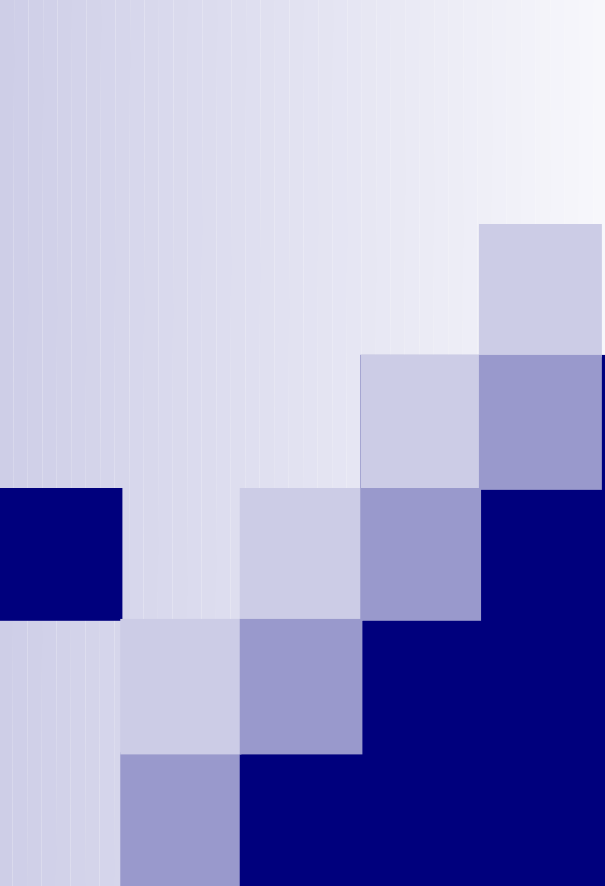


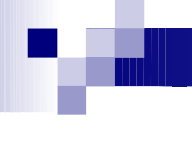


Kryształy, półprzewodniki, nanotechnologie.

Dr inż. KAROL STRZAŁKOWSKI
Instytut Fizyki UMK w Toruniu
skaroll@fizyka.umk.pl

Plan ogólny

- Krysztály, półprzewodniki, nanotechnologie, czyli czym będziemy się zajmować.
- Budowa materii - pojęcie atomu.
- Co to są krysztály i jak powstają.
- Krysztály półprzewodnikowe - właściwości.
- Nanowymiarowe struktury półprzewodnikowe.
- Metody badań nanoukładów.
- Nanotechnologie - jaka przyszłość ?



Wykład V.

Nanowymiarowe struktury półprzewodnikowe.

Kryształy półprzewodnikowe - struktury.

- Złącze p-n.
- Dioda elektroluminescencyjna LED.
- Ogniwa słoneczne - fotowoltaika.
- Laser - zasada działania.
- Laser półprzewodnikowy.
- Zastosowania diod LED i laserów.
- Tranzystory n-p-n oraz p-n-p i ich zastosowania.
- Podsumowanie.

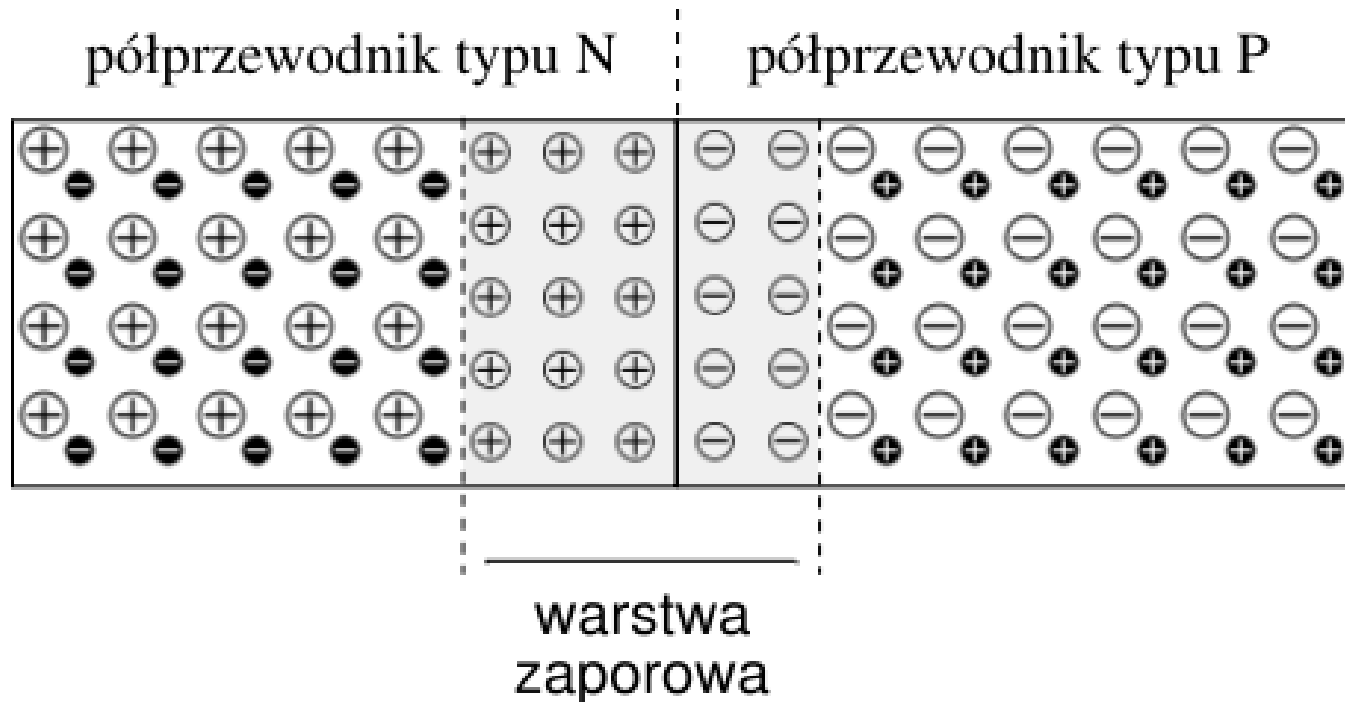
Złącze p-n.

