

Prof. Dr Halina Abramczyk
Technical University of Lodz, Faculty of Chemistry
Institute of Applied Radiation Chemistry
Poland, 93-590 Lodz, Wroblewskiego 15
Phone:(+ 48 42) 631-31-88; fax:(+ 48 42) 684 00 43
[E-mail:abramczy@mitr.p.lodz.pl](mailto:abramczy@mitr.p.lodz.pl), <http://mitr.p.lodz.pl/evu>,
<http://mitr.p.lodz.pl/raman>

TYPY LASERÓW

Lasery można klasyfikować w zależności od rodzaju ośrodka czynnego lub długości fali emitowanego promieniowania.

Najbardziej ogólny podział ze względu na pierwsze kryterium to lasery gazowe, ciekłe i na ciele stałym.

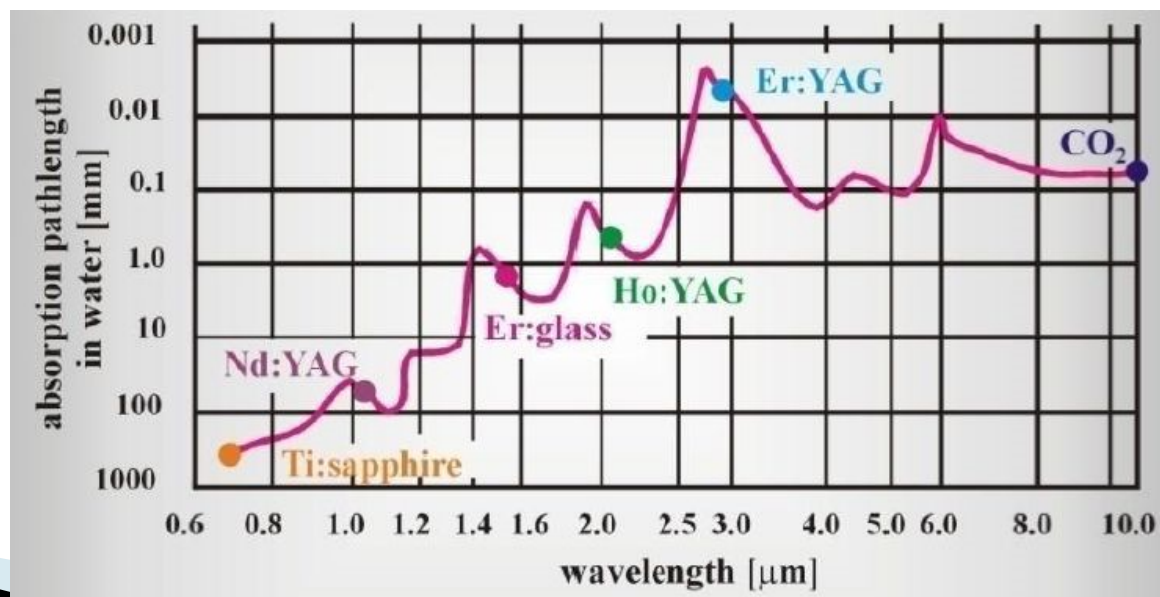
Do najbardziej znanych laserów gazowych należą:

- a) laser CO₂ (10,4 μm) (bliska podczerwień),
- b) laser CO (5 – 6,5 μm) (bliska podczerwień),
- c) laser N₂O (10,6 μm),
- d) molekularne lasery gazowe (CH₃OH, C₂H₂F₂, CH₃F) (40μm–1 mm) (daleka podczerwień),
- e) lasery chemiczne (w których jednym z produktów reakcji jest: I, HF, HCl, HBr, CO, CO₂) emitujące w bliskiej podczerwieni (1,3–11μm),
- f) jonowy laser argonowy (476,5–514,5 nm) (zakres widzialny),
- g) laser kryptonowy (503,9–752,5 nm) (zakres widzialny),
- h) laser helowo – neonowy (632,8 nm) (zakres widzialny),
- i) lasery ekscimerowe, takie jak: ArF, XeCl, KrF, emitujące promieniowanie o długości fal 193, 248, 308 nm (UV),
- j) laser azotowy N₂ (337 nm) (UV).

Do najczęściej używanych laserów ciekłych należą lasery barwnikowe, emitujące w zakresie widzialnym.

Najbardziej znane lasery, w których ośrodkiem czynnym jest ciało stałe, to:

- laser rubinowy (694,3 nm) (zakres widzialny),
- laser Nd:YAG, w którym matrycą jest granat itrowo-glinowy, a domieszką neodym,
- laser tytanowo-szafirowy (690–1080 nm) i inne lasery przestrajalne na ciele stałym,
- lasery na pierwiastkach ziem rzadkich (holmowy, erbowy, tulowy) emitujące promieniowanie o długości fal około 2 μm w zależności od rodzaju matrycy oraz od rodzaju domieszki,
- lasery półprzewodnikowe emitujące w szerokim zakresie widmowym, począwszy od zakresu widzialnego do podczerwieni.

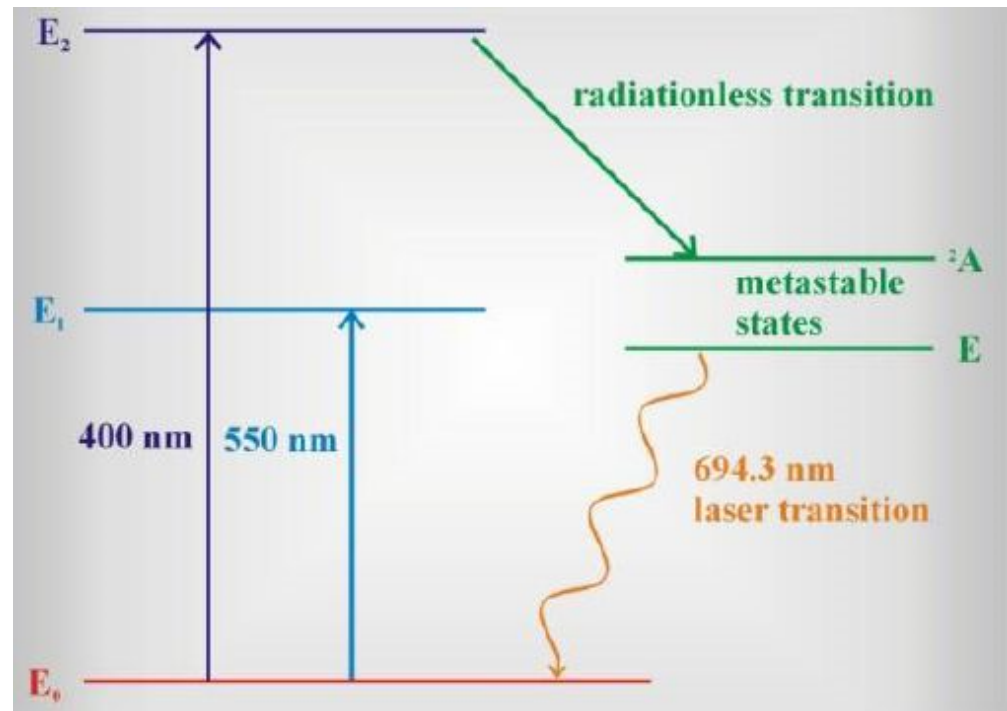


Lasery półprzewodnikowe nie należą do grupy laserów ciała stałym choć ośrodkiem czynnym jest ciało stałe. Tradycyjnie lasery te stanowią oddzielną grupę, są pompowane elektrycznie i różnego typu procesy są w ich przypadku odpowiedzialne za emisję w szerokim zakresie spektralnym od zakresu VIS do IR.

LASER RUBINOWY

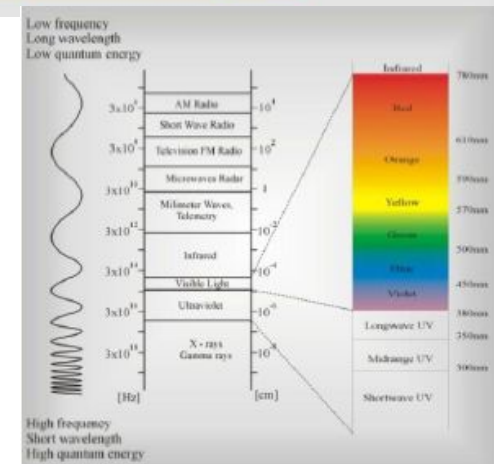
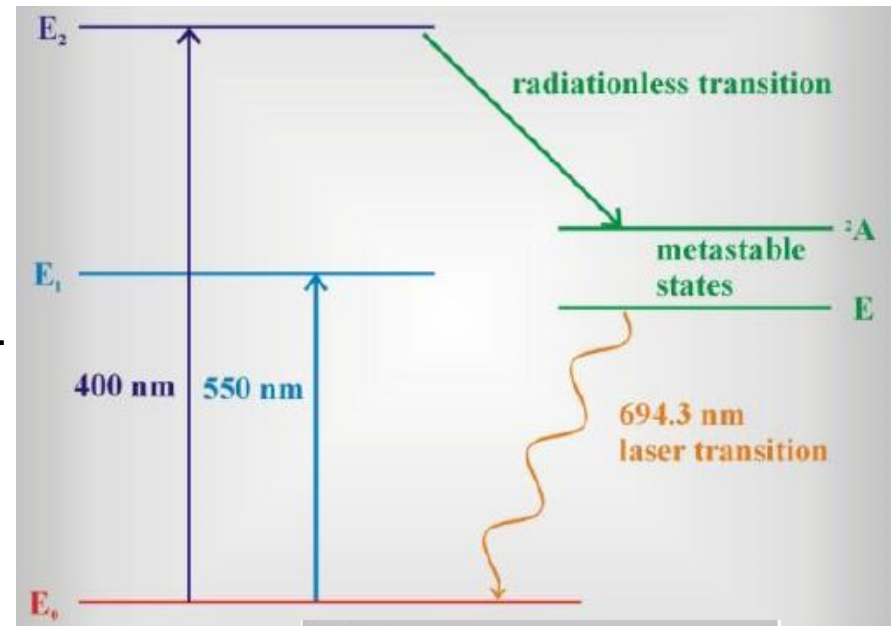
Impulsy lasera rubinowego o dużej energii i promieniowaniu z zakresu widzialnego światła czerwonego (694,3nm) znajdują nadal zastosowanie w holografii i dermatologii. W dermatologii laser rubinowy wykorzystywany jest do usuwania tatuaży i pigmentacyjnych zabarwień skóry. Laser rubinowy jest laserem impulsowym o niskiej częstotliwości repetycji. Częstota repetycji jest to liczba impulsów wysyłanych przez laser w ciągu 1 sekundy. Czas trwania pojedynczego impulsu jest rzędu milisekund, przy energii 1J i średniej mocy impulsu rzędu kilowatów.

Ośrodkiem czynnym lasera rubinowego jest pręt z syntetycznego szafiru (Al_2O_3) domieszkowany (0,01 – 0,5%) chromem, który ma tę samą wartościowość (+ 3) co glin i nadaje kryształowi czerwoną lub różową barwę.

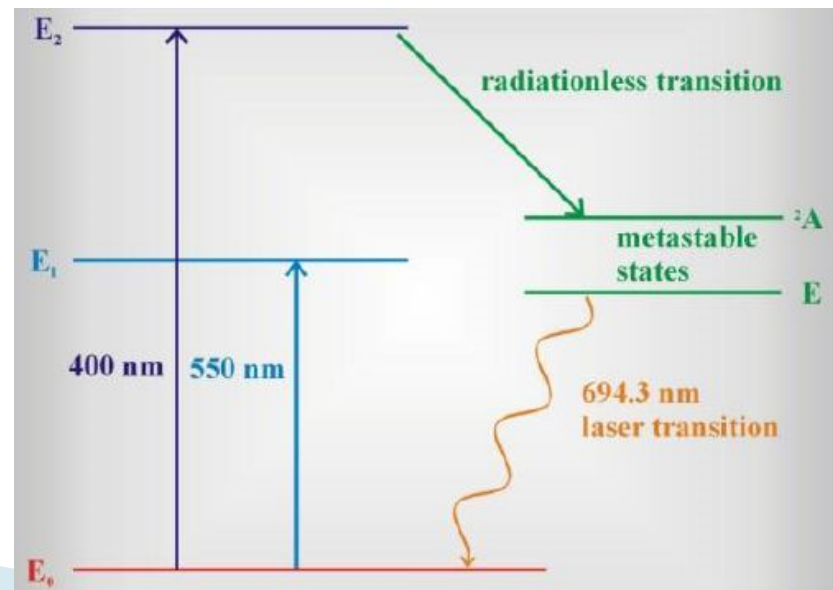


Laser rubinowy jest pompowany lampą błyskową. Widzialne światło o długości fali 400 nm lub 550 nm przenosi jony Cr^{+3} do stanów wzbudzonych E_1 lub E_2 , gdzie żyją krótko (ok. 100 ns). W wyniku przejść bezpromienistych jony Cr^{+3} przechodzą do jednego z dwóch stanów metastabilnych: E lub 2A o czasie życia 3 ms w temperaturach pokojowych. Akcja laserowa dla przejścia $E \rightarrow E_0$ generuje światło o długości fali 694,3 nm.

Laser rubinowy jest laserem trójpoziomowym, co oznacza, że poziom E_0 jest poziomem, z którego rozpoczyna się pompowanie i gdzie kończy się akcja laserowa. Oznacza to, że więcej niż połowa atomów musi być przeniesiona do stanu wzbudzonego, aby wytworzyć inwersję obsadzeń. Wymaga to dużych energii pompowania. Nadmiarowa energia wytworzona w ośrodku czynnym w wyniku przejść bezpromienistych pozostaje w kryształach rubinowym, ogrzewając go i ograniczając częstość repetycji impulsów do kilku w czasie 1 sekundy. Te niedogodności układu trójpoziomowego są zrekompensowane w laserze rubinowym przez długi czas życia stanu metastabilnego. Długi czas życia pozwala zmagazynować w pręcie rubinowym energię wiele razy większą niż w pręcie neodynowym Nd:YAG o tych samych wymiarach i w konsekwencji generować impulsy o dużo większej energii.

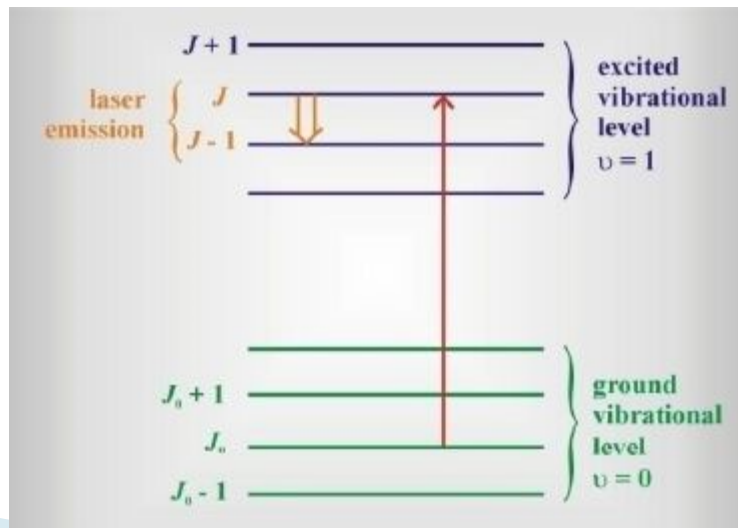


Lasery rubinowe znajdują szerokie zastosowania w holografii, diagnostyce plazmy i dermatologii. W dermatologicznych zastosowaniach wykorzystywane są lasery rubinowe ze zmianą dobroci Q produkujące impulsy o energii 2–3J i częstotliwości repetycji 0,5–1Hz. Energia taka wystarcza, aby usuwać czarne, niebieskie i zielone pigmenty tatuaży skóry, jak również zabarwienia spowodowane nadmiarem melaniny. Laser rubinowy nie usuwa natomiast czerwonych pigmentów, nie absorbują one bowiem czerwonego światła o długości fali 694,3nm emitowanego przez laser. Wiązka laserowa niszczy komórki z pigmentem, podczas gdy otaczające je niezabarwione obszary skóry absorbują minimalną ilość światła i doznają tylko nieznacznego uszkodzenia. Następnie układ limfatyczny powoli usuwa martwe komórki w ciągu kilku miesięcy. Laser rubinowy może pracować również w reżimie synchronizacji modów, emitując impulsy o czasie trwania 20–30pikosekund, energii 1mj i częstotliwości repetycji 20– 30Hz.



Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych

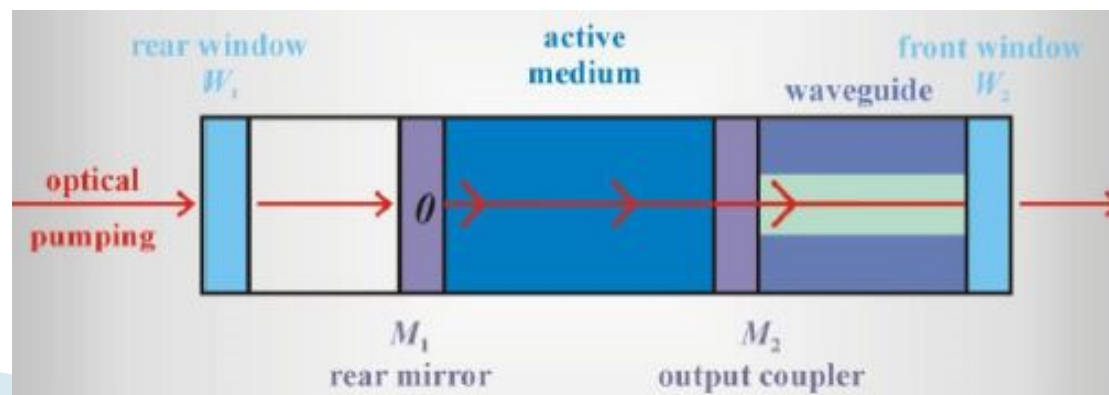
Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych generują promieniowanie z zakresu dalekiej podczerwieni. Moce tych laserów w typowych, komercyjnie dostępnych modelach mieszczą się w zakresie od miliwatów do 1W. Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych są wzbudzane promieniowaniem o długości wynoszącej około $10\ \mu\text{m}$ i dlatego często pompowane są światłem lasera CO_2 lub N_2O . Pompowanie optyczne powoduje przeniesienie cząsteczek ośrodka z określonego stanu rotacyjnego, opisanego rotacyjną liczbą kwantową J_0 w podstawowym stanie wibracyjnym ($\nu=0$), do stanu rotacyjnego J we wzbudzonym stanie wibracyjnym ($\nu>0$) określonego drgania. Liczba ν oznacza oscylacyjną liczbę kwantową. Akcja laserowa zachodzi między dwoma poziomami rotacyjnymi $J \rightarrow J-1$ we wzbudzonym stanie wibracyjnym. Laser pompujący powinien dostarczać promieniowania silnie monochromatycznego w wąskim zakresie widmowym, aby uniknąć zapełnienia sąsiednich poziomów rotacyjnych, które leżą blisko siebie.



