykom (Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura).

Odkrycie i konstrukcja niebieskiej diody LED (dokonane w latach 1990) umożliwiły budowę **lampy LED** emitującej **światło białe** w skutek zmieszania światła czerwonego, zielonego i niebieskiego.

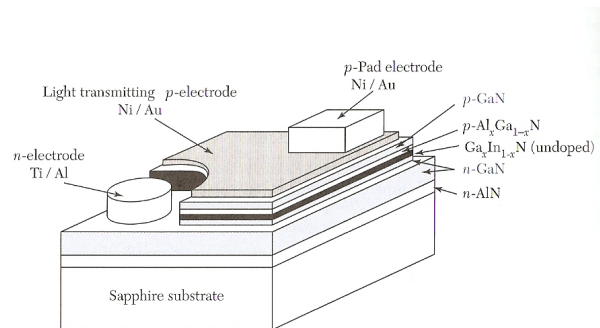
Znaczenie tego odkrycia:

Przewiduje się, że w pełni efektywne zastosowanie lamp LED do oświetlenia zmniejszy w przyszłości zużycie energii elektrycznej potrzebnej do oświetlenia od 5 do 10 razy.

Dla porównania obecnie światowe zużycie energii elektrycznej do oświetlenia wynosi 20%.



Rysunek 13: Podstawowa struktura płaskiej diody LED na podkładzie: (a) nieprzeźroczystym ($\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$), (b) przeźroczystym (GaP). Fotony emitowane są w obszarze złącza pn .



Rysunek 14: Schemat diody LED zbudowanej z azotków, która powstała w procesie wzrostu na podłożu szafirowym.

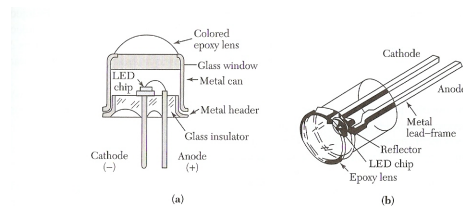
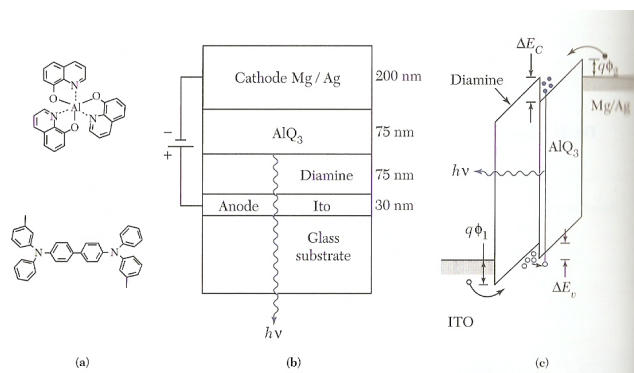


Fig. 11 Diagrams of two LED lamps.⁸

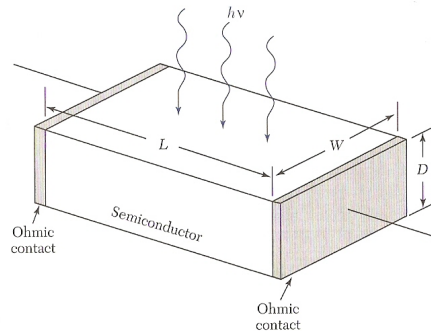


Fig. 12 LED display formats for numeric and alphanumeric: (a) 7-segment (numeric); (b) 5 × 7 array (alphanumeric).⁸

Rysunek 15: Fig. 11: Schematy dwóch źródeł światła na bazie LED. Fig. 12: Wyświetlacze LED: (a) numeryczny (7-segmentowy), (b) alfanumeryczny (5 × 7).



Rysunek 16: Organiczna dioda LED (Organic LED = OLED). (a) Półprzewodniki organiczne, (b) przekrój struktury, (c) schemat pasm.



Rysunek 17: Schemat budowy fotoprzewodnika.

5 Fotodetektory

Fotodetektor jest przyrządem półprzewodnikowym, który może przekształcać sygnały optyczne w sygnały elektryczne.