- Złączem p-n nazywane jest złącze dwóch półprzewodników niesamoistnych o różnych typach przewodnictwa: p i n.
- Nośniki większościowe i mniejszościowe.
- Atomy domieszek (donory) pozostają unieruchomione w siatce krystalicznej.
- Obszar o mniejszej koncentracji domieszek znajdujący się pomiędzy kontaktem złącza a warstwą zubożoną nazywany jest bazą.
- Złącze p-n charakteryzuje się pewną pojemnością elektryczną.

Złącze p-n niespolaryzowane.

- W stanie równowagi termodynamicznej tj. gdy z zewnątrz nie przyłożono żadnego pola elektrycznego
- Dyfuzja i rekombinacja nośników (elektronów i dziur).
- W pobliżu złącza powstaje warstwa ładunku przestrzennego, nazywana też warstwą warstwą zaporową.
- Przepływ nośników większościowych praktycznie ustaje.
- Pole elektryczne ładunku przestrzennego jest reprezentowane przez barierę potencjału.
- Dla krzemu napięcie to w temperaturze pokojowej ma wartość rzędu 0.6 - 0.8 V.
- Napięcie dyfuzyjne zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury o ok. 2.3 mV/K.

Złącze p-n niespolaryzowane.



$\oplus$ jon dodatni

$\ominus$ jon ujemny

$\oplus$ domieszka donorowa (jon+elektron)

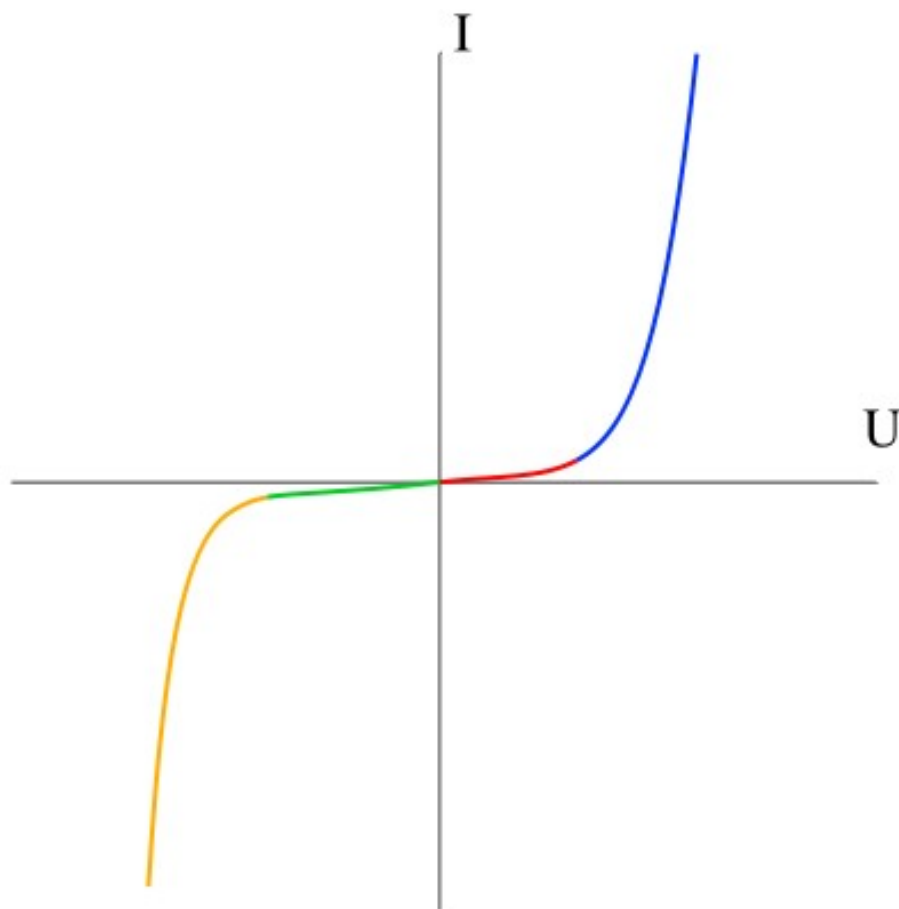
$\ominus$ domieszka akceptorowa (jon+dziura)

Polaryzacja złącza p-n.

- Jeśli do złącza zostanie przyłożone napięcie zewnętrzne, wówczas równowaga zostanie zaburzona.
- Polaryzacja w kierunku przewodzenia, wówczas dodatni biegun napięcia jest dołączony do obszaru p.
- Polaryzacja w kierunku zaporowym, wówczas dodatni biegun napięcia jest dołączany do obszaru n.
- Gdy U przekroczy wartość napięcia dyfuzyjnego, wówczas obszar zubożony znika i praktycznie bez przeszkód następuje dyfuzja nośników – przez złącze płynie prąd.

Charakterystyka prądowo-napięciowa I-V.