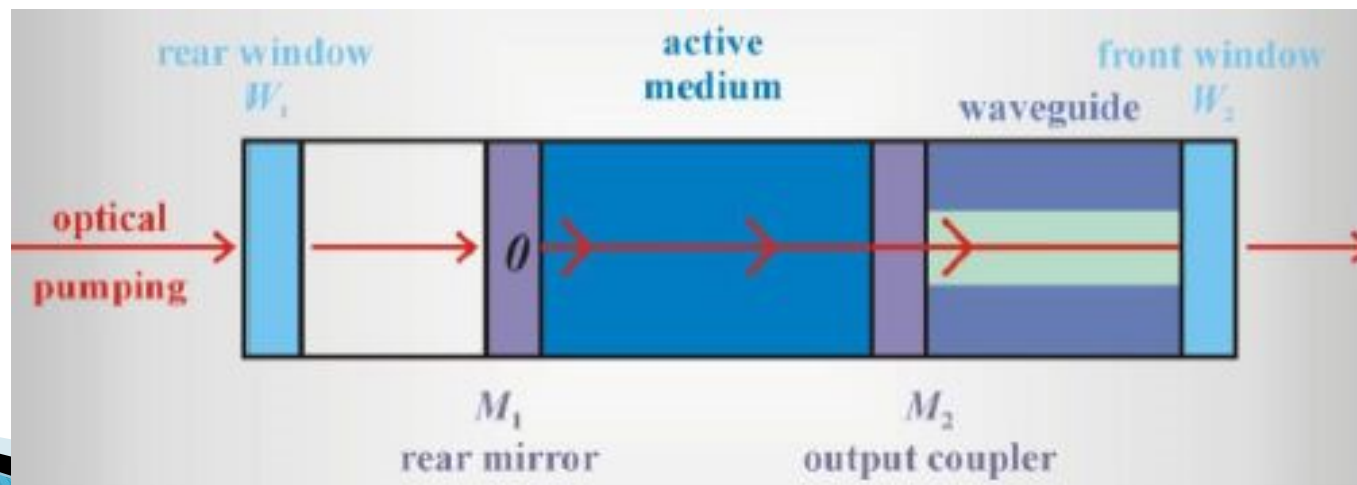
Ośrodkiem czynnym w laserach emitujących promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych są substancje w stanie gazowym np. alkohole i węglowodory. W handlowych modelach laserów emitujących promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych rezonator optyczny zawiera zbiornik z gazem, który można wymieniać. Pozwala to otrzymywać promieniowanie o długościach fali z zakresu dalekiej podczerwieni od 40 μm do 2000 μm . Ponieważ energia poziomów rotacyjnych silnie zależy od masy cząsteczek, więc podstawienie izotopowe w cząsteczkach gazu może powodować uzyskanie nowych linii. I tak na przykład dla CD_3OD uzyskujemy emisję promieniowania o długości fali 41,0 μm , dla CH_3OD – 46,7 μm , a dla CH_3OH – 70,6 μm . Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych, choć dostępne komercyjnie, są mniej popularne niż lasery gazowe emitujące promieniowanie o krótszych długościach fal (CO_2 , CO , N_2O) z zakresu bliskiej podczerwieni. Wynika to z problemów technicznych w tym zakresie widmowym związanych z koniecznością stosowania falowodów oraz warunkami, jakie muszą spełniać elementy optyczne.

Rezonator optyczny laserów emitujących promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych, w przeciwieństwie do rezonatorów laserów z innych zakresów widmowych, składa się nie tylko z dwóch zwierciadeł M_1 oraz M_2 i ośrodka czynnego, ale również próżniowego falowodu, który prowadzi wyemitowane fale. Falowód jest niezbędny, gdyż absorpcja powietrza przy długości fali 30 μm i 50 μm skutecznie blokowałaby transmisję światła na większe odległości. Układ optyczny rezonatora składa się ze zwierciadeł M_1 i M_2 , między którymi zachodzi akcja laserowa, oraz okienek W_1 i W_2 izolujących próżniowo układ od otoczenia i przepuszczających wygenerowane światło lasera. Elementy optyczne rezonatora muszą spełniać kilka warunków, które niekiedy wykluczają się wzajemnie:

1) Zwierciadła M_1 i M_2 rezonatora muszą odbijać promieniowanie zarówno z zakresu 10 μm (promieniowanie pompujące), jak i z zakresu dalekiej podczerwieni (promieniowanie wygenerowane). Odbicie w zwierciadłach promieniowania pompującego wydłuża drogę optyczną, co przy małych energiach przejść rotacyjnych jest bardzo ważne.

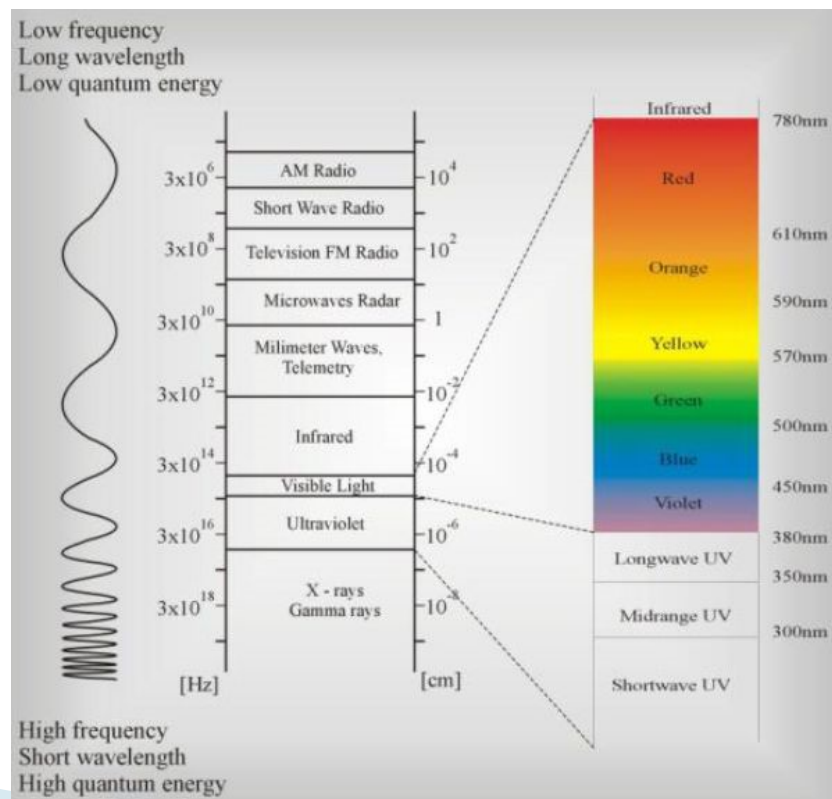


Tylne okienko W_1 izolujące próżniowo układ od otoczenia musi przepuszczać promieniowanie pompujące, które tą drogą dostaje się do rezonatora. Wykonane jest przeważnie z selenku cynku. W zwierciadle tylnym Z_1 znajduje się otwór O o średnicy 1–2mm, który przepuszcza promieniowanie o długości fali $10\ \mu\text{m}$, nie przepuszczając jednocześnie promieniowania z zakresu dalekiej podczerwieni. Przednie okienko W_2 musi przepuszczać promieniowanie z dalekiej podczerwieni, które zostało wygenerowane w laserze. Zbudowane jest przeważnie z czystego krzemu lub krystalicznego kwarcu. W zakresie promieniowania o długościach fali większych niż $50\ \mu\text{m}$ większość materiałów jest nieprzezroczysta. Tylko niektóre materiały, jak **krzem, german, krystaliczny kwarc, diament oraz polietylen**, mogą być użyte jako materiał okienka W_2 , są bowiem przepuszczalne dla światła emitowanego przez omawiane lasery. Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych stosowane są głównie w badaniach spektroskopowych.



Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść wibracyjnych: CO₂ i CO

Lasery emitujące promieniowanie w wyniku przejść wibracyjnych generują promieniowanie w zakresie podczerwieni, zarówno w sposób ciągły, jak i impulsowy, a ich główne linie to: 10,6 μm i 9,6 μm (CO₂) oraz 5–6 μm (CO). Lasery CO₂ mogą osiągać moce w szerokim zakresie, od watów do kilowatów, w zależności od typu lasera. Lasery CO₂ i CO emitują promieniowanie w wyniku przejść między poziomami wibracyjno-rotacyjnymi cząsteczek. Ośrodek czynny lasera CO₂ składa się z cząsteczek dwutlenku węgla, azotu N₂ i helu He.



Lasery CO₂ są najczęściej wzbudzone poprzez wyładowania elektryczne w gazie. Elektrony, które powstają na skutek jonizacji, wzbudzają drganie rozciągające cząsteczki N₂ przenosząc ją z podstawowego stanu wibracyjnego ($\nu=0$) do pierwszego wzbudzonego stanu wibracyjnego ($\nu=1$). Energia cząsteczki N₂ w tym stanie kwantowym jest praktycznie taka sama jak energia pierwszego wzbudzonego **stanu wibracyjnego (00⁰1) asymetrycznego drgania rozciągającego ν_3 cząsteczki CO₂**. Na skutek niewielkiej różnicy energii ($\Delta E = 18 \text{ cm}^{-1}$) między poziomami wzbudzonymi, cząsteczki N₂ oddają energię cząsteczkom CO₂ i powracają do podstawowego stanu wibracyjnego ($\nu = 0$),

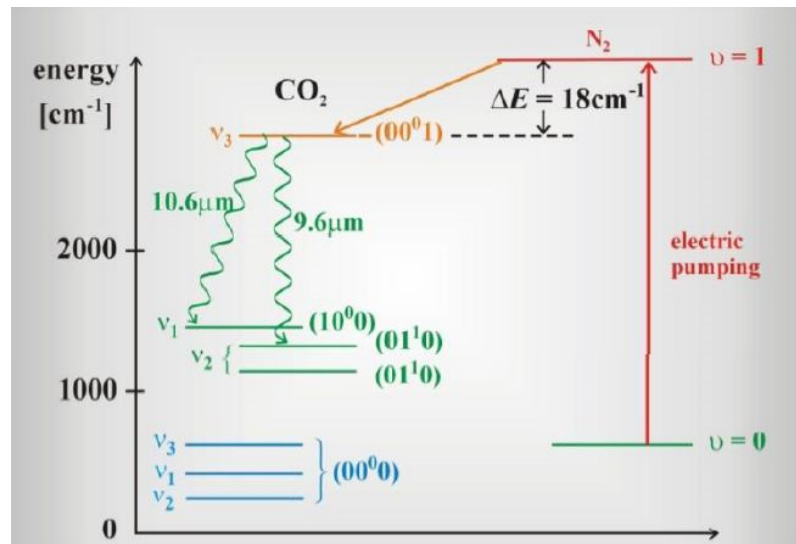
co powoduje wzbudzenie drgania ν_3 do stanu wibracyjnego oznaczonego jako (00⁰1).

Główne przejścia laserowe w CO₂ zachodzą między stanami

wzbudzonymi drgania ν_3 (00⁰1) i symetrycznego drgania rozciągającego ν_1 (10⁰0)

(emitując promieniowanie o długości fali 10,6 mm) oraz **drgania zginającego ν_2 (01¹0)**

(9,6 μm). Cząsteczki helu nie biorą bezpośrednio udziału we wzbudzeniu cząsteczek CO₂, ale pełnią ważną rolę w przekazywaniu ciepła (dyssypacji energii), ułatwiają bowiem opróżnianie niższych poziomów wibracyjnych w CO₂, przyczyniając się w ten sposób do utrzymania inwersji obsadzeń.



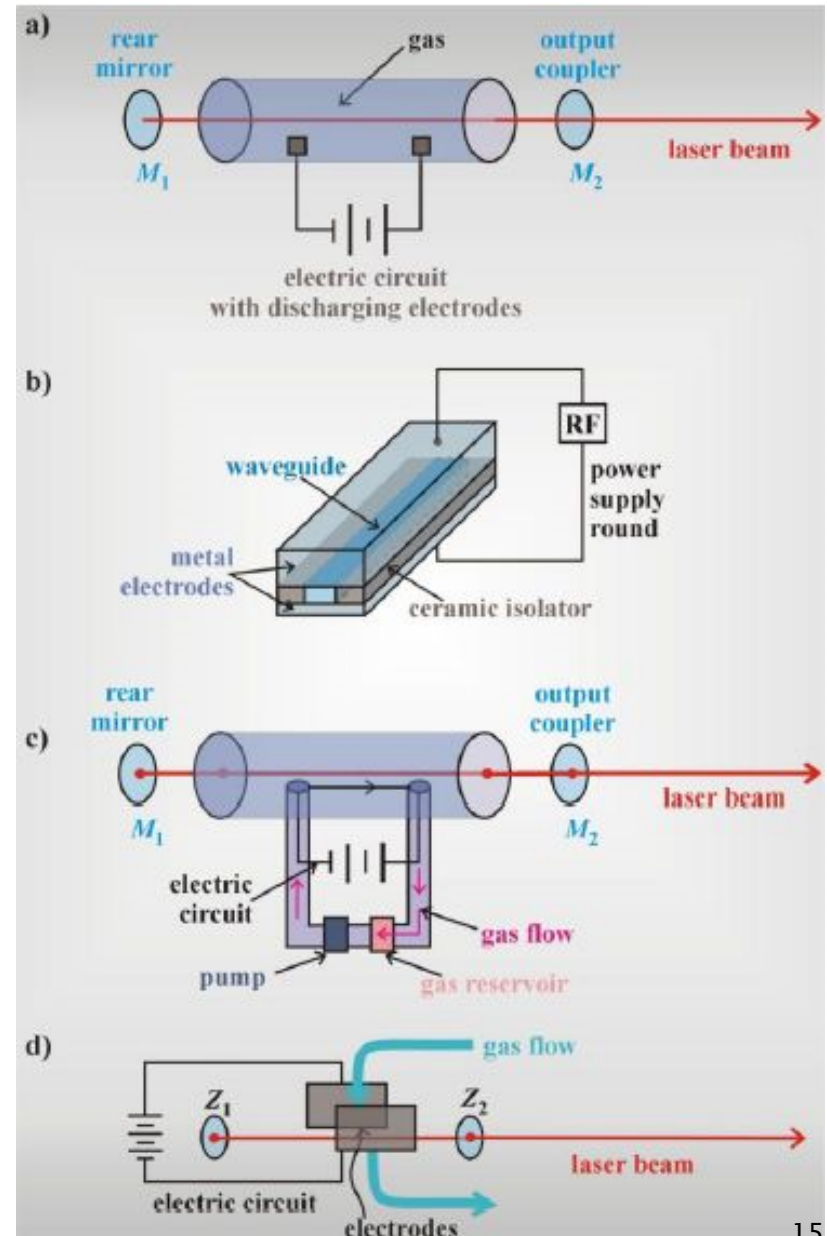
Symbole (00⁰0), (01¹0), itd., oznaczają zespół oscylacyjnych liczb kwantowych występujących w wyrażeniu na energię oscylatora harmonicznego.

$$E = h\nu\left(\mathcal{Q} + \frac{1}{2}\right)$$

Pierwsza cyfra oznacza kwantową liczbę oscylacyjną drgania ν_1 , druga – ν_2 , trzecia – ν_3 , indeks górny przy liczbie oscylacyjnej określa stopień degeneracji poziomom. I tak na przykład symbol (01¹0) oznacza podstawowy stan wibracyjny dla drgania 1, pierwszy wzbudzony stan wibracyjny dla drgania 2, który jest dwukrotnie zdegenerowany i podstawowy stan wibracyjny dla drgania 3.

Moc lasera CO₂ zależy od jego budowy. Wyróżnia się następujące typy laserów CO₂ :

1. lasery z gazem czynnym znajdującym się w szczelnie zamkniętej w kolumnie wyładowawczej,
2. lasery – falowody,
3. lasery z osiowym przepływem gazów,
4. lasery z poprzecznym przepływem gazów, lasery poprzecznie wzbudzone pod ciśnieniem zbliżonym do atmosferycznego TEA (ang. *transversely excited atmospheric*).



Zastosowania laserów CO₂ są bardzo szerokie. Należą one do najlepiej sprzedających się laserów i zajmują pierwsze miejsce w rankingu sum uzyskanych ze sprzedaży. Wojsko dostrzegło duże moce laserów CO₂ jako potencjalnej broni rażenia, choć w ostatnich latach zainteresowanie tymi laserami zmalało nieco ze względu na duże, nieporęczne źródło pompowania. Ponadto lasery CO₂ znalazły zastosowanie jako **lidary** (radary laserowe). Innym obszarem zastosowań laserów CO₂ jest obróbka materiałowa. Lasery CO₂ o mocy około **50W w pracy ciągłej służą do cięcia plastiku, gumy, ceramiki**. Laser CO₂ jest wykorzystywany również do cięcia metali. Dla cięcia metali potrzebna jest moc większa niż 50 W, większość metali bowiem wykazuje niewielką absorpcję promieniowania o długości fali 10 μm. Laser CO₂ jest szczególnie użyteczny do cięcia **tytanu**, ponieważ w przeciwieństwie do większości metali silnie absorbuje promieniowanie o długości fali 10 μm. Laser CO₂ jest wykorzystywany do **wytrawiania termicznego** w celu uzyskania krystalicznej struktury powierzchni metalu, która zwiększa znacznie trwałość materiału.