Działanie fotodetektora:

- (1) generacja nośników ładunku przez padające promieniowanie (procesy absorpcji fotonów),
- (2) transport nośników ładunku i/lub ich powielenie przez mechanizm wzmacniania prądu,
- (3) powstały prąd generuje sygnał wyjściowy, który podlega detekcji elektronicznej.

Budowa fotodetektora

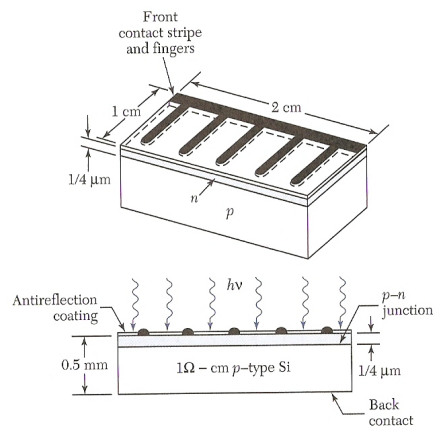
Podstawowym elementem fotodetektora jest **fotoprzewodnik**, która zawiera płytkę półprzewodnika z kontaktami omowymi dołączonymi do obu końców.

6 Ogniwa słoneczne

Podstawowym elementem ogniwa słonecznego jest złącze *pn*. Gdy ogniwo zostanie oświetlone światłem słonecznym, fotony o energiach $h\nu > E_g$ powodują kreację par elektron-dziura.

Do kreacji pary elektron-dziura potrzebna jest energia $E = E_g$, a nadwyżka energii $\Delta E = h\nu - E_g$ zamienia się na energię kinetyczną nośników ładunku.

W obszarze złącza *pn* na nośniki działa pole elektryczne, pochodzące od napięcia wbudowanego. Pole to powoduje przemieszczenie elektronów do obszaru *n*, a dziur do obszaru *p*, czyli nośniki zostają rozdzielone. Rozdzielenie elektronów i dziur prowadzi do powstania **zewnętrznego napięcia elektrycznego**.



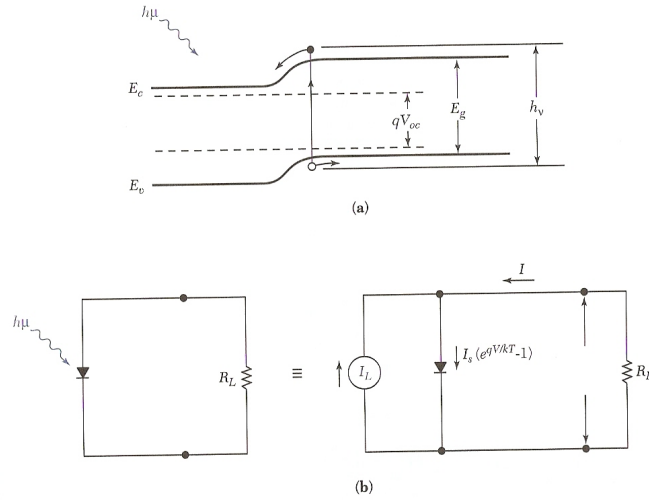
Rysunek 18: Schemat budowy ogniwa słonecznego na bazie złącza pn w krzemie.

Elektrony w obszarze n (dziury w obszarze p) są nośnikami większościowymi, a napięcie wbudowane na złączu pn jest stałe, a zatem generowane napięcie zewnętrzne jest stabilne, czyli przyrząd działa jak **ogniwo elektryczne**.