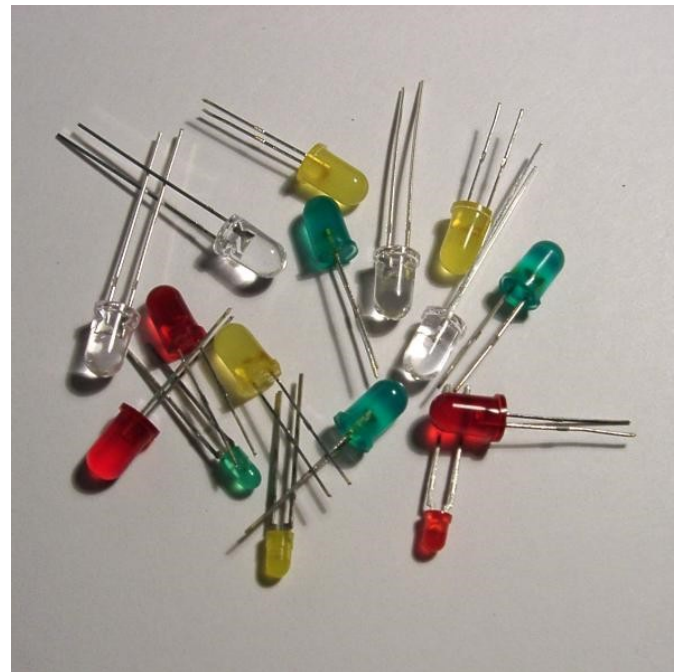
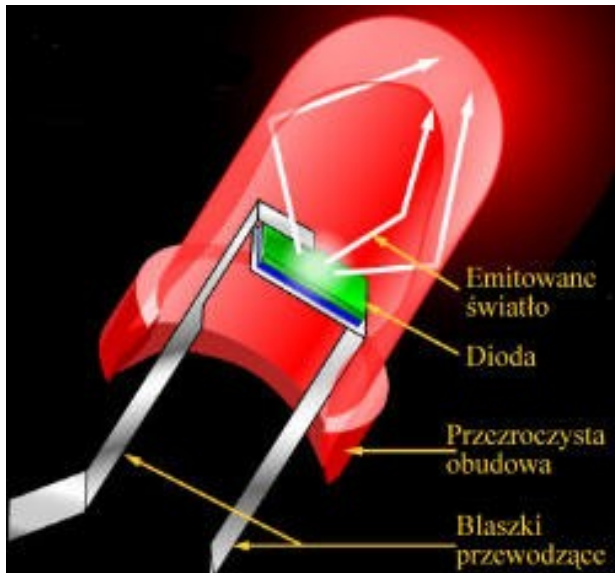
- Zależność prądu płynącego przez złącze od napięcia.
- Charakterystyczne zakresy pracy złącza oznaczone są różnymi kolorami.



Dioda elektroluminescencyjna LED.

- Zaliczana do półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowanie w zakresie światła widzialnego i podczerwieni.
- Do produkcji weszła w latach sześćdziesiątych w formie opracowanej przez amerykańskiego inżyniera Nicka Holonyaka juniora, który jest uważany za jej wynalazcę.
- Radziecki technik radiowy Oleg Władimirowicz Łosew zauważył, że diody używane w odbiornikach radiowych emitują światło.
- Działanie diody elektroluminescencyjnej (LED) opiera się na zjawisku rekombinacji nośników ładunku (rekombinacja promienista).

Diody elektroluminescencyjne.



Dioda elektroluminescencyjna LED.

- W krzemie i germanie dominują przejścia skośne - słabe świecenie.
- Półprzewodniki mieszane, np. GaAs - przejścia proste - wydajna luminescencja.
- W diodzie LED mamy do czynienia z tzw. elektroluminescencją, przy wytworzeniu której źródłem energii pobudzającej jest prąd elektryczny.
- LED = świecące złącze p-n !
- Barwa promieniowania emitowanego przez diody LED zależy od materiału półprzewodnikowego są to barwy: niebieska, żółta, zielona, pomarańczowa, czerwona.
- Białe diody LED !

Dioda LED - struktura.

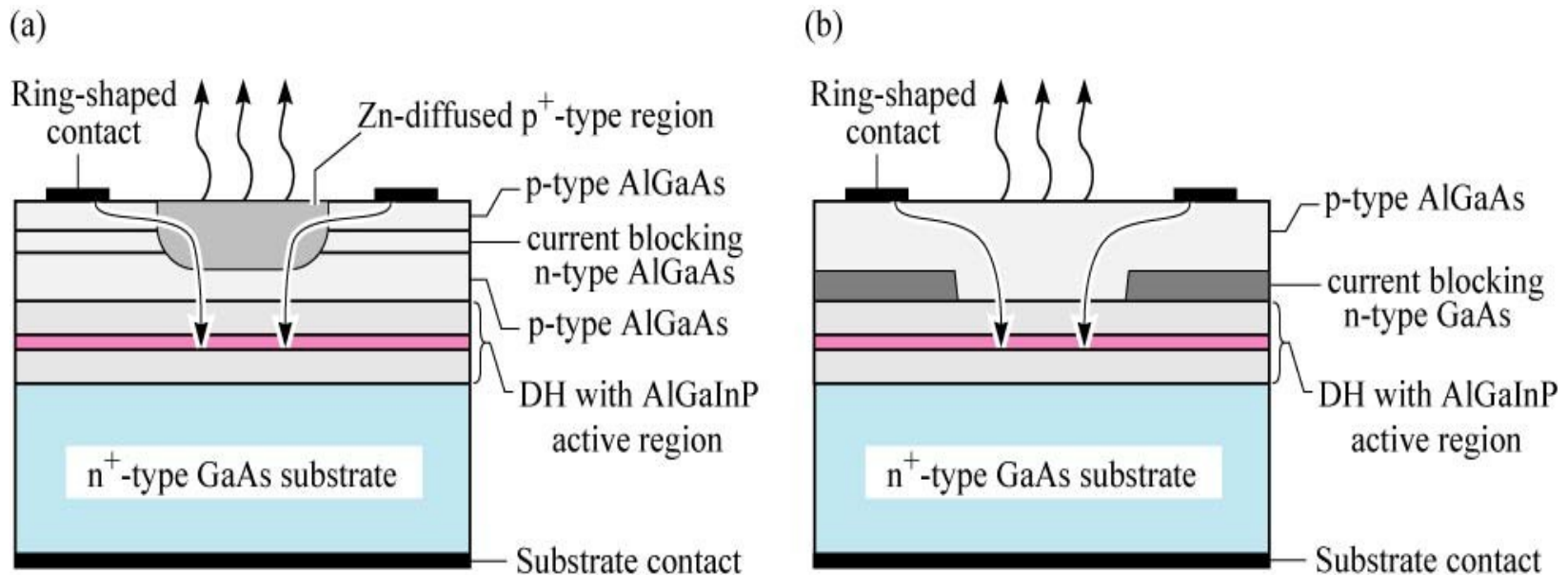


Fig. 23.5. AlGaInP/GaAs LED structures emitting at 650 nm for plastic optical fiber communications. Both LED structures funnel the current to the center of the active region where the emitted light is not obstructed by the top metal contact ring. (a) Structure using an n-type AlGaAs current blocking layer and a p⁺-type diffusion region. (b) Structure fabricated by epitaxial regrowth using an n-type GaAs current blocking layer.