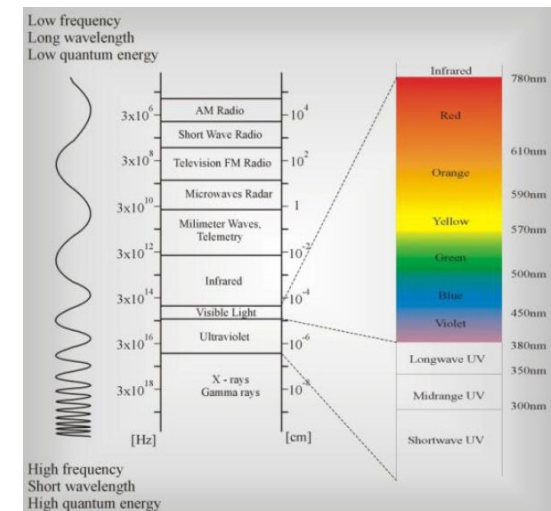
Medyczna użyteczność laserów CO₂ to głównie **zastosowania chirurgiczne**. Służą one do **zamykania naczyń krwionośnych**, co jest niezwykle istotne w operacjach na silnie ukrwionej tkance. Lasery CO₂ (TEA i lasery typu (a)), a szczególnie generowana przez nie linia o długości fali 10 μm, są używane w badaniach spektroskopowych indukowanych laserowo reakcji fotochemicznych oraz do optycznego pompowania laserów emitujących promieniowanie w wyniku przejść rotacyjnych.

Laser CO został skonstruowany wkrótce po laserze CO₂. Podobnie jak laser CO₂ jest on pompowany przez wyładowanie elektryczne, a jego moc wyjściowa jest duża. Laser CO emituje promieniowanie o długości fali z zakresu 5 – 6,5 μm. Produkowany jest zarówno w wersji z zatopioną próżniowo rurą wyładowczą i jako laser przepływowy. Należy zwrócić uwagę, że laser przepływowy jest niebezpieczny, bo CO jest bezzapachowy, a 50 ppm jego zawartości w atmosferze jest już niebezpieczne dla zdrowia, natomiast wyższe dawki są śmiertelne. Wersja z zatopioną rurą wyładowczą nie jest niebezpieczna, zawartość CO bowiem jest w tym typie konstrukcji lasera niewielka i nawet gdy rura zostaje uszkodzona, przeciek do atmosfery nie powoduje zagrożeń dla zdrowia.

Duża moc powoduje, że lasery CO znajdują zastosowanie w **stomatologii i ginekologii**. Ponadto rozwój technologii giętkich światłowodów, które charakteryzują się wysoką transmisją światła generowanego przez laser CO, stał się stymulatorem dalszego zainteresowania medycyny i przemysłu. W latach sześćdziesiątych **wojsko było zainteresowane laserami CO ze względu na ich dużą moc, ale duża absorpcja światła** w zakresie 5–6,5 μ m przez atmosferę spowodowała, że zaniechano tych badań.

Lasery chemiczne

Lasery chemiczne emitują promieniowanie o długości fali z zakresu bliskiej podczerwieni i podczerwieni ($1,3\text{--}11\mu\text{m}$). Lasery chemiczne dostępne na rynku to przede wszystkim lasery HF i DF, które dostarczają promieniowania o mocy do kilkuset watów. Istnieje wiele innych laserów chemicznych, emitujących promieniowanie również z zakresu widzialnego, ale jak dotąd, były one demonstrowane tylko przez laboratoria badawcze. Lasery chemiczne wykorzystują inny niż dotychczas poznane typ pompowania – energię, która wyzwala się w czasie reakcji chemicznej. **Lasery chemiczne znacznie redukują zapotrzebowanie na pompowanie energią elektryczną.** To właśnie, obok ogromnych mocy, jest przyczyną dużego zainteresowania wojska bronią wykorzystującą tego rodzaju lasery.

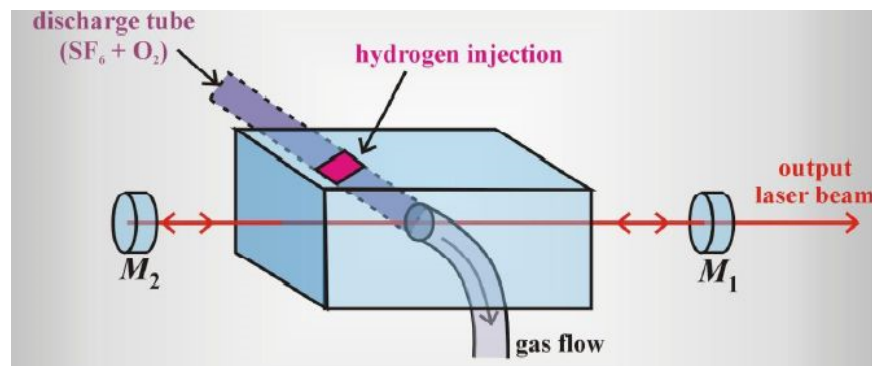


W laserach chemicznych najczęściej wykorzystuje się reakcje, które prowadzą do powstania wzbudzonych cząsteczek HF* i DF. Akcja laserowa zachodzi pomiędzy poziomami wibracyjnymi cząsteczek HF lub DF. Stosuje się również mieszaniny izotopowe, aby zmienić długość fali promieniowania laserów HF, które emitują promieniowanie w zakresie 2,6 – 3,3 μm , a więc w obszarze silnej absorpcji w atmosferze. Podstawienie izotopowe wodoru prowadzi do emisji promieniowania o długościach fali przesuniętych do obszaru 3,5 – 4,2 μm , dla którego **atmosfera jest bardziej przezroczysta. Jest to bardzo istotne w laserach militarnych stosowanych jako broń dalekiego rażenia**, w których wiązka laserowa pokonuje dużą odległość. W dostępnych na rynku laserach HF/DF fluorowódor produkowany jest w elektrycznej kolumnie wyładowawczej w **reakcji dysocjacji sześćfluorku siarki SF₆**. **Kolumna wypełniona jest dodatkowo tlenem, który reaguje z siarką. Do kolumny wstrzykiwany jest wodór, który reaguje z fluorem, wytwarzając wzbudzone wibracyjnie cząsteczki fluorowodoru HF***. Wzbudzone cząsteczki fluorowodoru przepływają szybko przez wnękę rezonatora prostopadle do jego osi .

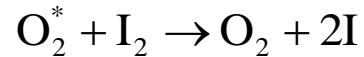
Typowe lasery chemiczne



Laser	Reakcja	Długość fali promieniowania [μm]
CO ₂	$\text{DF}^* + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{DF}$	10,0 - 11,0
CO	$\text{CS} + \text{O} \rightarrow \text{CO}^* + \text{S}$	4,9 - 5,8
HBr	$\text{H} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{HBr}^* + \text{Br}$	4,0 - 4,7
DF	$\text{F} + \text{D}_2 \rightarrow \text{DF}^* + \text{D}$	3,5 - 4,2
HCl	$\text{H} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{HCl}^* + \text{Cl}$	3,5 - 4,1
HF	$\text{F} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HF}^* + \text{H}$	2,6 - 3,3
I	$\text{O}_2^* + \text{I}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{I}^*$	1,3



Innym znanym laserem chemicznym jest laser wykorzystujący reakcję



Emituje on najkrótsze wśród laserów chemicznych promieniowanie o **długości fali 1,3 μm i znany jest pod nazwą COIL**. Chemiczne lasery emitujące promieniowanie z obszaru widzialnego, choć z oczywistych względów będące w sferze zainteresowania technologii wojskowych, pozostają jeszcze na etapie prób laboratoryjnych. Nie ma chyba innej grupy laserów, którymi zainteresowanie zdominowane byłoby prawie całkowicie przez zastosowania militarne. W latach siedemdziesiątych marynarka wojenna Stanów Zjednoczonych zaangażowała się w program badania laserów chemicznych do obrony statków przed atakiem pocisków taktycznych. **Program został ukoronowany budową ogromnego 2 MW lasera MIRACL**. W latach osiemdziesiątych program wojen gwiazdnych przeniósł strategiczną obronę do przestrzeni kosmicznej i zainwestowano duże środki finansowe w rozwój laserów HF. W latach dziewięćdziesiątych uwaga sił powietrznych Stanów Zjednoczonych skoncentrowała się na laserach typu COIL.

Lasery na ciele stałym

Omówimy teraz grupę laserów, w których ośrodkiem czynnym jest ciało stałe.

Należy wyróżnić dwie grupy laserów na ciele stałym: nieprzestrjalne i przestrjalne.

Lasery należące do obu grup są laserami czteropoziomowymi.

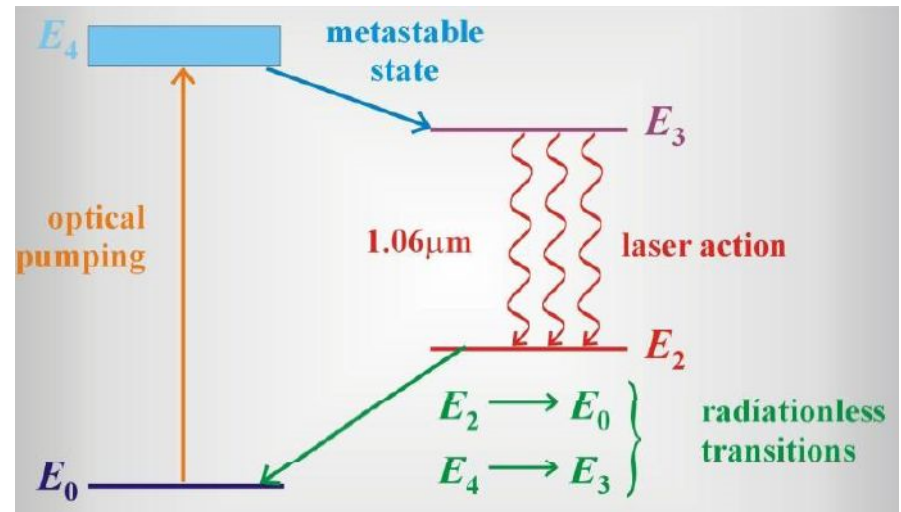
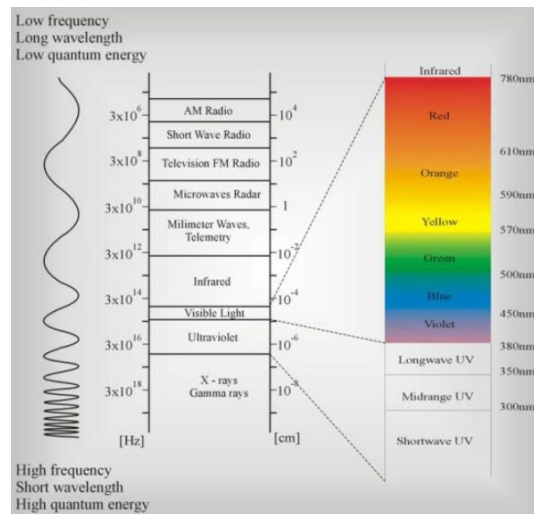
Lasery na ciele stałym pompowane są :

- lampami błyskowymi, laserami o pracy ciągłej,
- laserami diodowymi (DPSSL– diod pumped solid–state lasers).

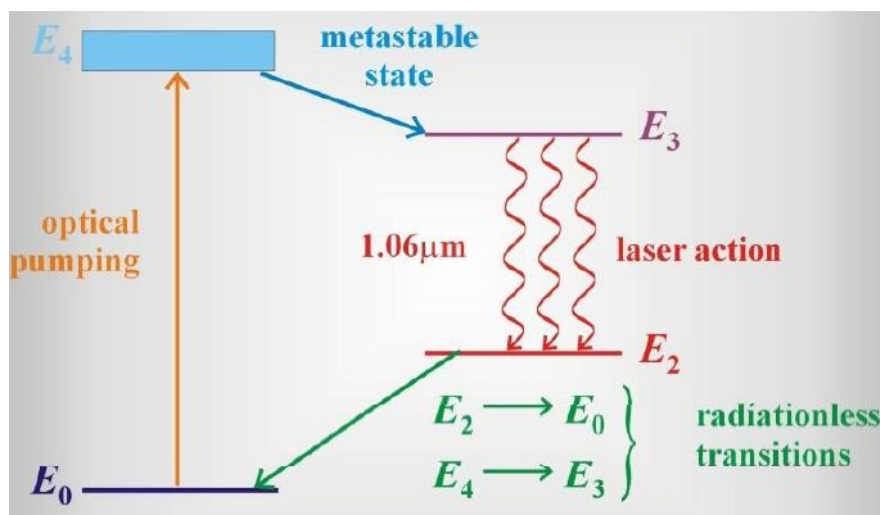
Ośrodkiem czynnym wielu laserów na ciele stałym są pierwiastki ziem rzadkich, należące do grupy lantanowców. Najczęściej wykorzystywane pierwiastki ziem rzadkich to neodym, holm, erb i tul. Szkło optyczne i większość kryształów nie wykazują absorpcji w zakresie widzialnym bądź bliskiej podczerwieni. Kiedy jednak zostaną domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich, zaczynają wykazywać silną absorpcję i fluorescencję.

Lasery na ciele stałym

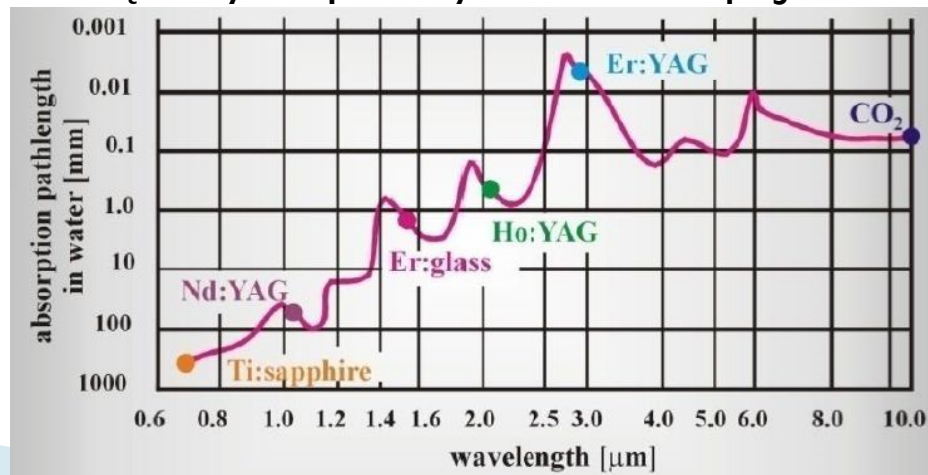
Najczęściej stosowaną matrycą, w którą zostaje wbudowany jon neodymu Nd^{+3} jest granat itrowo – glinowy $[Y_3Al_2(AlO_4)_3]$ lub szkło krzemowe. Lasery wykorzystujące pierwszą z wymienionych matryc określa się mianem Nd:YAG (skrót od ang. *yttrium aluminium garnet*), drugą zaś – Nd:szkło. Inne przykłady to Nd:YLF (YLiF₄–yttrium lithium fluoride) lub Nd:YVO₄(yttrium orthovanadate).



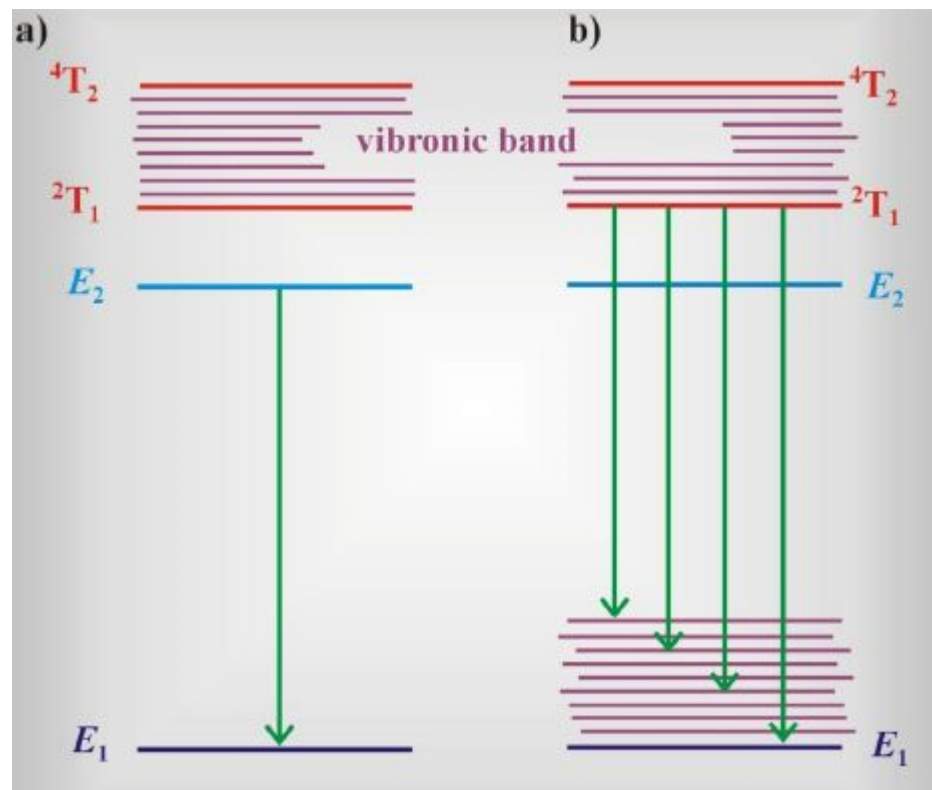
Laser neodymowy pompowany jest optycznie za pomocą lampy błyskowej lub diody luminescencyjnej ze stanu podstawowego E_0 do stanu wzbudzonego E_4 , na którym czas życia cząsteczek jest krótki. W wyniku przejść bezpromienistych następuje przejście do stanu metastabilnego E_3 , gdzie cząsteczki przebywają około 100 s. Inwersja obsadzeń dokonuje się między stanami E_3 i E_2 . Między tymi stanami zachodzi akcja laserowa, powodując emisję promieniowania z zakresu bliskiej podczerwieni o długości fali $1,064 \mu\text{m}$. Laser neodymowy może pracować w reżimie pracy ciągłej i impulsowej. Należy do grupy laserów nieprzestrzalnych.



Zastosowania lasera neodymowego są bardzo szerokie. Jest powszechnie stosowany w badaniach spektroskopowych. Jego duża moc powoduje, że jest doskonałym źródłem światła ciągłego i impulsowego. Najkrótsze impulsy lasera neodymowego, które można otrzymać w reżimie synchronizacji modów trwają dziesiątki pikosekund. Laser neodymowy stosowany jest do pompowania innych laserów (np. laserów barwnikowych). **Laser neodymowy jest wykorzystywany w wojsku i medycynie. Zakres jego stosowalności w medycynie jest ograniczony przez niewielką absorpcję wody w tym zakresie widmowym, główny składnik tkanki ludzkiej.** Schematyczny wykres zależności absorpcji w wodzie od długości fali promieniowania przedstawia poniższy rysunek, przy czym absorpcja w wodzie jest tu określona za pomocą długości drogi optycznej, jaką przechodzi promieniowanie o określonej długości fali, zanim zostanie całkowicie zaabsorbowane. Im mniejsza długość drogi optycznej, tym większy współczynnik absorpcji.