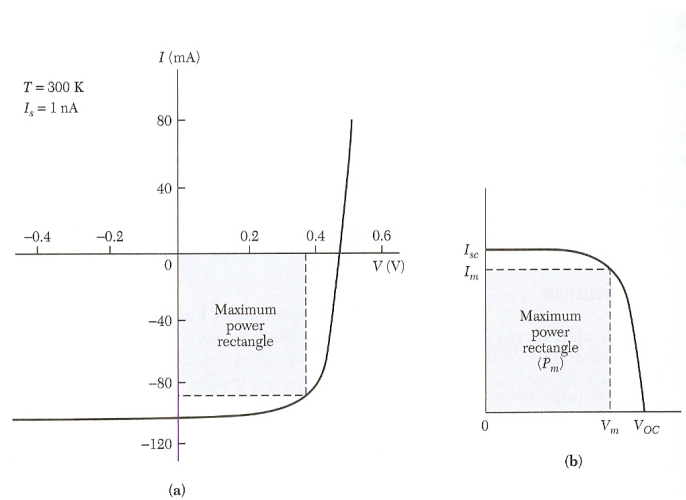
Typowe ogniwo słoneczne (**fotootniwo**) składa się ze złącza pn utworzonego w pobliżu powierzchni przyrządu, pasków kontaktów omowych, kontaktu omowego w podłożu oraz warstwy antyrefleksyjnej na powierzchni przyrządu.

Zastosowanie:

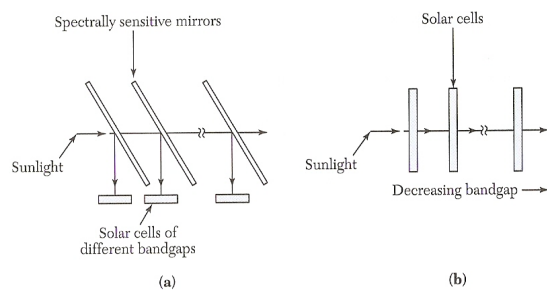
- zasilanie urządzeń elektronicznych (np. zegarki, kalkulatory),
- zasilanie pojazdów kosmicznych,
- oświetlenie znaków drogowych i wspomaganie sygnalizacji świetlnej,
- zasilanie w prąd elektryczny domów,
- elektrownie słoneczne.



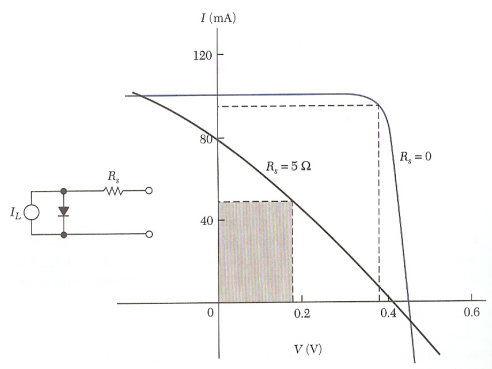
Rysunek 19: (a) Profil energii potencjalnej w złączu pn stosowanym w ogniwie słonecznym. (b) Wyidealizowany zastępczy obwód elektryczny ogniwa słonecznego.



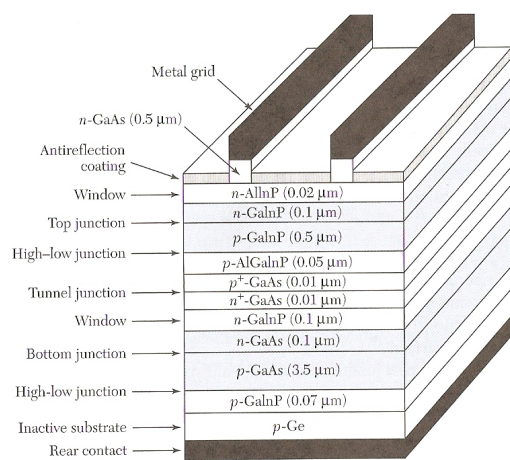
Rysunek 20: (a) Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa słonecznego po naświetleniu. (b) Odbicie rysunku (a) względem osi napięcia. Maksymalna moc tego typu ogniwa wynosi $P_m = I_m V_m$, a maksymalna wydajność = 30%.



Rysunek 21: Układ ogniw słonecznych rozszczepiających widmo promieniowania na wąskie pasma o różnych energiach fotonów. Wydajność tego układu może osiągać 60%.



Rysunek 22: Charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa słonecznego bez oporu szeregowego ($R_s = 0$) i z uwzględnieniem oporu szeregowego ($R_s = 5\Omega$). Widać spadek mocy maksymalnej ogniwa wskutek oporu elektrycznego obwodu.



Rysunek 23: Schemat wielowarstwowego ogniwa słonecznego o wydajności ~30 %.