Zalety diod LED.

- Mały pobór prądu - ekonomiczne.
- Mała wartość napięcia zasilającego.
- Duża sprawność w porównaniu do konwencjonalnej żarówki.
- Mała moc strat.
- Małe rozmiary.
- Duża trwałość, ponad 10 tys. godzin.
- Duża wartość luminacji.

Zastosowania diod LED.

- IR - emitujące promieniowanie podczerwone - wykorzystywane w łączach światłowodowych, a także w urządzeniach zdalnego sterowania.
- HBLED, High Brightness LED - diody o wysokiej jasności świecenia; za takie uważa się, których jasność przekracza 0.2 cd; znajdują one zastosowanie w miejscach, gdzie zwykle używa się tradycyjnych źródeł światła - w sygnalizacji ulicznej, w oświetleniu pojazdów, w latarkach.
- RGB LED - dioda mająca struktury do generowania trzech podstawowych barw (czerwony, zielony, niebieski), a co za tym idzie, przez możliwość ich mieszania, praktycznie dowolnej barwy.
- Warm white LED - LED generująca światło bardzo zbliżone do światła żarówki (temperatura barwy 3500 K).

Zastosowania diod LED.



Żarówki LED.



Telewizory LED.



Ogniwa słoneczne - fotowoltaika.

- Fotowoltaika - wytwarzanie prądu elektrycznego z promieniowania słonecznego przy wykorzystaniu zjawiska fotowoltaicznego.
- Fotowoltaika znajduje obecnie zastosowanie, mimo stosunkowo wysokich kosztów, w porównaniu z tzw. źródłami konwencjonalnymi, z dwóch głównych powodów: ekologicznych (wszędzie tam, gdzie ekologia ma większe znaczenie niż ekonomia), oraz praktycznych (promieniowanie słoneczne jest praktycznie wszędzie dostępne).
- Fotowoltaika, jako dziedzina zajmująca się wytwarzaniem energii elektrycznej ze źródła odnawialnego, za jakie w czasowej mikroskali zwykliśmy uważać Słońce, obecnie bardzo dynamicznie się rozwija i należy przypuszczać, że w niedalekiej przyszłości będzie coraz powszechniej stosowana.

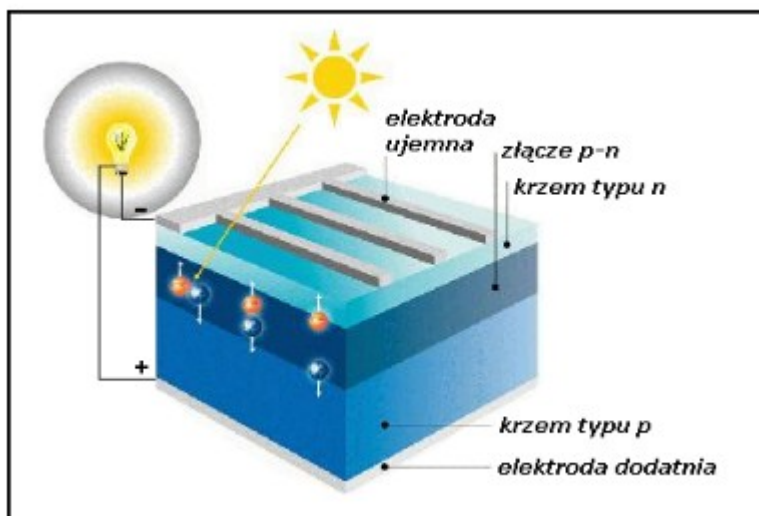
Zjawisko fotowoltaiczne.

- Fotowoltaiczne zjawisko, powstawanie siły elektromotorycznej (SEM) w niejednorodnym półprzewodniku np. na złączu dwóch rodzajów półprzewodników lub metalu i półprzewodnika pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.
- W złączu p-n na skutek pochłonięcia energii świetlnej tworzą się dodatkowe nośniki prądu (elektrony i dziury) i następuje na skutek dyfuzji rozdzielenie dziur do obszaru p, a elektronów do obszaru n, co powoduje powstanie różnicy potencjałów na granicy półprzewodników.
- Siła elektromotoryczna powstaje również w półprzewodniku jednorodnym na skutek różnicy prędkości z jaką dyfundują elektrony i dziury w głąb półprzewodnika po ich powstaniu w obszarze przypowierzchniowym.

Ogniwa słoneczne - produkcja.

- Głównym surowcem do produkcji ogniw fotowoltaicznych jest krzem, lecz nie amorficzny, ale krystaliczny.
- Pojedyncze ogniwo jest w stanie wygenerować prąd o mocy 1-6,97 W. Ogniwa są najczęściej produkowane w panelach o powierzchni 0,2 - 1,0 m².
- Duża żywotność, szacowana na około 30 lat.
- Źródło zasilania samodzielnych urządzeń np. boi sygnalizacyjnych, świateł drogowych itp. Zaczynają również docierać do budowli i budynków, zwłaszcza tych oddalonych od sieci energetycznych.

Ogniwa słoneczne.