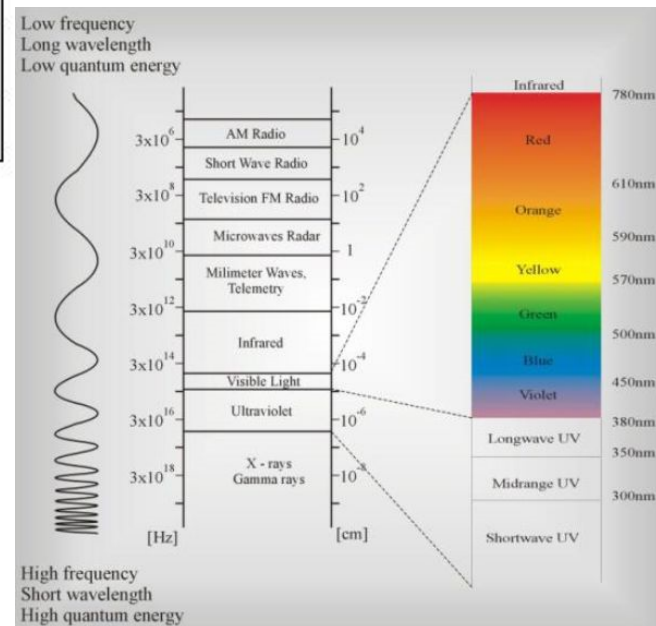
Lasery przestrajalne na ciele stałym (lasery wibronowe)



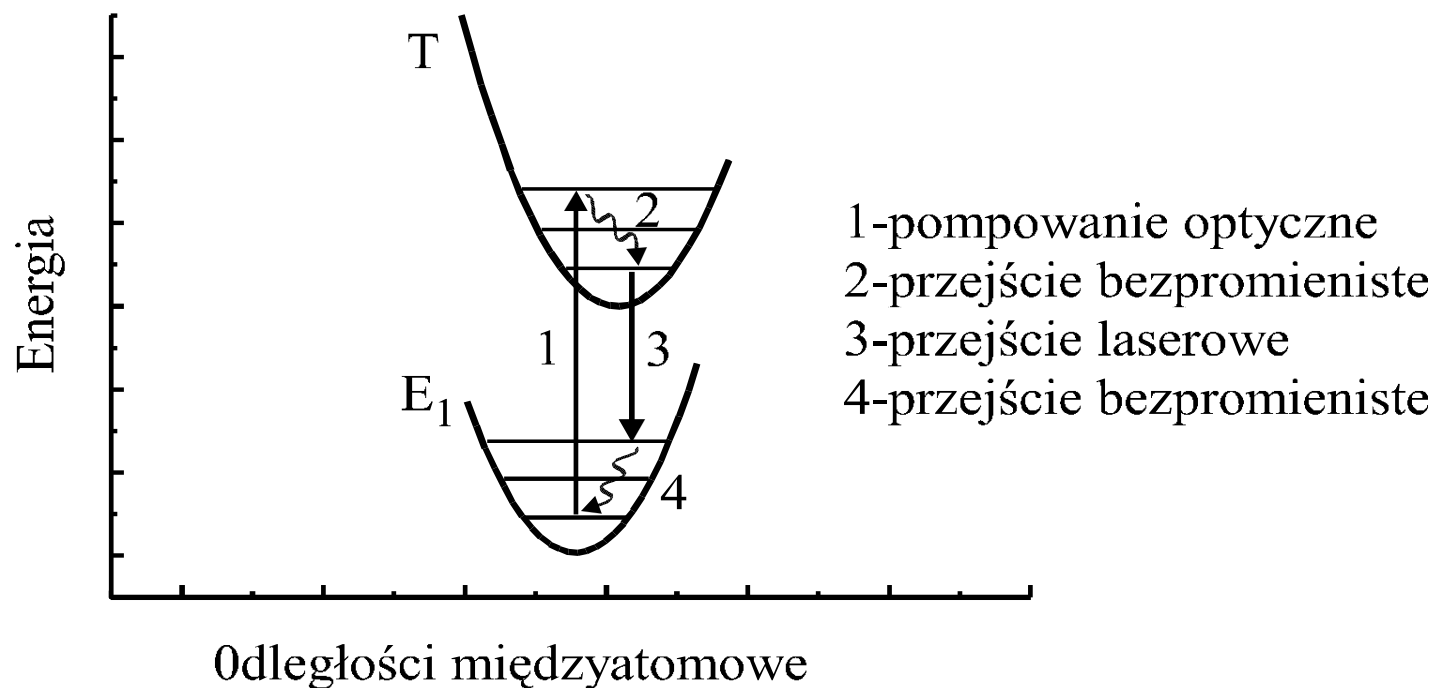
Lasery przestrajalne na ciele stałym (lasery wibronowe)

Lasery przestrajalne na ciele stałym

Ośrodek czynny	Sposób emisji	Zakres widmowy [nm]
Aleksandryt	ciągły	730 - 810
Ce:YLF	impulsowy	309 - 325
Co:MgF ₂	impulsowy	1750 - 2500
Cr:LiSrAlF ₆	ciągły, impulsowy	760 - 920
Ti:szafir	ciągły, impulsowy	660 - 1180

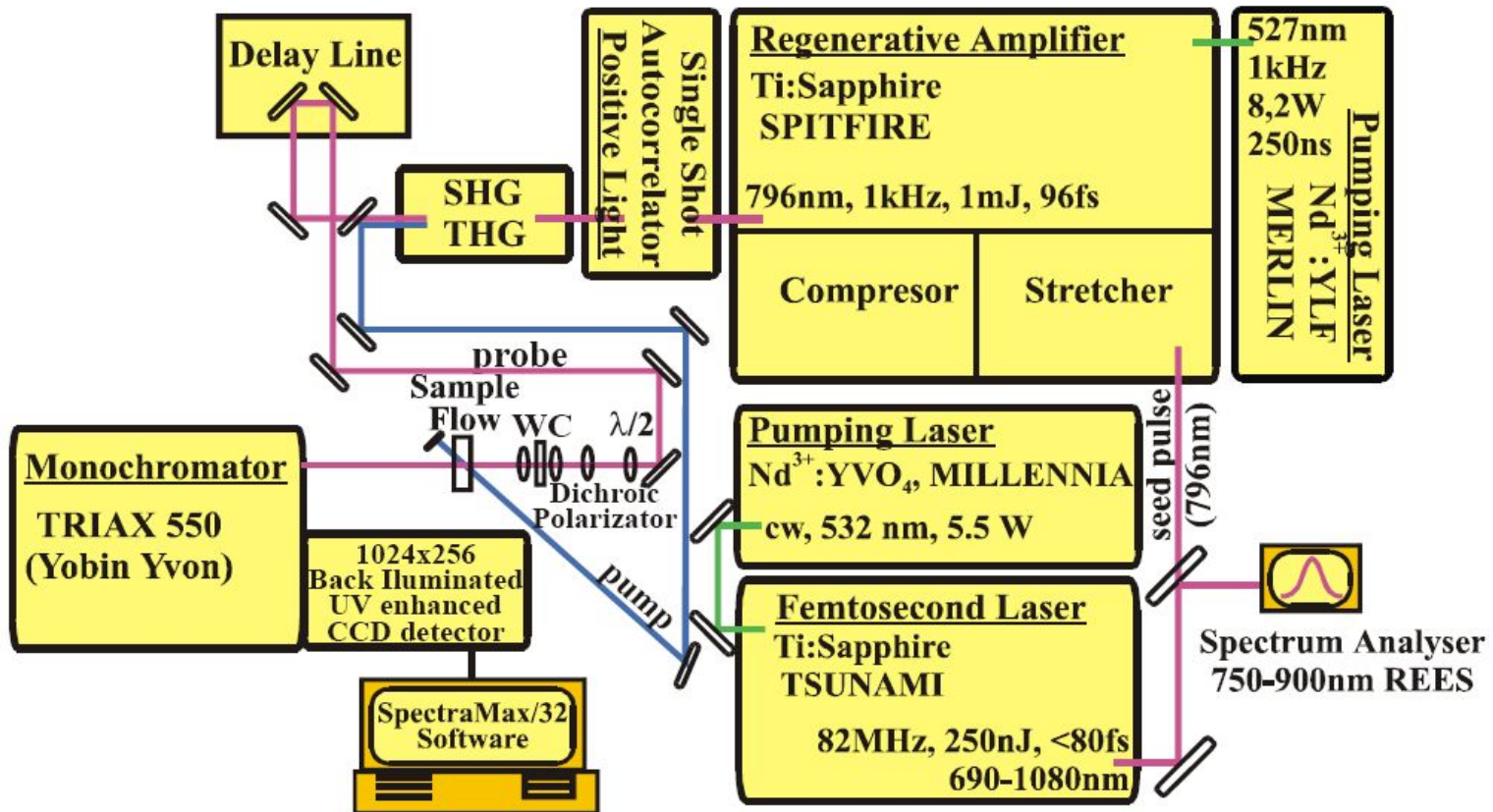


Światło wiązki pompującej (1) przenosi układ ze stanu elektronowego E_1 i podstawowego poziomu wibracyjnego $\nu=0$ do wzbudzonego stanu elektronowego T i wzbudzonych poziomów wibracyjnych. Wzbudzony układ oddaje po pewnym czasie energię w sposób bezpromienisty (2) przenosząc się do podstawowego stanu wibracyjnego $\nu=0$, pozostając nadal we wzbudzonym stanie elektronowym T. W trzecim etapie następuje promienista emisja (akcja laserowa) (3) między stanem (T; $\nu=0$) i stanem (E_1 ; $\nu>0$). Stan (E_1 ; $\nu>0$) zostaje szybko opróżniony, a cząsteczki przenoszą się do stanu podstawowego (E_1 ; $\nu=0$) w wyniku przejść bezpromienistych (4).



Lasery przestrajalne na ciele stałym znajdują zastosowanie głównie w podstawowych badaniach spektroskopowych i fizyce ultraszybkich procesów. Od niedawna lasery te mają jednak coraz więcej zastosowań praktycznych. Przydatność laserów tytanowo-szafirowych jest obecnie testowana w radarach laserowych i badaniu atmosfery. Możliwość dostrojenia lasera do ściśle określonej długości fali ułatwi identyfikację gazów w atmosferze. Niektóre lasery przestrajalne na ciele stałym (na **aleksandrycie**) mają **zastosowanie w medycynie do rozbijania kamieni nerkowych** i są testowane w dermatologii. Zastosowania laserów femtosekundowych może pozwolić na bardziej **precyzyjne operacje chirurgiczne** z pominięciem uszkodzeń tkanek otaczających dzięki zjawisku fotoablacji.

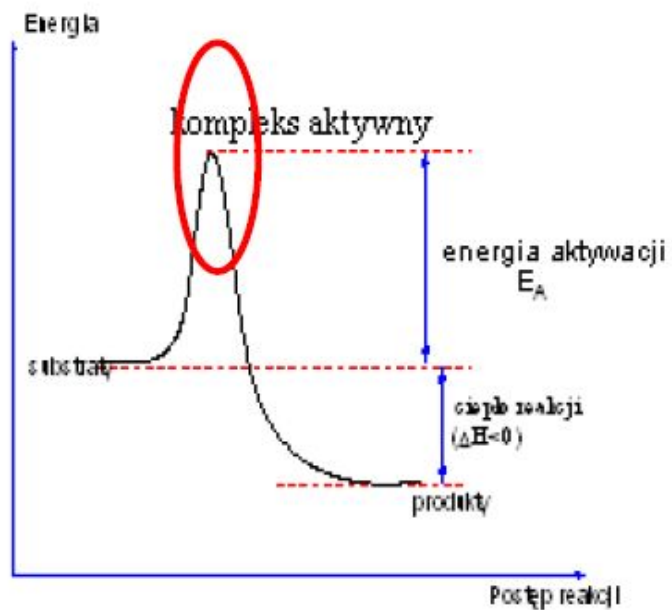
Femtosekundowa absorpcja UV/VIS/IR, metoda pump-probe



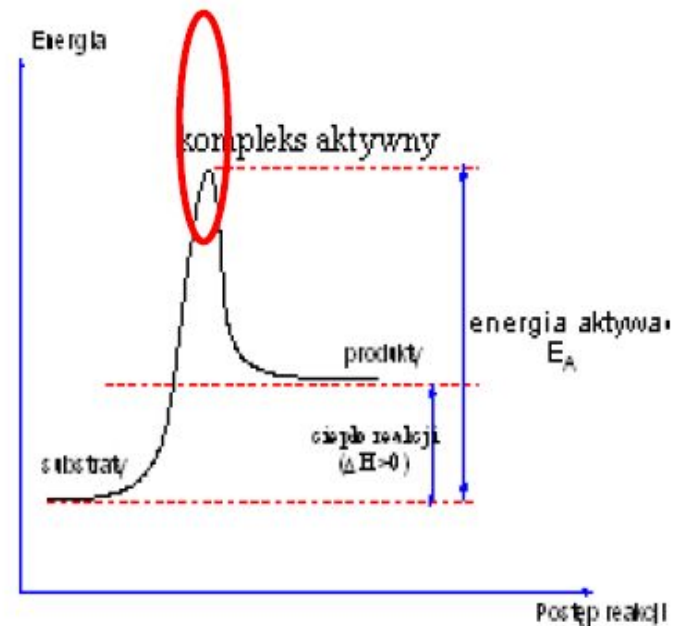
Zastosowania spektroskopii femtosekundowej

„fotografowanie reakcji chemicznych”

Reakcja egzotermiczna



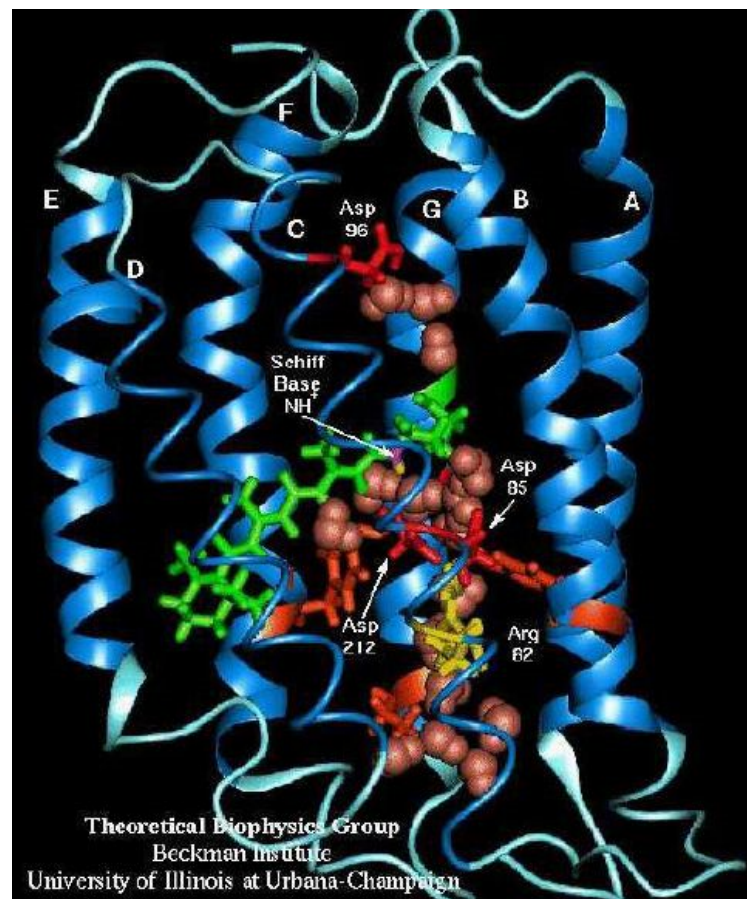
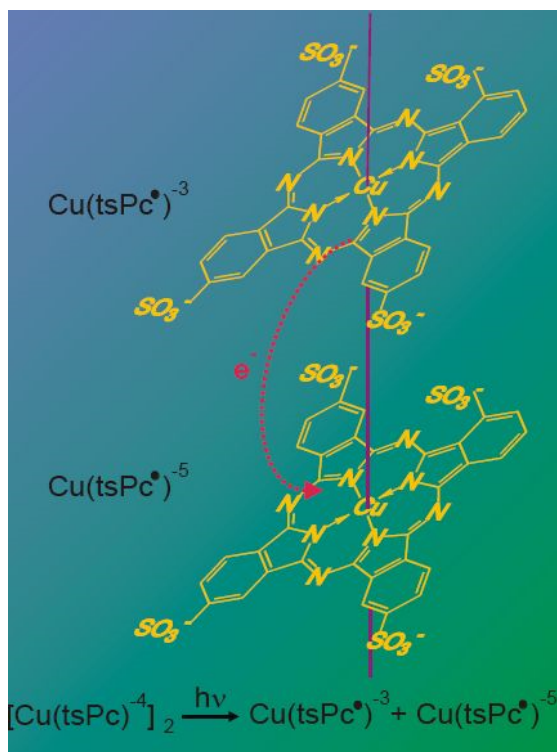
Reakcja endotermiczna