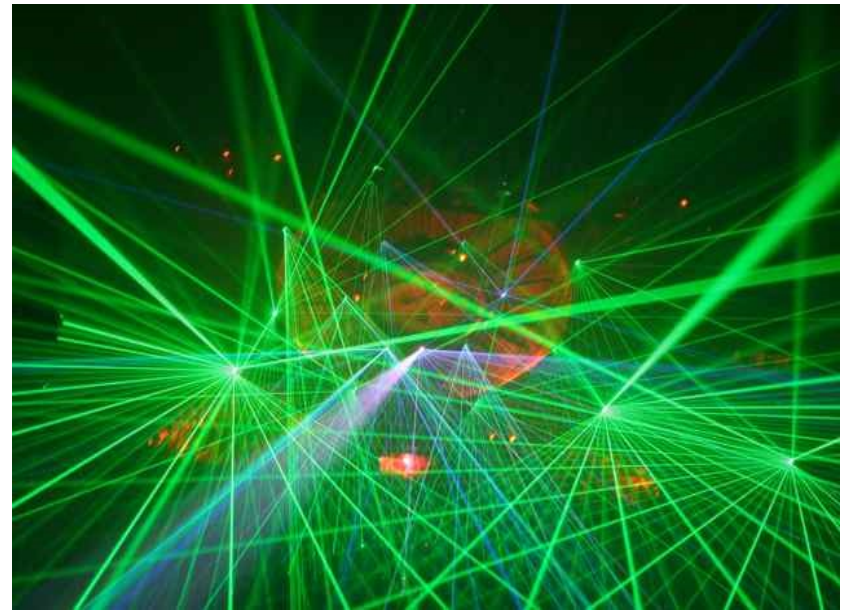
Laser - zasada działania

- Laser - nazwa utworzona jako akronim od Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Jest to generator światła, wykorzystujący zjawisko emisji wymuszonej.
- Bardzo mała szerokość linii emisyjnej, wiązka spolaryzowana, spójna w czasie i przestrzeni oraz o bardzo małej rozbieżności.
- W laserach impulsowych można uzyskać bardzo dużą moc w impulsie oraz szybkie narastanie impulsu.

Laser - zasada działania

- Zasadniczymi częściami lasera są: ośrodek czynny, rezonator optyczny, układ pompujący.
- Układ pompujący dostarcza energię do ośrodka czynnego, w ośrodku czynnym w odpowiednich warunkach zachodzi akcja laserowa, czyli kwantowe wzmacnianie (powielanie) fotonów, a układ optyczny umożliwia wybranie odpowiednich fotonów.
- Wzbudzenie, inwersja obsadzeń, poziom metatrwały - układ trójpoziomowy.
- Emisja spontaniczna oraz wymuszona, rezonator.

Lasery.



Laser półprzewodnikowy.

- Są to najbardziej perspektywiczne lasery z punktu widzenia ich zastosowań w fotonice ze względu na małe wymiary, dość wysokie moce, możliwość uzyskania promieniowania od pasma bliskiej podczerwieni do skraju fioletowego pasma widzialnego.
- Laser ten jest wielowarstwową strukturą półprzewodników typu n i p.
- Przejście elektronu do pasma przewodzenia na skutek zasilania prądem (pompowanie) połączone jest z odwrotnym procesem spontanicznym, zwanym radiacyjnym procesem rekombinacji. Proces ten prowadzi do uwolnienia fotonu.
- Przy dostatecznie dużym prądzie może powstać inwersja obsadzeń, pozwalająca wywołać akcję laserową. Zewnętrzne ścianki falowodu tworzą rezonatory Fabry'ego-Perota.

Laser półprzewodnikowy.

- Laser półprzewodnikowy (laser diodowy, dioda laserowa) - laser, którego obszarem czynnym jest półprzewodnik. Najczęściej laser półprzewodnikowy ma postać złącza p-n i obszar czynny jest pompowany przez przepływający przez złącze prąd elektryczny.
- Pierwsze lasery półprzewodnikowe powstały niemal równocześnie w 1962 w czterech laboratoriach amerykańskich i jednym radzieckim.
- W większości z tych laserów złącze wykonane było z arsenku galu. W jednym przypadku był to fosforo-arsenek galu.
- Pierwszy laser półprzewodnikowy w Polsce został wykonany w 1966 przez Bohdana Mroziwicza w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Lasery półprzewodnikowe.

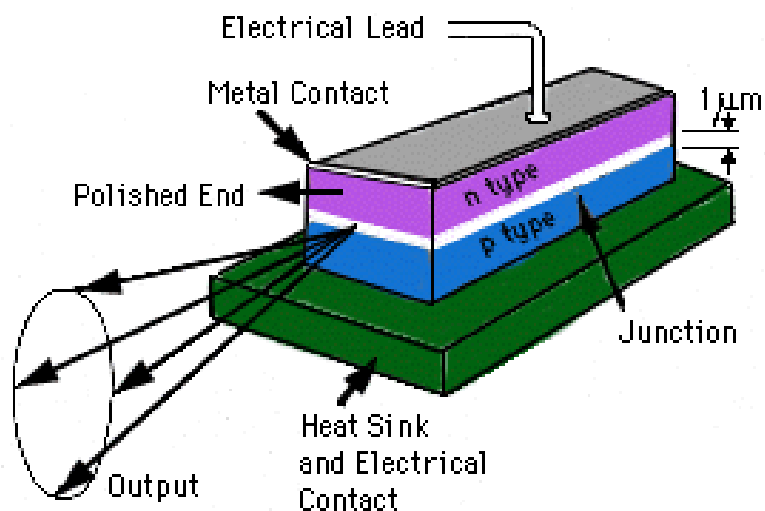
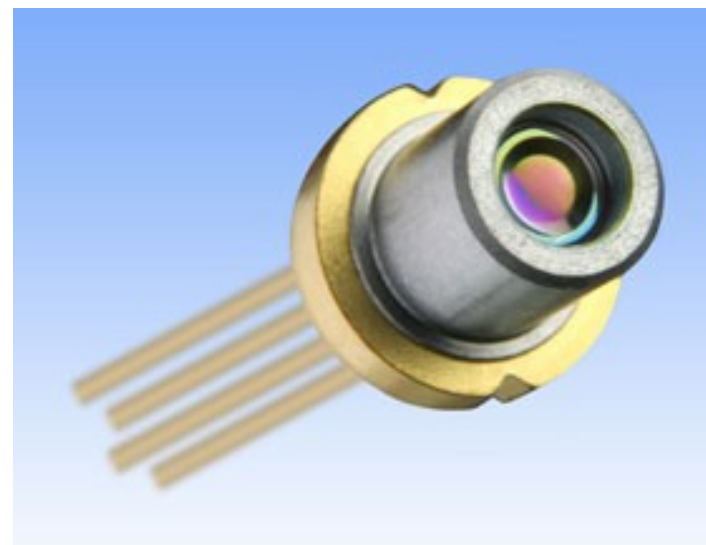


Diagram of Semiconductor Laser



Zastosowania laserów.