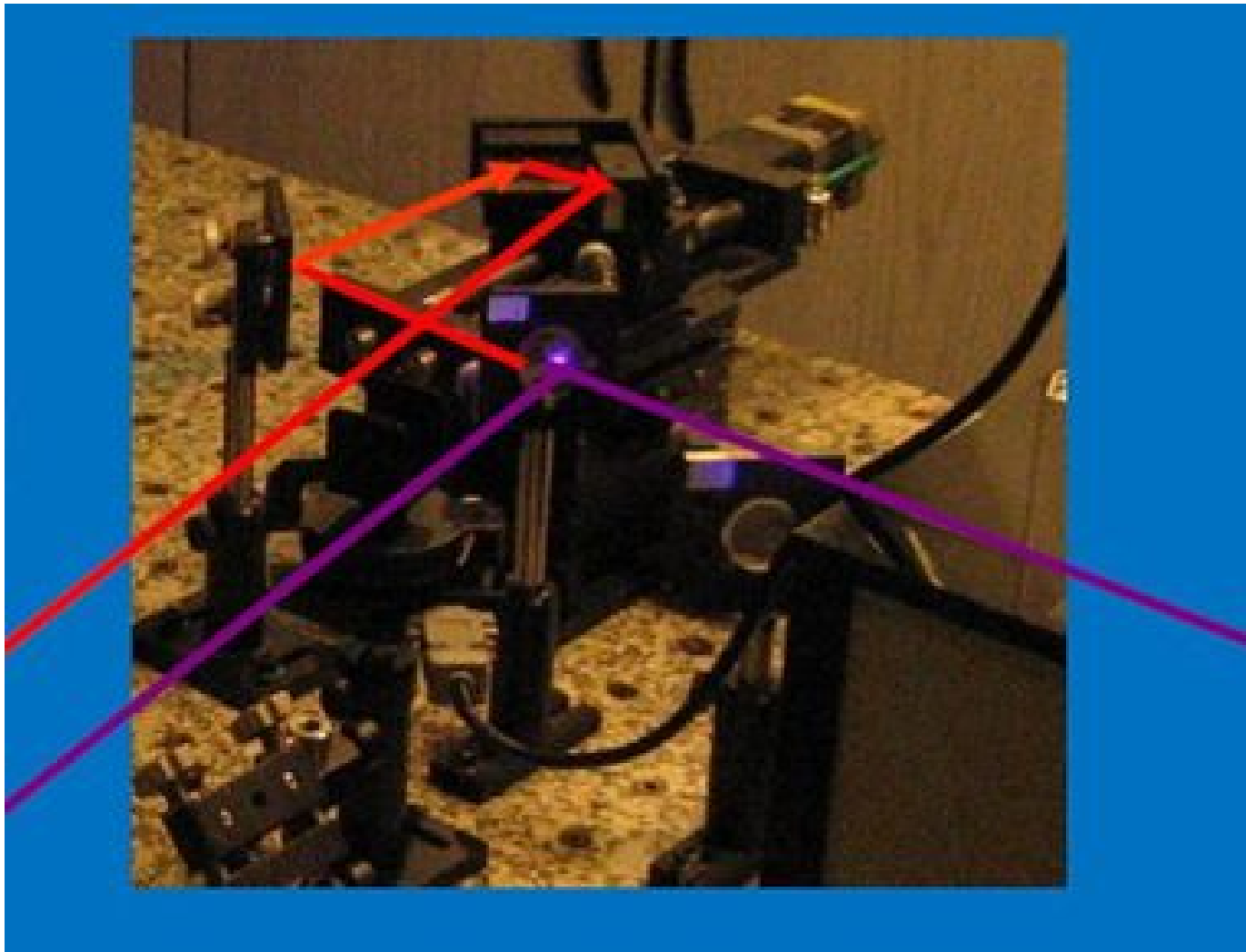
Badania procesów ultraszybkich :

-Fotochemia fotouczulaczy stosowanych w terapii PDT

-Fotocykl bakteriorodopsyny



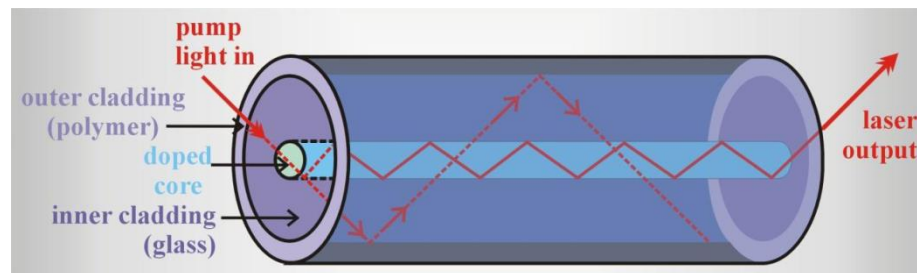
Metoda pump-probe

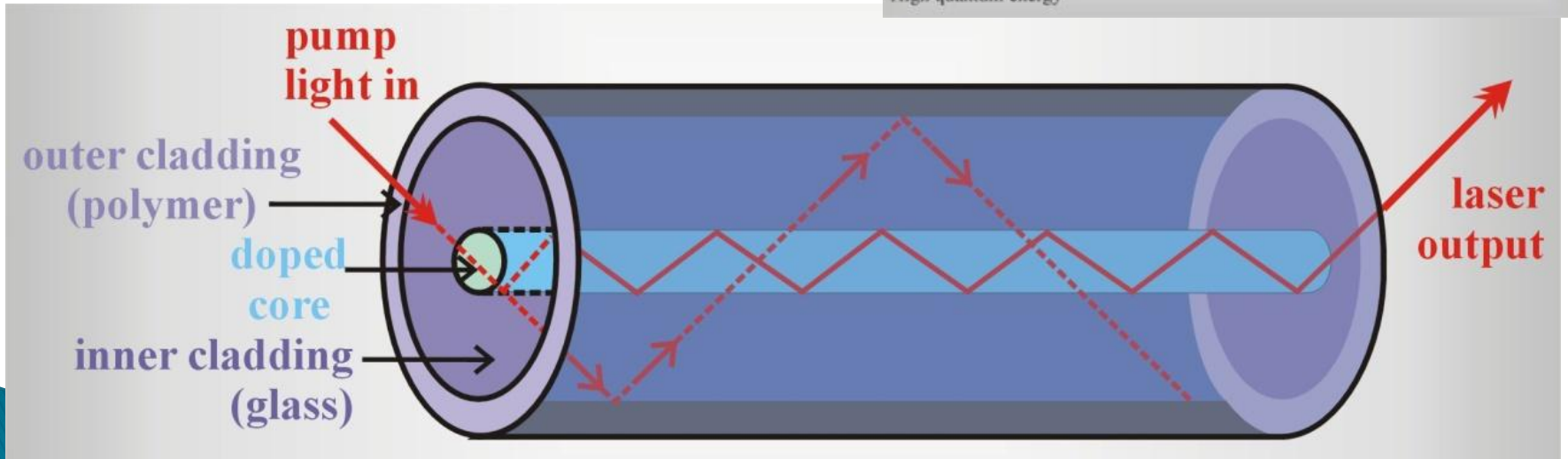
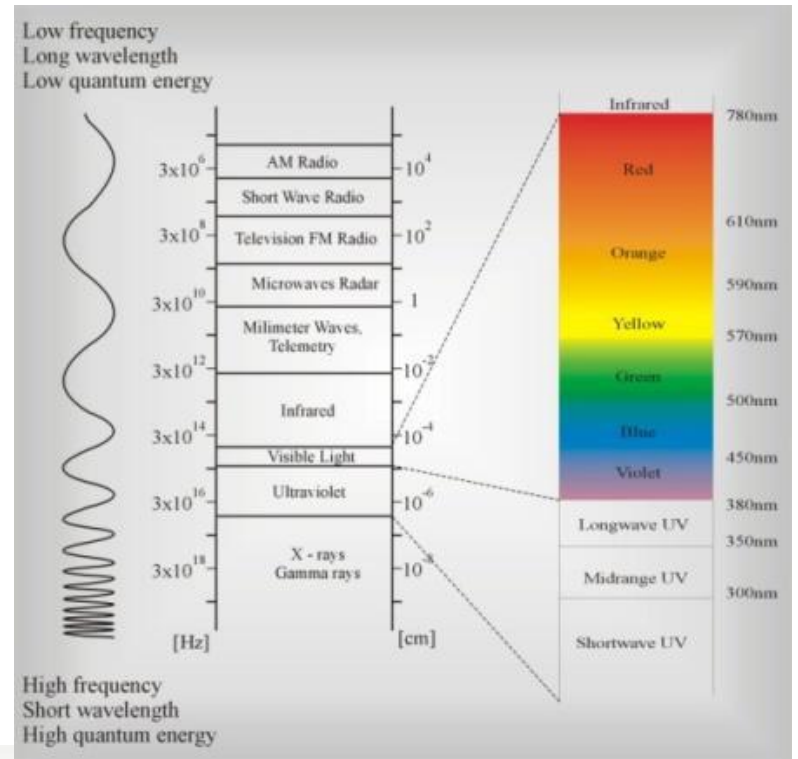
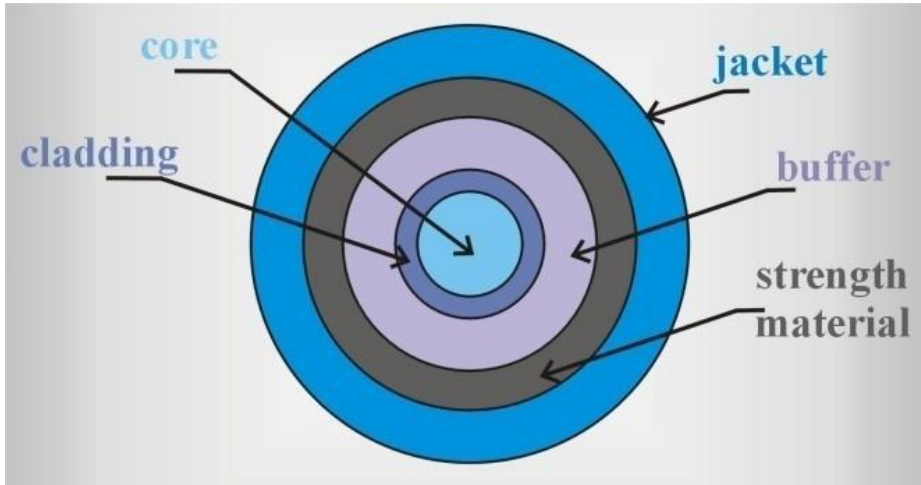


LASERY ŚWIATŁOWODOWE

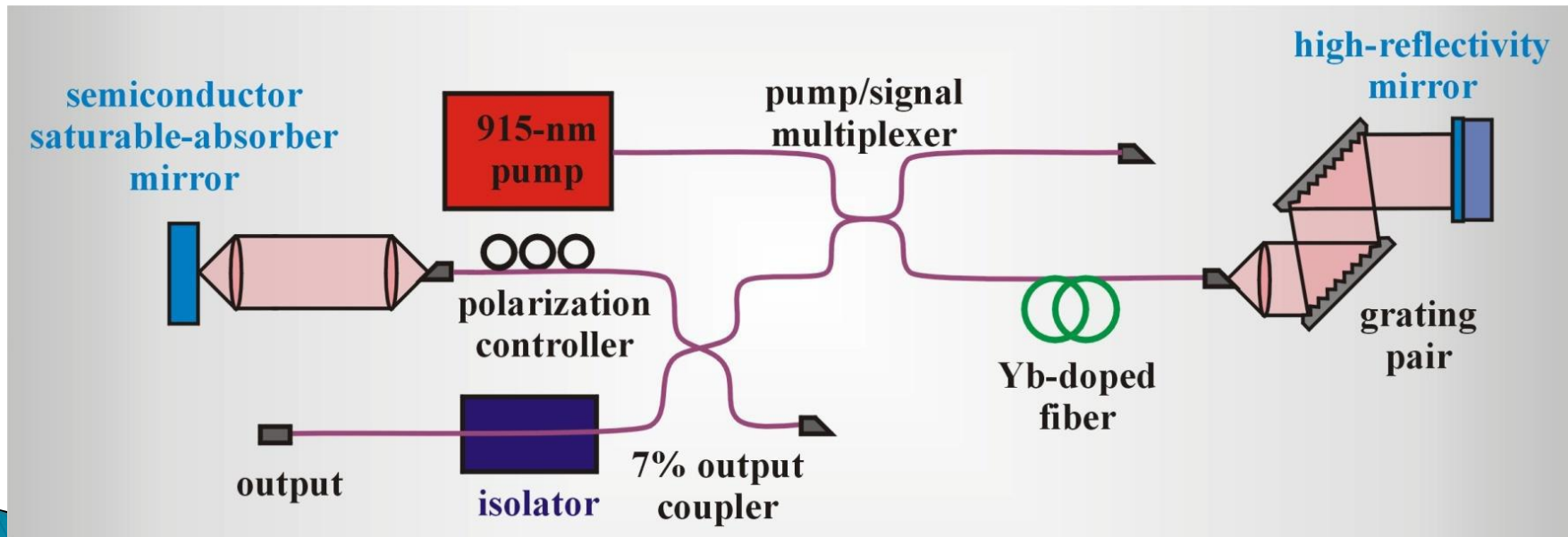
Laser światłowodowy składa się ze światłowodu działającego jako wnęka rezonansowa. Wnęki laserów światłowodowych są znacznie dłuższe od wnęk konwencjonalnych laserów. Wnęka rezonansowa takiego lasera może mieć długość dziesiątek lub nawet setek metrów.

Długość wnęki nie jest jednak problemem, gdyż światłowód może zostać zwinięty tak, aby mieścił się w pudełku o niewielkich rozmiarach. W laserach światłowodowych nie występują problemy związane z częstym zanieczyszczaniem się oraz niestabilnością wnęki rezonansowej. Wnętrze wnęki rezonansowej laserów światłowodowych pokrywa się erbem lub innym metalem ziem rzadkich (neodymem, talem) i na tak powstałą warstwę nanosi się warstwę kolejną, zwykle polimerową. W ten sposób powstaje podwójna powłoka, składająca się z warstwy wewnętrznej – szkła, oraz zewnętrznej – polimeru. Tak przygotowana podwójna warstwa pozwala uwięzić światło w światłowodzie wykorzystując zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia. Źródło światła, którym najczęściej jest wielomodowa dioda pompująca znajduje się po jednej ze stron światłowodu. Światło emitowane przez to źródło powoduje inwersję obsadzeń materiału, którym pokryty jest od wewnątrz światłowód.





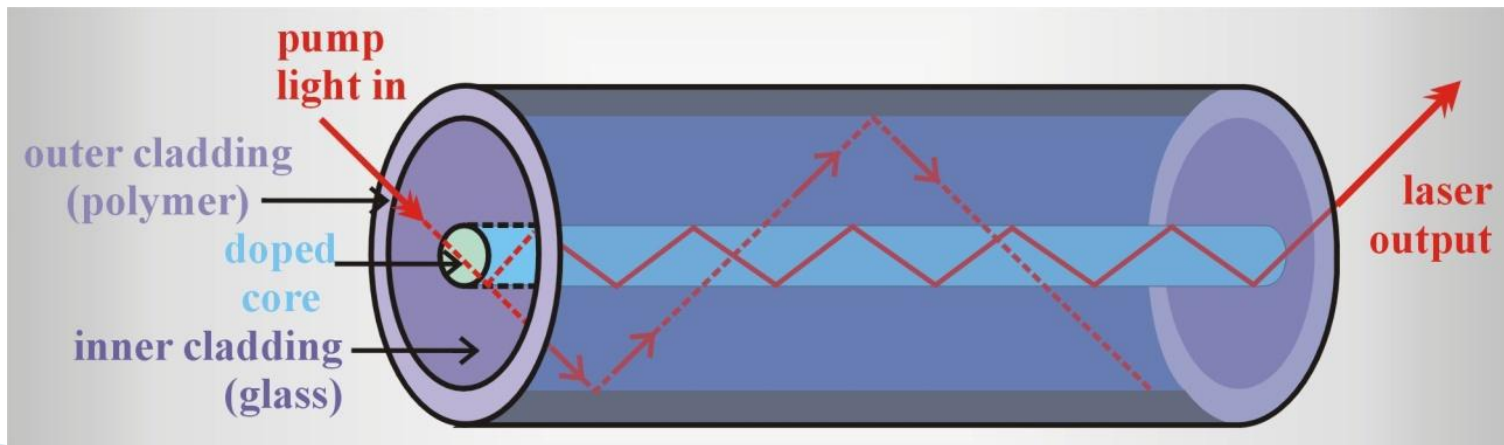
Światłowód domieszkowany Yb jest pompowany jednomodowym laserem diodowym emitującym $\lambda=915$ nm o średniej mocy 130 mW. Synchronizację modów uzyskuje się wykorzystując lustro wykonane z półprzewodnikowego nasycającego się absorbenta. Półprzewodnikowe lustro AlGaAs/GaAs używane jest jako reflektor Bragga. Zwykle posiada ono szerokość pasmową 100 nm. Dwie siatki dyfrakcyjne kompensują dyspersję światła w światłowodzie. Laser jest przestrajalny w zakresie 980 do 1100 nm. Odpowiednie częstotliwości możemy wybierać zmieniając długość wnęki rezonansowej poprzez regulację kąta nachylenia lustra całkowicie odbijającego promieniowanie. Czas trwania impulsów w reżimie synchronizacji modów zmienia się w zakresie 1,6 do 2.0 ps w zależności od zakresu przestrajalności. Typowa wyjściowa moc wynosi około 3 mW



Lasery światłowodowe stały się alternatywą dla tradycyjnych laserów na ciele stałym i są udoskonalane w laboratoriach na całym świecie. Jednak wiele zastosowań wymaga laserów wytwarzających impulsy o średniej mocy watów, nieosiągalnych jak na razie w laserów światłowodowych.

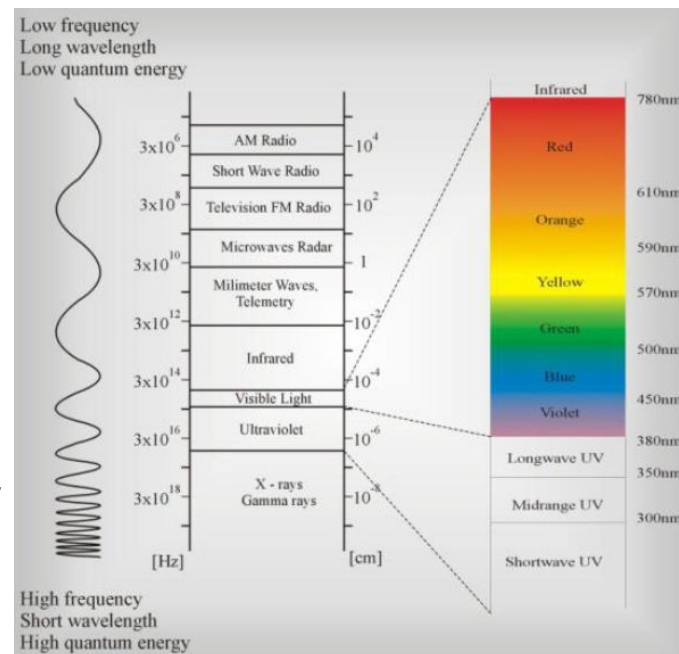
Z tego powodu laser Ti:Szafir pozostaje niedościgniony jako źródło przestrajalnych w szerokim zakresie ultrakrótkich impulsów o czasie impulsu < 100 fs średniej mocy rzędu 2 W w reżimie synchronizacji modów. Dzięki postępom w dziedzinie wzmacniania impulsów wytwarzanych w laserach światłowodowych można już jednak wytwarzać impulsy o większej mocy.

Udało się już wygenerować wiązkę o mocy 13 W w wyniku wzmocnienia impulsu z lasera światłowodowego pracującego w trybie synchronizacji modów stosując wzmocnienie światła z wykorzystaniem modulacji nieliniowej i dodatniej dyspersji światła na ośrodku nieliniowym.



Lasery gazowe z zakresu widzialnego

Laser helowo–neonowy może emitować wiele linii z zakresu widzialnego i podczerwieni, ale w laserach dostępnych na rynku najczęściej wykorzystywana jest linia czerwona 632,8 nm o mocy kilku miliwatów. Ośrodkiem czynnym lasera helowo–neonowego jest mieszanina gazowa helu i neonu. Pompowanie lasera odbywa się przez wyładowanie elektryczne pod napięciem około 10 kV w rurze wyładowczej o rozmiarach od 10 cm do 2 m zawierającej gaz pod ciśnieniem kilku torów. Atomy helu pochłaniają więcej energii niż atomy neonu i w pierwszym etapie to one zostają wzbudzone do wyższych poziomów elektronowych. W drugim etapie atomu helu przekazują energię atomom neonu, których stany wzbudzone mają energię zbliżoną do atomów helu. Następnie, atomy neonu przenoszą się ze stanów wzbudzonych do stanów metastabilnych, skąd następuje emisja odpowiadająca przejściu laserowemu. Najczęściej wykorzystywane przejścia lasera helowo–neonowego odpowiadają zakresowi widzialnemu, w szczególności linii czerwonej o długości fali 632,8 nm.



Lasery gazowe z zakresu widzialnego

Przejścia w podczerwieni dla długości fali 1523,5 nm i 3392 nm są rzadziej wykorzystywane w masowej produkcji ze względu na wyższe ceny spowodowane specjalną optyką dla podczerwieni. Mają one jednak kilka specyficznych zastosowań. Na przykład linia 1523,5 nm jest z powodzeniem wykorzystywana do testowania światłowodów krzemowo-szklanych ze względu na minimalne straty w tym obszarze widmowym.

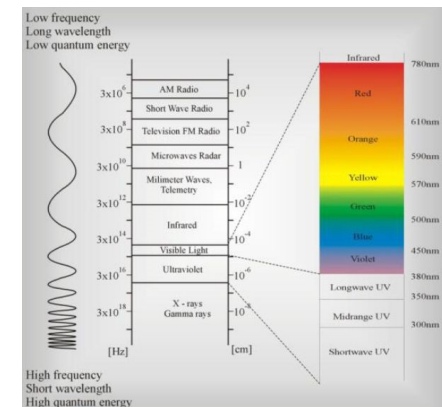
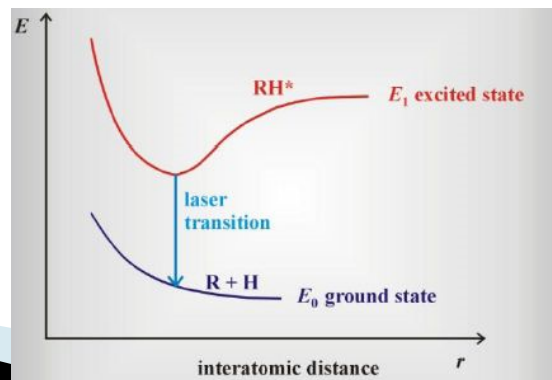
Wymieniliśmy już niektóre zastosowania laserów helowo-neonowych. Ich inne zastosowania to

- budownictwo, w którym służą do wyznaczania linii prostych wiązką lasera przy ustawianiu konstrukcji, budowie tuneli, montażu rur kanalizacyjnych itd.
- Wykorzystywane są również do wyznaczania pozycji pacjenta poddanego naświetlaniu promieniowaniem X itd.

Lasery gazowe z zakresu nadfioletu

Lasery ekscimerowe

Lasery ekscimerowe, obok lasera azotowego, są najpopularniejszymi laserami gazowymi generującymi promieniowanie z zakresu nadfioletu. Lasery ekscimerowe emitują promieniowanie o impulsach trwających od kilku nanosekund do setek nanosekund. Ośrodkiem czynnym jest mieszanina gazów szlachetnych i halogenów, które tworzą krótkożyjące, niestabilne w stanie podstawowym halogenki gazów szlachetnych, np.: ArF, KrF, XeF, XeCl. Ekscimer jest skrótem od angielskiego wyrażenia *excited dimer* i oznacza dimer RH^* w stanie wzbudzonym o energii E_1 , który nie istnieje w stanie podstawowym o energii E_0 . Przejścia laserowe zachodzące między stanem wzbudzonym ekscimeru E_1 i stanem podstawowym E_0 , w którym cząsteczka przestaje istnieć, powodują jednocześnie zmniejszanie liczby obsadzeń niższego poziomu, czyli zwiększają inwersję obsadzeń między stanami E_1 i E_0 .



Ośrodek czynny składa się w 90 – 99% z gazu obojętnego (hel, neon), który służy do przenoszenia energii. Stężenie gazów szlachetnych, które wchodzi w reakcję z halogenem, wynosi 1 – 9%. Stężenie halogenu jest niewielkie i wynosi 0,1 – 0,2%. Pompowanie lasera, które powoduje powstanie ekscimeru w stanie wzbudzonym, może być realizowane na wiele sposobów: 1) **wyładowanie elektryczne w gazie**, 2) **wzbudzenie wiązką elektronową** lub 3) **wzbudzenie mikrofalowe**. Często dokonuje się wstępnej jonizacji w kolumnie wyładowawczej, aby wygenerować atomowy halogen. Gaz laserów ekscimerowych ulega degradacji w czasie akcji laserowej nawet wtedy, gdy laser nie pracuje. W laserach dostępnych na rynku halogen należy więc uzupełniać okresowo, zazwyczaj po 10^3 – 10^6 impulsach. Należy pamiętać, że lasery ekscimerowe, choć często używane w laboratoriach, przemyśle i medycynie, są niebezpieczne ze względu na toksyczny ośrodek czynny. Należy więc zachować szczególne środki bezpieczeństwa.

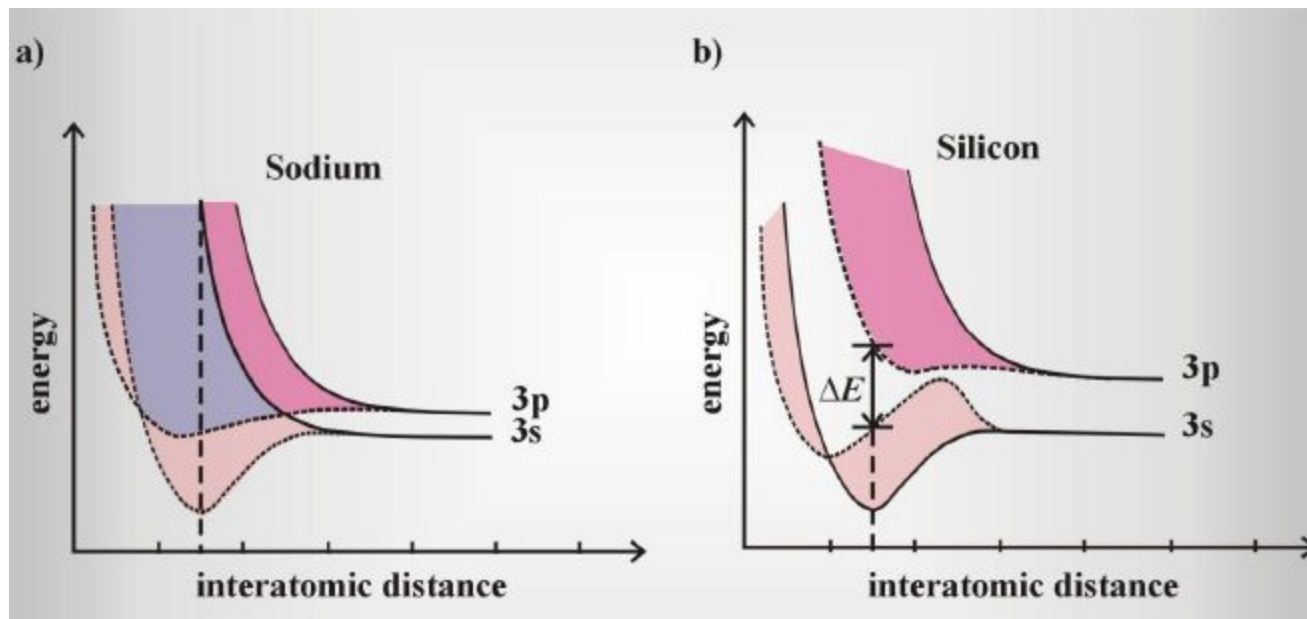
Stosowanymi zazwyczaj elementami optycznymi dla laserów XeCl są kwarc lub stopiony krzem. W laserach z fluorem stosuje się elementy optyczne wykonane z MgF_2 , fluor bowiem trawi zarówno kwarc jak i krzem, niszcząc je. Najczęściej stosowane linie emisyjne laserów ekscimerowych to: 193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl) i 350 nm (XeF). Moc laserów ekscimerowych wynosi od 1 W do 100 W (dla KrF i XeCl nawet więcej). Największym z opisanych w literaturze laserów ekscimerowych jest Aurora w Los Alamos National Laboratory (5ns, 5 kJ, KrF), użyty do kontrolowanych laserowo eksperymentów syntezy jądrowej. Lasery ekscimerowe używane są w laboratoriach naukowych do pompowania laserów barwnikowych oraz do generowania wyższych harmonicznych z zakresu ultrafioletu próżniowego. Są ważnym instrumentem do badania stężenia ozonu w górnych warstwach atmosfery i do monitorowania zanieczyszczeń. Lasery ekscimerowe używane są w produkcji półprzewodników, pozwalając miniaturyzować obwody scalone. Służą do rysowania wzorów, kodów handlowych na ceramice, szkłe, plastiku i metalu. Większość zastosowań medycznych laserów ekscimerowych znajduje się obecnie na etapie klinicznego testowania lub jest we wczesnych etapach badań.

Laser azotowy

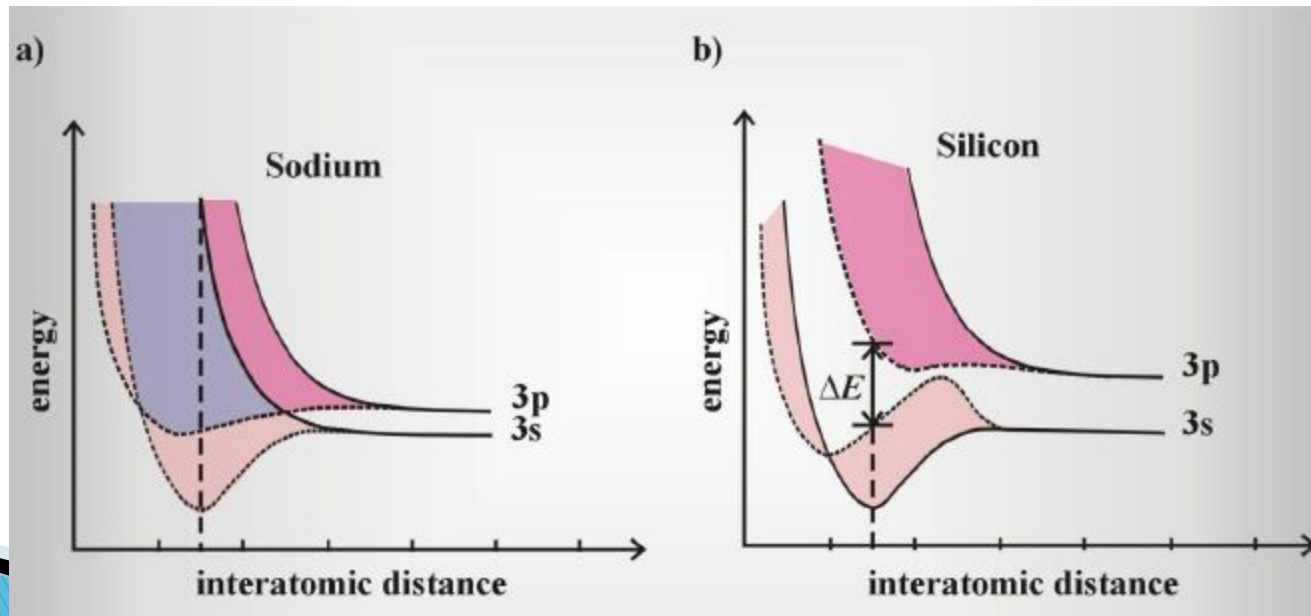
Laser azotowy emituje promieniowanie o długości fali 337 nm. Przez wiele lat był wykorzystywany do pompowania laserów barwnikowych oraz miał wiele innych zastosowań. Potem został jednak częściowo wyparty przez lasery ekscimerowe i lasery neodymowe, których trzecia i czwarta harmoniczna pokrywały podobny zakres widmowy. Lasery azotowe są używane w dalszym ciągu w laboratoriach dydaktycznych i w wielu praktycznych zastosowaniach ze względu na niską cenę. Ośrodkiem czynnym w laserach azotowych jest gazowy azot o ciśnieniu w kolumnie wyładowawczej między 2700 Pa i 101 Pa. Laser azotowy generuje impulsy o czasie trwania od 300 ps (dla ciśnienia atmosferycznego) do 10 ns (dla ciśnienia 2700 Pa). Częstość repetycji zmienia się od 1 do 100 Hz. Dla laserów o niskiej częstości repetycji stosuje się izolowane od otoczenia kolumny wyładowawcze, a dla laserów o wysokiej częstości repetycji stosuje się wersję przepływową. Energia impulsu zmienia się od mikrodżuli do 10 milidżuli.

Lasery diodowe

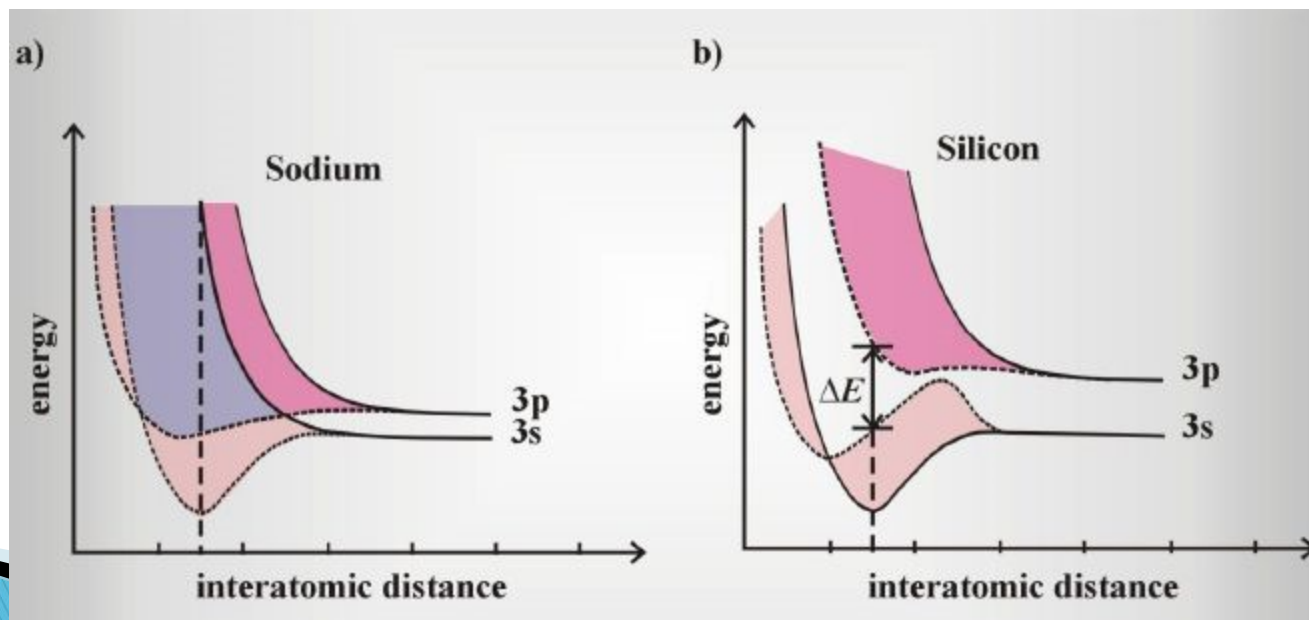
Każdy materiał ma charakterystyczne dla siebie własności przewodzenia prądu elektrycznego. Biorąc za podstawę sposób przewodzenia prądu, możemy dokonać następującej klasyfikacji materiałów: a) metale, b) półprzewodniki, c) izolatory. Gdy atomy upakowane są gęsto, tak jak w ciele stałym, zamiast dyskretnych poziomów energetycznych obserwujemy poszerzone pasma. Jest jednak zasadnicza różnica w schemacie poziomów energetycznych występujących w metalach, półprzewodnikach i izolatorach.