- Poligrafia.
- Znakowanie produktów.
- Laserowe cięcie metali.
- Technologie wojskowe.
- Medycyna.
- Nauka.
- Telekomunikacja.
- Czytniki płyt CD, DVD, BluRay.
- Rozrywka.

Tranzystory - definicja.

- Tranzystor - trójelektrodowy półprzewodnikowy element elektroniczny, posiadający zdolność wzmacniania sygnału elektrycznego.
- Według oficjalnej dokumentacji z Laboratoriów Bella nazwa urządzenia wywodzi się od słów transkonduktancja (transconductance) i warystor (varistor), jako że "element logicznie należy do rodziny warystorów i posiada transkonduktancję typową dla elementu ze współczynnikiem wzmocnienia co czyni taką nazwę opisową".

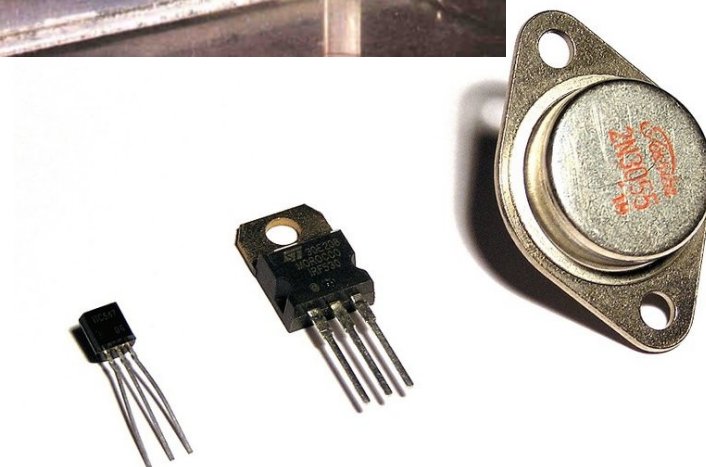
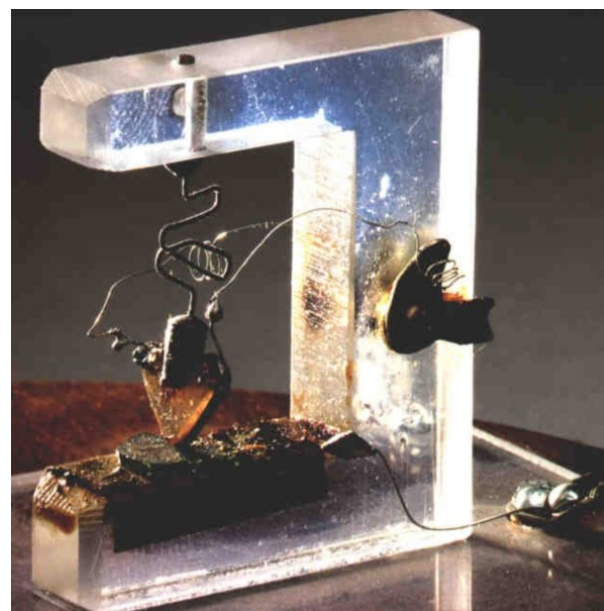
Tranzystory - historia.

- Pierwsze trzy patenty tranzystora zostały udzielone w 1928 r. w Niemczech Juliusowi Edgarowi Lilienfeldowi.
- On jednak prawdopodobnie nie wykorzystał swoich projektów i tranzystora nie skonstruował - dopiero eksperyment przeprowadzony w latach 90. XX wieku wykazał, że jeden z nich działałby prawidłowo.
- Pierwszy tranzystor został skonstruowany 16 grudnia 1947 roku w laboratoriach firmy Bell Telephone Laboratories.
- Wynalazcami są John Bardeen, Walter Houser Brattain oraz William Bradford Shockley, za co otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w 1956.

Tranzystory - historia cd.

- Pierwszym tranzystorem produkowanym w małych ilościach w Polsce był tranzystor ostrzowy TC1.
- Pierwszymi produkowanymi na skalę przemysłową przez Tawę były germanowe tranzystory stopowe TG1 i TG2.
- Wynalezienie tranzystora uważa się za przełom w elektronice, zastąpił on bowiem duże, zawodne lampy elektronowe, dając początek coraz większej miniaturyzacji przyrządów i urządzeń elektronicznych, zwłaszcza że dzięki mniejszemu poborowi mocy można było zmniejszyć też współpracujące z tranzystorami elementy bierne.

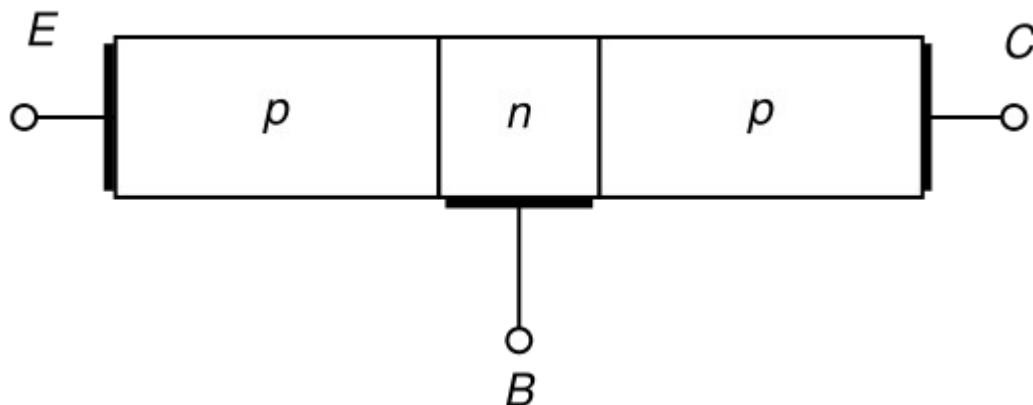
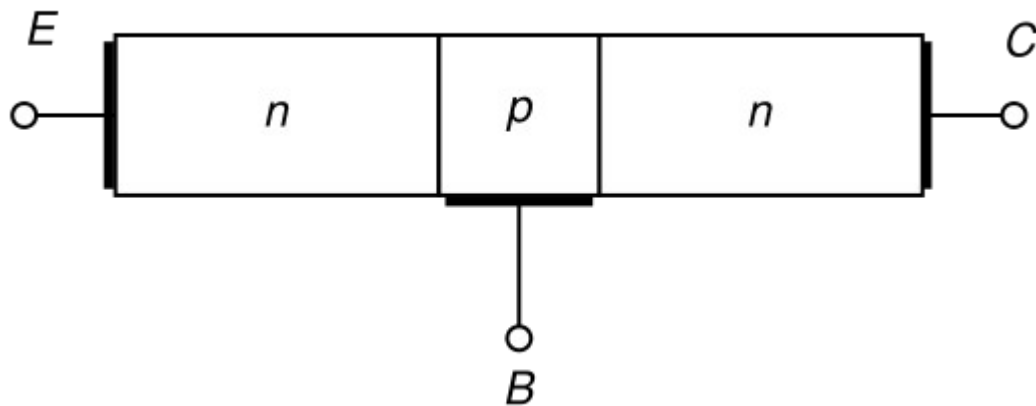
Tranzystory - historia cd.