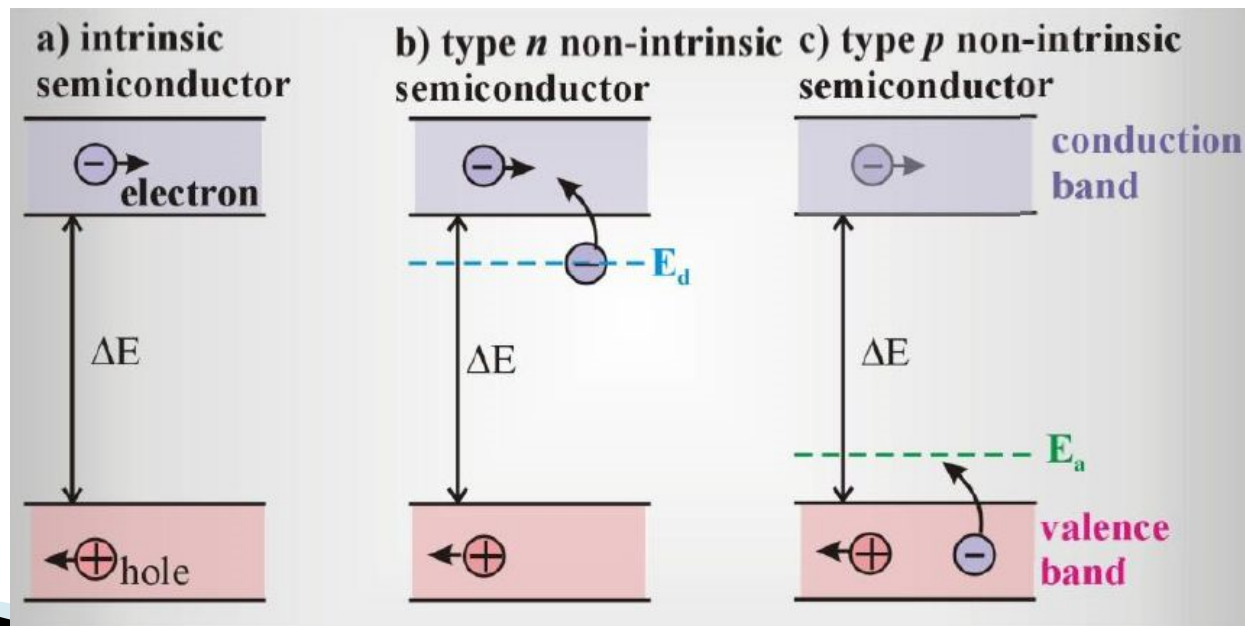
Weźmy dla przykładu metal, np. sód (^{11}Na). Jego struktura elektronowa jest następująca: $(1s)^2 (2s)^2 (2p)^6 (3s)^1$. Poziom 3s jest znacznie poszerzony, podobnie jak inne zajęte i nie zajęte poziomy elektronowe. W metalach sąsiednie poziomy nakładają się. Oznacza to, że ostatni zapełniony elektronami poziom energetyczny 3s i pierwszy niezapełniony poziom 3p nakładają się i elektron może znaleźć się bądź na poziomie 3s, bądź 3p. Ten obszar nakładania się poziomów nosi nazwę pasma przewodnictwa, gdyż elektrony 3s i 3p są uwspólnione dla wszystkich atomów i mogą swobodnie wędrować przez ciało stałe.



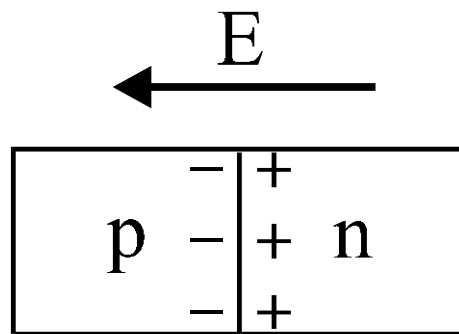
W półprzewodnikach (np. w krzemie ^{14}Si : $(1s)^2 (2s)^2 (2p)^6 (3s)^2 (3p)^2$) orbitale zewnętrzne też są poszerzone, ale się nie nakładają. Między pasmem 3s i 3p występuje przerwa energetyczna ΔE . Elektrony 3s znajdują się w paśmie walencyjnym, podczas gdy poziom 3p (pasmo przewodnictwa) pozostaje pusty. Gdy przerwa energetyczna ΔE staje się bardzo duża mamy do czynienia z izolatorem. W izolatorach przerwa ΔE jest rzędu 3eV, co oznacza, że energia zderzeń oraz inne formy energii termicznej cząsteczek są niewystarczające do przeniesienia elektronu na wyższy poziom. W półprzewodnikach przerwa energetyczna jest dużo mniejsza (1 – 1,5eV) i w pokojowej temperaturze część cząsteczek ma energię wystarczającą do przeniesienia elektronu do pasma przewodnictwa. Tak więc, aby wydostać się z metalu, elektron musi otrzymać energię równą pracy wyjścia.



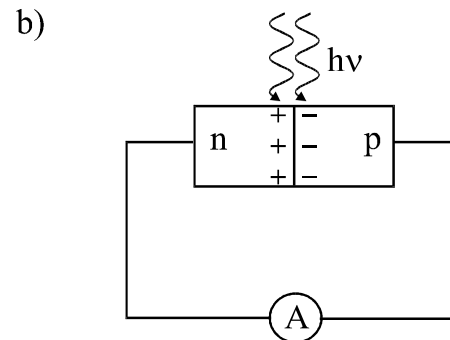
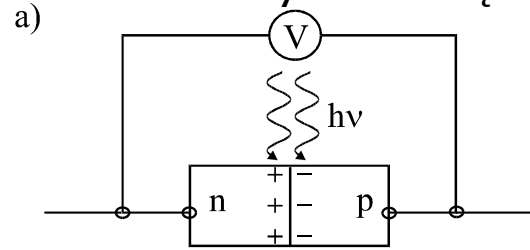
Gdy do matrycy krzemu $^{14}\text{Si} ((1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^2)$ dodamy fosfor $^{15}\text{P} ((1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^3)$, w którym energia elektronów w stanie 3s (E_d) jest zbliżona do energii elektronów w paśmie przewodnictwa 3p krzemu, wówczas elektron fosforu (donora) łatwo przeskoczy do pasma przewodnictwa krzemu (akceptora). Półprzewodniki domieszkowane w ten sposób dostarczają więc dodatkowych elektronów i noszą nazwę *półprzewodników typu n*. Jeżeli, odwrotnie, dodamy atomów glinu $^{13}\text{Al} ((1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^1)$ o energii elektronu na poziomie 3s (E_a) zbliżonej do energii pasma walencyjnego 3s krzemu, to elektron z krzemu przeskoczy na poziom E_a glinu i w paśmie walencyjnym krzemu wykreuje się dziura. Półprzewodniki domieszkowane w ten sposób noszą nazwę *półprzewodników typu p*.



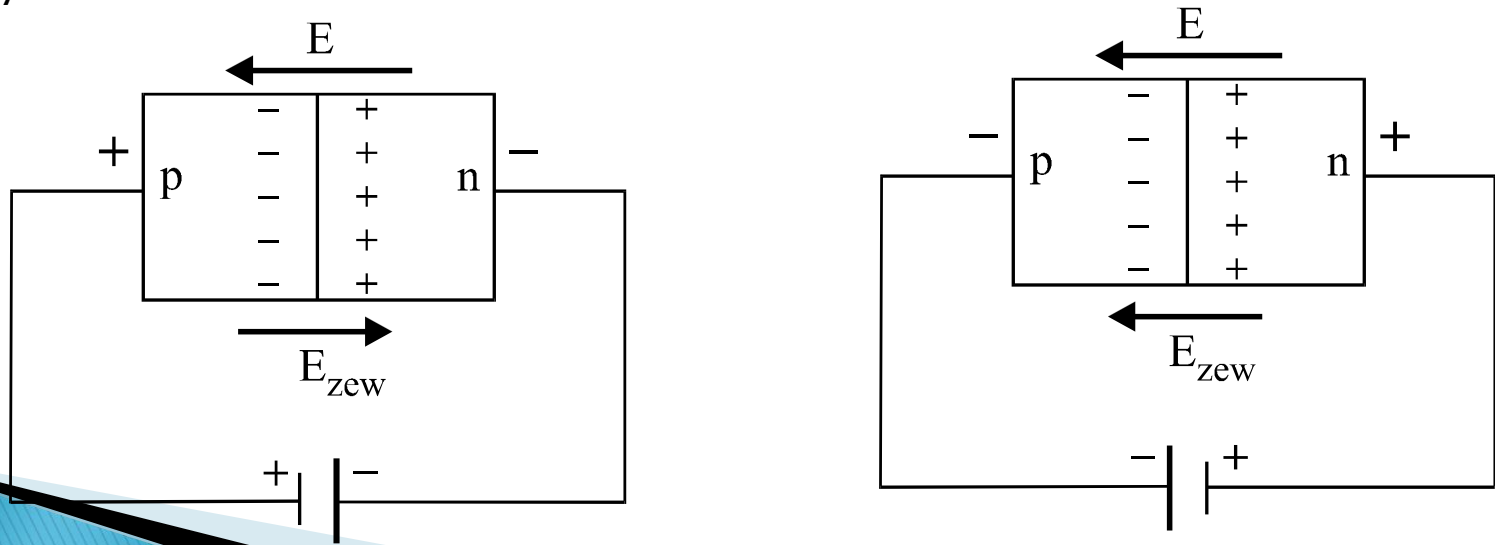
Jeżeli dwa różne półprzewodniki doprowadzimy do bezpośredniego kontaktu, tworząc złącze $p - n$, to nadmiar dziur z regionu p migruje do regionu n , a nadmiar elektronów porusza się w przeciwnym kierunku. W wyniku tych migracji obszar w bezpośrednim sąsiedztwie złącza zostaje pozbawiony ładunku, a po stronie półprzewodnika p powstanie nadmiar ładunku ujemnego oraz nadmiar ładunku dodatniego po stronie półprzewodnika n . Na skutek takiego rozkładu ładunku powstanie różnica potencjałów V_0 między obszarem p i obszarem n wywołująca pole elektryczne o natężeniu E skierowane w kierunku półprzewodnika p . Pole to zapobiega dalszemu przemieszczaniu się ładunków między obszarami n i p .



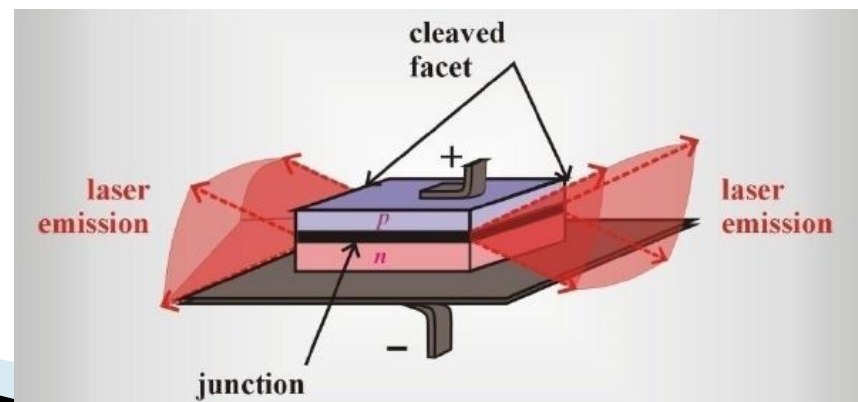
Złącze $n - p$, na które pada światło, nosi nazwę *fotodiody*.
 Jeżeli na złącze $p - n$ pada promieniowanie generowane są nowe pary elektron - dziura, które są przemieszczane przez wewnętrzne pole E , dziury poruszają się w kierunku obszaru p , elektrony - w kierunku obszaru n , powodując zmniejszenie bariery potencjału V_0 .
 Gdy do złącza $p - n$ dołączymy woltomierz, wskaże on napięcie proporcjonalne do natężenia promieniowania padającego na złącze. Taka fotodioda nosi nazwę *detektora fotowoltaicznego*.
 Gdy obszary p i n zostały połączone zewnętrznym przewodem, w którym popłynie prąd proporcjonalny do natężenia promieniowania padającego na złącze $p - n$. Taka fotodioda nazywa się *detektorem fotoprzewodzącym*.



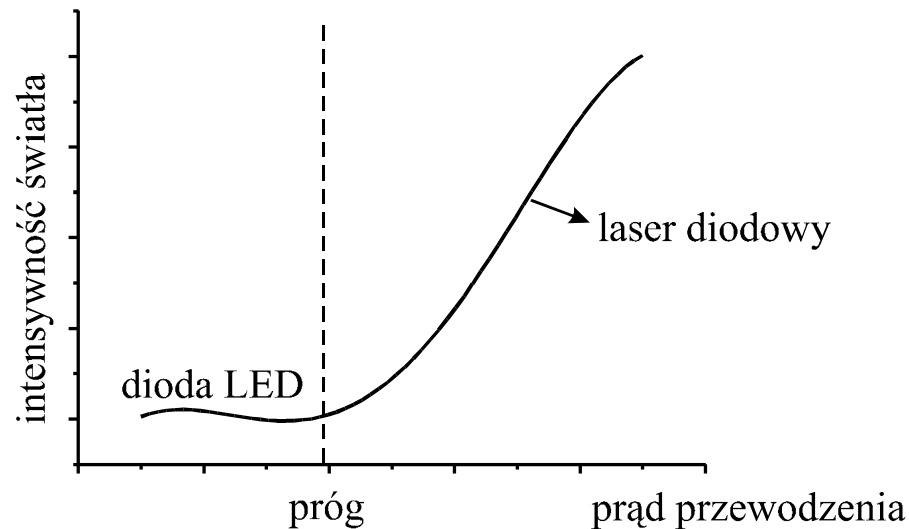
Wyżej opisane zjawiska zachodzące na złączu można wzmocnić lub osłabić stosując zewnętrzne źródło prądu elektrycznego. Jeżeli biegun ujemny źródła zostanie dołączony do obszaru n , a dodatni do obszaru p , to mówimy, że złącze $p - n$ jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia (ang. *forward bias*). Oznacza to, że nośniki ładunku, zarówno dziury z obszaru p , jak i elektrony z obszaru n , płyną w kierunku złącza pod wpływem pola zewnętrznego E_{zew} . Pole E_{zew} jest skierowane przeciwnie do pola wewnętrznego E , które powstało na skutek polaryzacji złącza $p - n$. Lasery półprzewodnikowe, które omówimy w następnym paragrafie, wykorzystują zjawisko polaryzacji złącza $p - n$ w kierunku przewodzenia. Z kolei, gdy biegun ujemny źródła zostanie dołączony do obszaru p , a dodatni do obszaru n , wówczas mówimy, że złącze $p - n$ jest spolaryzowane zaporowo (ang. *reversed bias*). Na polaryzacji zaporowej złącza opiera się działanie fotodiod woltaicznych i fotoprzewodzących oraz fotodiod lawinowych.



Najprostsza dioda laserowa jest fotodiodą z polaryzacją złącza $p - n$ w kierunku przewodzenia. Przykładając do złącza $p - n$ napięcie, które wywoła silny prąd w kierunku przewodzenia, powodujemy przepływ dziur i elektronów w kierunku złącza. Na złączu swobodne elektrony z obszaru n są pułapkowane przez dziury z obszaru p , co prowadzi do rekombinacji i uwolnienia energii. Energia ta może być uwolniona w postaci nieselektywnego ciepła (tak jak w półprzewodnikach krzemowych i germanowych) lub w postaci fotonów o energii równej różnicy ΔE między pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa. Promienisty sposób oddawania energii obserwuje się w materiałach należących do grupy III - V oraz niektórych materiałach grup II - VI. Należy zdawać sobie sprawę z tego, że omawiana w poprzednim paragrafie fotodioda, choć ilustruje zjawisko, jest tylko uproszczonym modelem diody laserowej. Dostępne na rynku diody laserowe wymagają stosowania zaawansowanych technologii, wykorzystujących wyrafinowane metody nakładania kolejnych, często bardzo cienkich (rzędu kilku nanometrów) warstw półprzewodnikowych. Jednak idea pozostaje taka sama jak dla fotodiody z polaryzacją złącza $p - n$ w kierunku przewodzenia. Jeżeli spowodujemy, że światło wyemitowane na złączu $p - n$ zostanie odbite na krawędzi diody i powtórnie zawrócone do półprzewodnika, zostaną wybite dodatkowe elektrony z pasma walencyjnego i przeniesione do pasma przewodnictwa. Wybite elektrony ponownie rekombinują z dziurami w paśmie przewodnictwa pod wpływem przyłożonego prądu (czyli wracają do pasma walencyjnego), wysyłając promieniowanie o energii równej różnicy energii między pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa ΔE .



Rolę zwierciadeł rezonatora optycznego w diodach laserowych pełnią wypolerowane powierzchnie na końcach kryształu. Inwersja obsadzeń zachodzi między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa. W warunkach równowagi liczba przejść elektronowych z poziomu walencyjnego na poziom przewodnictwa jest równy liczbie przejść odwrotnych, czyli liczbie aktów rekombinacji elektron – dziura. W warunkach inwersji obsadzeń liczba aktów rekombinacji znacznie przewyższa liczbę aktów generowania par elektron – dziura. W praktyce oznacza to, że dla małych wartości przyłożonego prądu w kierunku przewodzenia układ pracuje jako fotodioda luminescencyjna (LED), a dopiero po przekroczeniu pewnej granicznej wartości prądu, dla której emisja wymuszona przewyższa wewnętrzne straty, urządzenie zaczyna pracować jak laser diodowy.

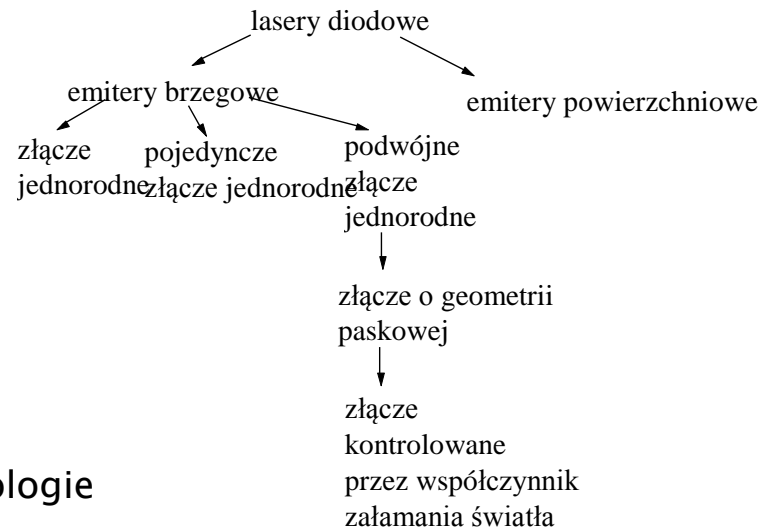


Trzeba pamiętać, że choć pierwsze lasery diodowe powstały 30 lat temu, to lasery diodowe emitujące światło widzialne zostały zaprezentowane dopiero w 1987 roku. Pierwsze lasery diodowe emitowały promieniowanie o długości fali 670 nm o mocy kilku miliwatów. Malejąca cena, małe rozmiary i stosunkowo wysoka moc spowodowały, że lasery diodowe zaczęły wypierać gazowe lasery helowo–neonowe. Supermarkety coraz częściej używają laserów diodowych jako skanerów kodów kreskowych. W diagnostyce medycznej coraz częściej zastępuje się linię 630 nm lasera HeNe linią 670 nm lasera diodowego. Zastosowania lasera helowo–neonowego zaczynają ograniczać się do holografii i niektórych badań naukowych – tam, gdzie wymagania dotyczące spójności i jakości wiązki są istotne.