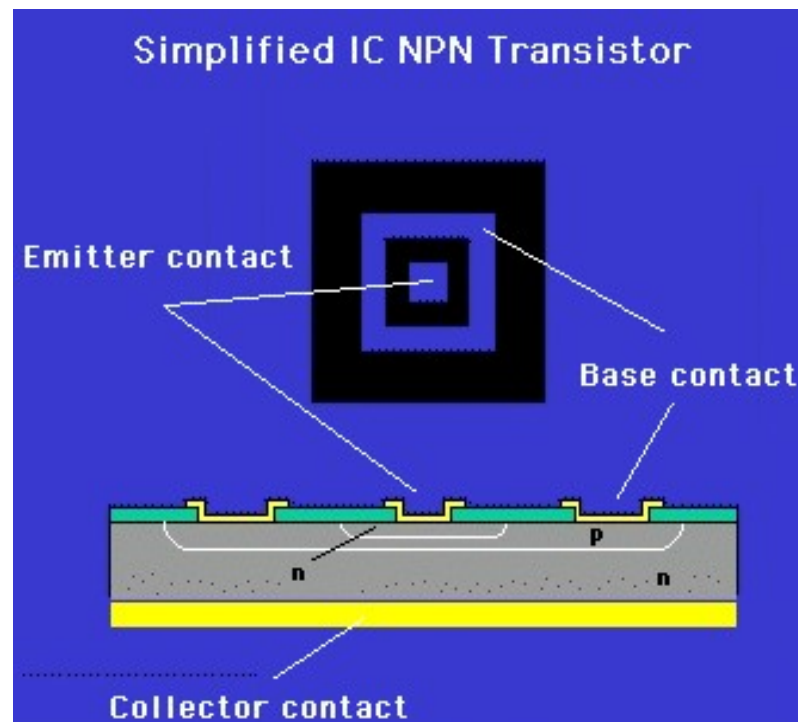
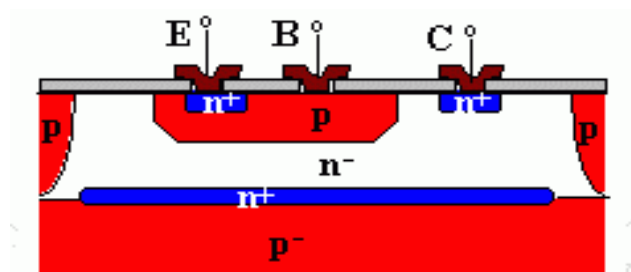
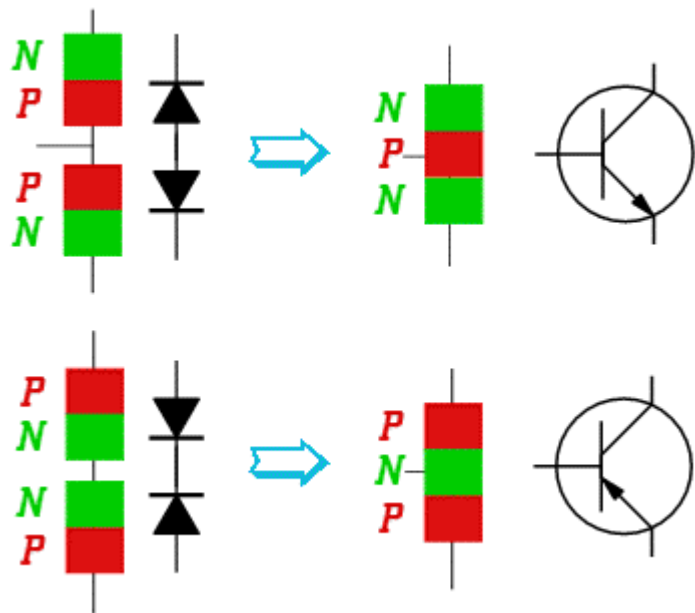
Tranzystory - n-p-n i p-n-p.

- Tranzystor bipolarny - tranzystor, który zbudowany jest z trzech warstw półprzewodników o różnym rodzaju przewodnictwa, tworzących dwa złącza p-n; sposób polaryzacji złącz determinuje stan prac tranzystora.
- Tranzystor posiada trzy końcówki przyłączone do warstw półprzewodnika, nazywane: emiter (ozn. E), baza (ozn. B), kolektor (ozn. C).
- Ze względu na kolejność warstw półprzewodnika rozróżnia się dwa typy tranzystorów: pnp oraz npn; w tranzystorach npn nośnikiem prądu są elektrony, w tranzystorach pnp dziury.

Tranzystory - n-p-n i p-n-p.



Tranzystory - n-p-n i p-n-p.



Tranzystory - n-p-n i p-n-p.

- Zasada działania tranzystora bipolarnego od strony 'użytkowej' polega na sterowaniu wartością prądu kolektora za pomocą prądu bazy. (Prąd emitera jest zawsze sumą prądu kolektora i prądu bazy). Prąd kolektora jest wprost proporcjonalny do prądu bazy, współczynnik proporcjonalności nazywamy wzmocnieniem tranzystora i oznaczamy symbolem β .
- Napięcie przyłożone do złącza baza-emiter w kierunku przewodzenia wymusza przepływ prądu przez to złącze - nośniki większościowe (elektrony w tranzystorach NPN lub dziury w tranzystorach PNP) przechodzą do obszaru bazy (stąd nazwa elektrody: emiter, bo emituje nośniki).

Tranzystory - n-p-n i p-n-p.

- Nośniki wprowadzone do obszaru bazy przechodzą bezpośrednio do kolektora - jest to możliwe dzięki niewielkiej grubości obszaru bazy - znacznie mniejszej niż droga swobodnej dyfuzji nośników ładunku w tym obszarze (ok. 0,01-0,1 mm), co pozwala na łatwy przepływ nośników przechodzących przez jedno ze złączy do obszaru drugiego złącza - nośniki wstrzyknięte do bazy niejako 'siłą rozpędu' dochodzą do złącza kolektora z bazy. Ponieważ złącze to jest spolaryzowane w kierunku zaporowym to nośniki mniejszościowe są 'wsysane' do kolektora.

Tranzystory - n-p-n i p-n-p.

- Prąd bazy składa się z dwóch głównych składników: prądu rekombinacji i prądu wstrzykiwania.
- Prąd rekombinacji to prąd powstały z rekombinowania wstrzykniętych do bazy nośników mniejszościowych z nośnikami większościowymi w bazie. Jest tym mniejszy im cieńsza jest baza.
- Prąd wstrzykiwania jest to prąd złożony z nośników wstrzykniętych z bazy do emitera, jego wartość zależy od stosunku koncentracji domieszek w obszarze bazy i emitera.
- Podstawowe znaczenie dla działania tego urządzenia mają zjawiska zachodzące w cienkim obszarze, zwanym bazą, pomiędzy dwoma złączami półprzewodnikowymi.

Zastosowania tranzystorów.

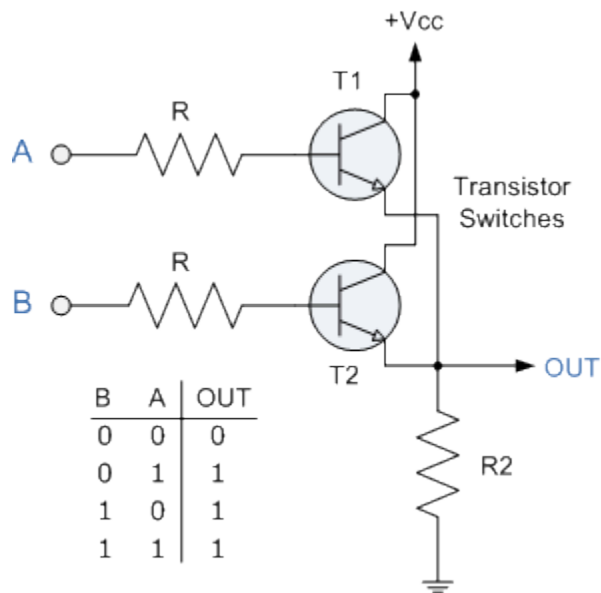
- Tranzystor ze względu na swoje właściwości wzmacniające znajduje bardzo szerokie zastosowanie.
- Jest wykorzystywany do budowy wzmacniaczy różnego rodzaju: różnicowych, operacyjnych, mocy (akustycznych), selektywnych, pasmowych.
- Jest kluczowym elementem w konstrukcji wielu układów elektronicznych, takich jak źródła prądowe, lustra prądowe, stabilizatory, przesuwniki napięcia, klucze elektroniczne, przerzutniki czy generatory.

Zastosowania tranzystorów cd.

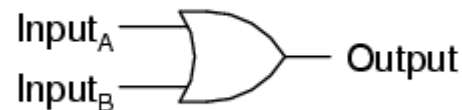
- Ponieważ tranzystor może pełnić rolę klucza elektronicznego, z tranzystorów buduje się także bramki logiczne realizujące podstawowe funkcje boolowskie, co stało się motorem do bardzo dynamicznego rozwoju techniki cyfrowej w ostatnich kilkudziesięciu latach.
- Tranzystory są także podstawowym budulcem wszelkiego rodzaju pamięci półprzewodnikowych (RAM, ROM, itp.).
- Dzięki rozwojowi technologii oraz ze względów ekonomicznych większość wymienionych wyżej układów tranzystorowych realizuje się w postaci układów scalonych.
- Niektórych układów, jak np. mikroprocesorów liczących sobie miliony tranzystorów, nie sposób byłoby wykonać bez technologii scalania.

Tranzystorowe układy logiczne

- Ponieważ tranzystor może pełnić rolę klucza elektronicznego, z tranzystorów buduje się także bramki logiczne realizujące podstawowe funkcje boolowskie, co stało się motorem do bardzo dynamicznego rozwoju techniki cyfrowej w ostatnich kilkudziesięciu latach.



2-input OR gate



A	B	Output
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Podsumowanie.

- Dzisiaj wszystkie komputery i urządzenia elektroniczne mające w środku mikroprocesor pracują przy wykorzystaniu tranzystorów.
- W 1997 liczba produkowanych tranzystorów we wszystkich fabrykach na świecie przekroczyła liczbę mrówek żyjących na Ziemi.
- Cena wyprodukowania jednego tranzystora na początku lat pięćdziesiątych wynosiła kilka dolarów, dzisiaj jest to około 190 nanodolarów, czyli mniej niż koszt jednej litery w książce.
- Bez wynalezienia tranzystora w 1947 roku w laboratoriach Bella nie istniałyby komputery osobiste, internet czy informatyka ...



Dziękuję za uwagę !