Lata dziewięćdziesiąte poświęcone były intensywnym badaniom w celu zbudowania i udoskonalenia laserów diodowych emitujących światło niebieskie. Diody laserowe służą do odczytywania informacji zawartej na dyskach CD–ROM,

jak również do zapisywania informacji na dyskach magnetoptycznych. Zastosowanie do tych celów diody laserowej emitującej światło niebieskie zwiększa znacznie pojemność dysków ze względu na większą rozdzielczość przestrzenną światła niebieskiego (mniejsza długość fali oznacza mniejszy rozmiar plamki świetlnej padającej na dysk).

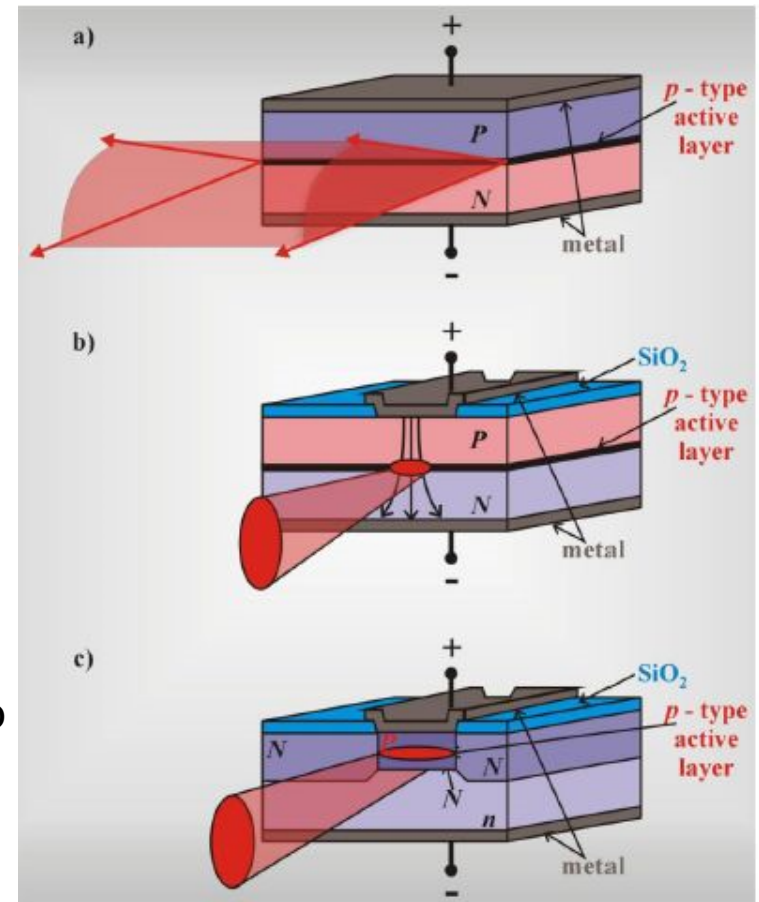
Powiedzieliśmy wcześniej, że idea działania lasera diodowego to emisja wymuszona na złączu półprzewodnikowym $p-n$. W rzeczywistości techniki budowania złącza, technologie nakładania warstw mających niekiedy grubość zaledwie kilku nanometrów, są bardzo skomplikowane.



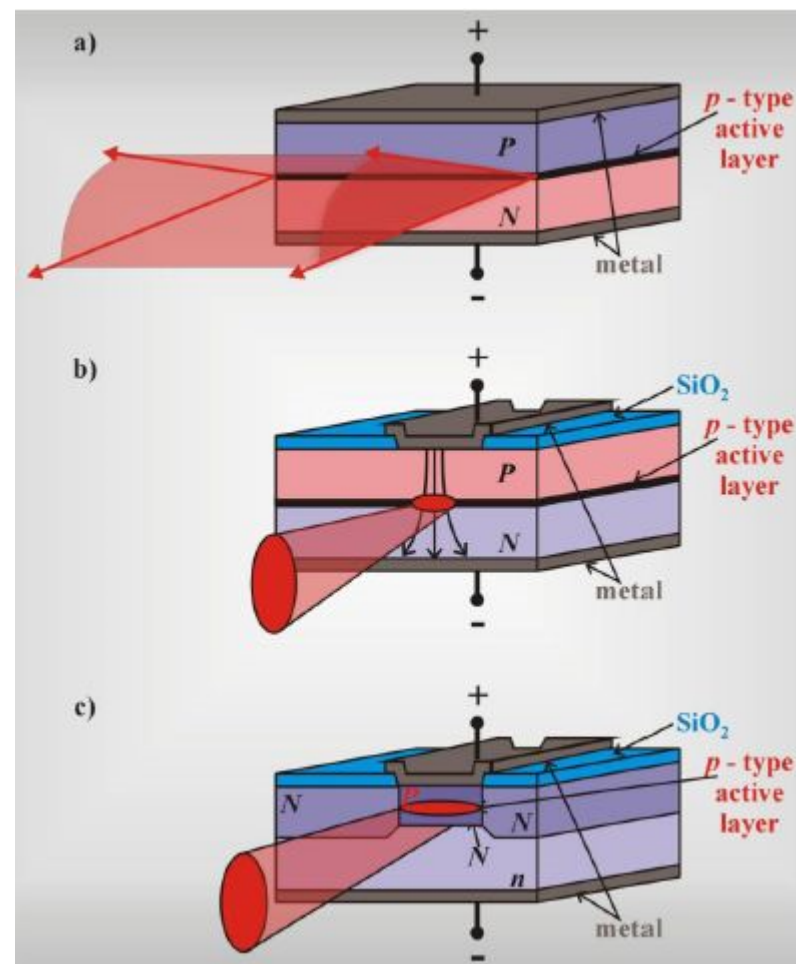
By osiągnąć dla laserów diodowych parametry porównywalne z innymi laserami należy:

1. Ograniczyć ilość ciepła generowaną podczas utrzymywania inwersji populacji
2. Poprawić jakość emitowanej wiązki i jej rozbieżność
3. Zwiększyć osiągnięte moce dla pojedynczego modu poprzecznego
4. Lepiej kontrolować emitowaną długość fali

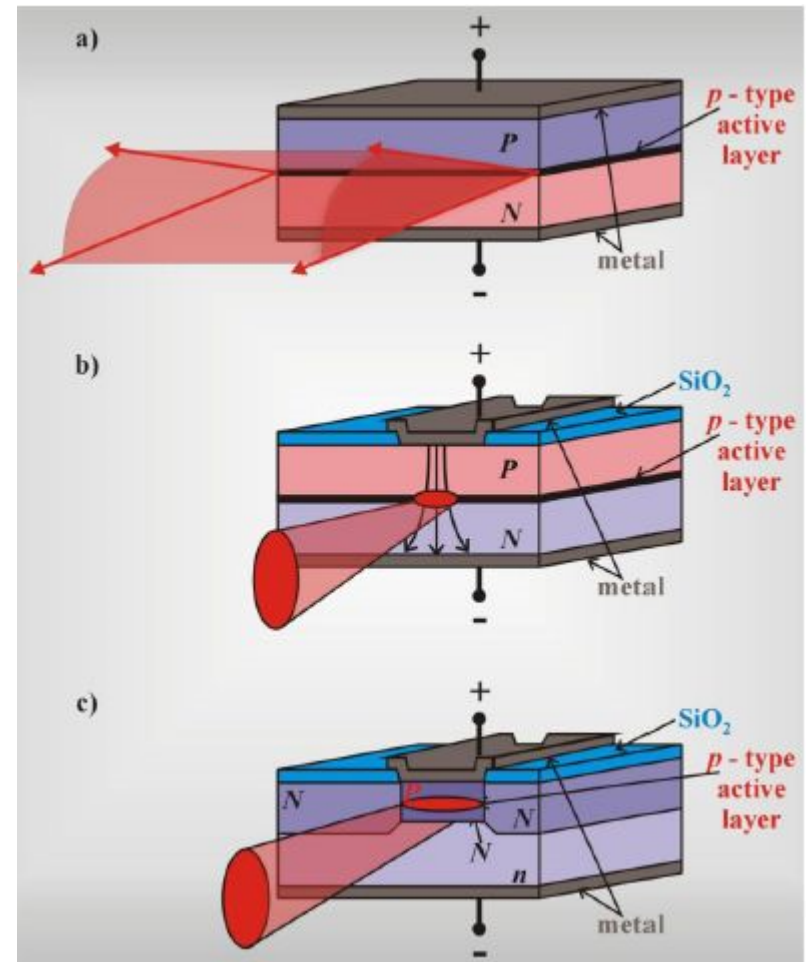
Pierwszy z celów może być osiągnięty poprzez zwiększenie efektywności w osiąganiu inwersji populacji dla zadanego prądu lub/i poprzez zredukowanie poziomu prądu przepływającego przez mały obszar. Architektura podwójnego heterozłącza pokazana na rysunku a) pomaga spułapkować nośniki ładunku w małej objętości wzmacniając inwersję obsadzeń. Podwójne heterozłącze składa się z bardzo cienkiej warstwy materiału typu p (rzędu 0,2μm) o prostej przerwie energetycznej i mniejszym paśmie wzmocnienia niż warstwy p i n znajdujące się powyżej i poniżej. Gdy zostanie przyłożone do tego złącza typu p-p-n napięcie w kierunku przewodzenia dziury i elektrony są wstrzykiwane do aktywnego obszaru centralnego z obszarów bardziej zewnętrznych, nośniki są pułapkowane w studni potencjału wytworzonej przez materiały o szerszym paśmie wzmocnienia. Nośniki pułapkowane w małej objętości zwiększają inwersję obsadzeń co oznacza wzrost efektywności wzmocnienia, mniejszy prąd progowy, mniejszą ilość generowanego ciepła i wzrost intensywności generowanego promieniowania.



Efekt może być wzmocniony przez wprowadzenie efektu „ograniczenia prądu” w podwójnym heterozłączeniu. Można to osiągnąć przez wprowadzenie elektrody kontaktowej ograniczającej powierzchnię diody. „Ograniczając prąd” do małego obszaru prostokątnego do powierzchni złącza zwiększa się gęstość prądu, zwiększa się koncentrację nośników ładunku w obszarze diody co przyczynia się do osiągnięcia większego wzmocnienia i redukcji ilości generowanego ciepła. Najprostszą metodą osiągnięcia „ograniczenia prądu” pokazana jest na rysunku b) kontakt dodatnio naładowanego metalu umieszczona jest między dwiema warstwami izolatora np. SiO_2 zamiast monolitycznej warstwy metalu jak w przypadku a).



Efekt „ograniczenia prądu” lub „ograniczenia nośników ładunku” może być też wzmocniony przez wprowadzenie „ograniczenia fotonów”. Technika wykorzystywania współczynników załamania jest powszechnie stosowana do spułapkowania fotonów we wnętrzu wnęki optycznej celem wzmocnienia gęstości mocy. Schemat tego rodzaju złącza pokazuje rysunek c). Cienki obszar aktywny typu p jest otoczony z 4 stron przez materiał o szerokim paśmie wzmocnienia o współczynniku załamania mniejszym niż dla warstwy aktywnej. Pozwala to na spułapkowanie promieniowania we wnętrzu wąskiego obszaru dzięki całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Spułapkowanie fotonów w wąskim obszarze wzmocnia również optyczne sprzężenie zwrotne i zwiększa inwersję obsadzeń. Rozwiązania przedstawione na rysunkach b) i c) pozwalają na wygenerowanie bardziej spójnej wiązki z węższego obszaru w porównaniu z rozwiązaniem przedstawionym na rysunku a).



Lasery o właściwościach wyznaczonych przez wzmocnienie optyczne (gain-guided lasers). W laserach tych prąd jest „wstrzykiwany” jedynie w wąskim pasku o szerokości rzędu 10nm. Takie lasery nazwane są laserami o geometrii paskowej. Odpowiednie domieszkowanie zamienia część górnego obszaru typu n w obszar typu p. Prąd płynie tylko w centrum obszaru, ponieważ pozostała część jest złączem n-p spolaryzowanym zaporowo. Ponieważ warstwa aktywna silnie pochłania światło poza paskiem, emisja jest ograniczona jedynie do obszaru paska. Rozkład modów optycznych wzdłuż płaszczyzny złącza określony jest przez wzmocnienie optyczne.

Lasery, w których światło prowadzone jest przez odpowiednie ukształtowanie współczynnika załamania (index-guided lasers). W laserach tych obszar, w którym prowadzone jest światło, określono przez uformowanie falowodu wzdłuż złącza. Falowód ten jest wykonany przez wprowadzenie odpowiednich skokowych zmian współczynnika załamania. Rejon aktywny jest otoczony ze wszystkich stron przez kilka warstw materiału o niższym współczynniku załamania. Zapewniają one silne ograniczenie emitowanego modu i charakteryzują się dużą stabilnością.

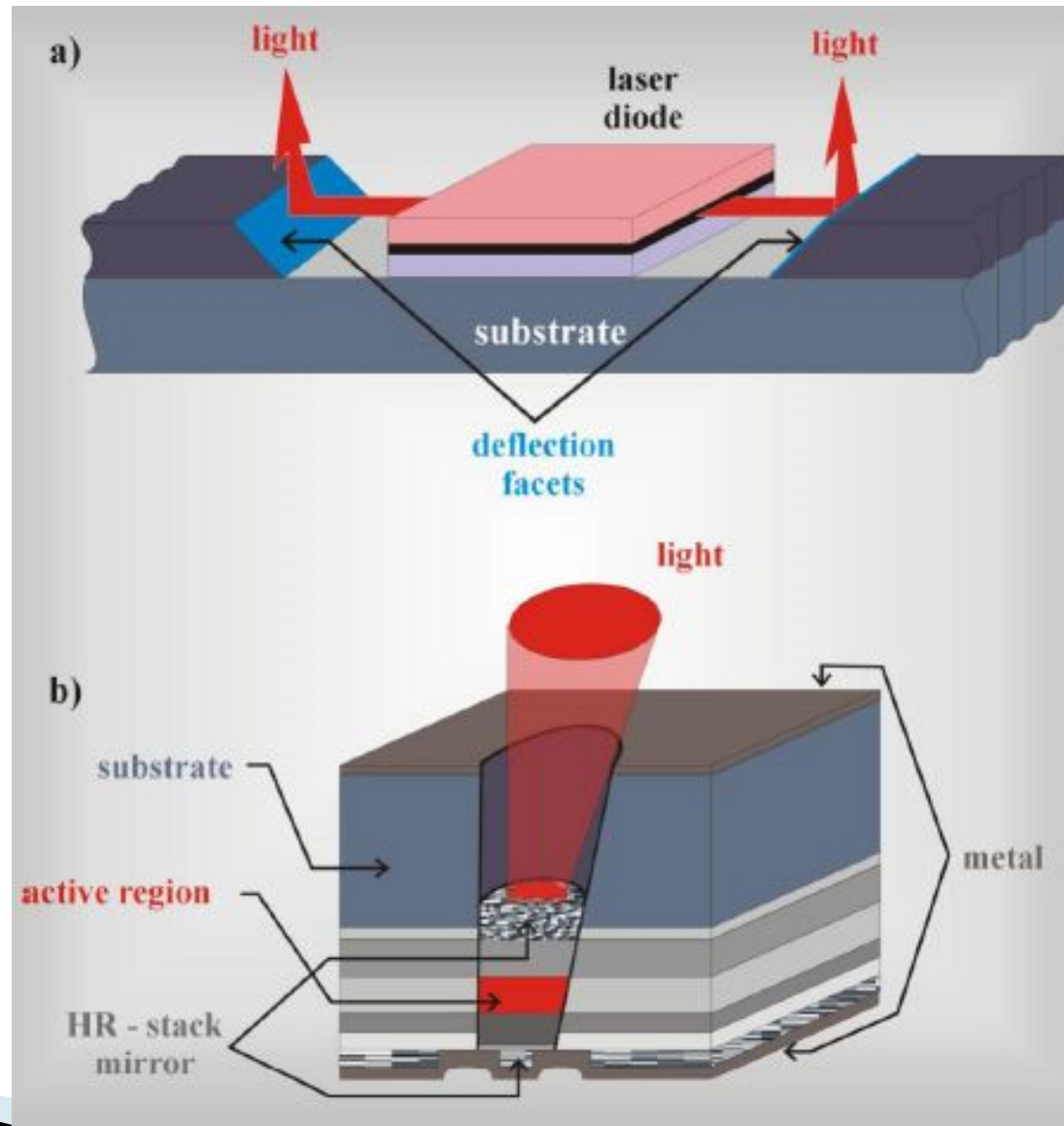
Studnie kwantowe

Jeśli zredukujemy grubość warstwy p w podwójnej warstwie heterostrukuralnej poniżej 50nm pojawią się dodatkowe efekty kwantowe w warstwach aktywnych złącza. Pasma walencyjne i przewodnictwa rozszczepiają się na pasma dyskretne o energii i momencie pędu nośników ładunku zależnym od grubości warstwy. Opisane struktury noszą nazwę studni kwantowych. Jeśli układ zawiera tylko jedną warstwę aktywną mówimy o Pojedynczej Studni Kwantowej (single quantum well –SQW) jeśli zaś warstwy takie ułożone są kolumnowo mówimy o Wielokrotnej Studni Kwantowej (multiple quantum well MQW). Zarówno SQW jak i MQW mają wersje ze wzmocnionym współczynnikiem załamania jak i ze wzmocnieniem optycznym. Dzięki studniom można osiągać większe wzmocnienie, a wiązka wyjściowa jest bardziej spójna niż w przypadku konwencjonalnych heterozłączy.

Lasery ze studniami kwantowymi. W laserach tych obszar czynny jest cieńszy od 100 nm, a więc jest on znacznie mniejszy od długości fali. Ruch elektronów przez takie złącze ograniczony jest przez dyskretnie kwantowo występujące poziomy energetyczne, co prowadzi do skupienia elektronów w wąskim przedziale energii. W konsekwencji akcja laserowa może występować po przekroczeniu niewielkiego prądu progowego rzędu 10–20 mA. Wyróżniamy kilka typów laserów ze studniami kwantowymi:

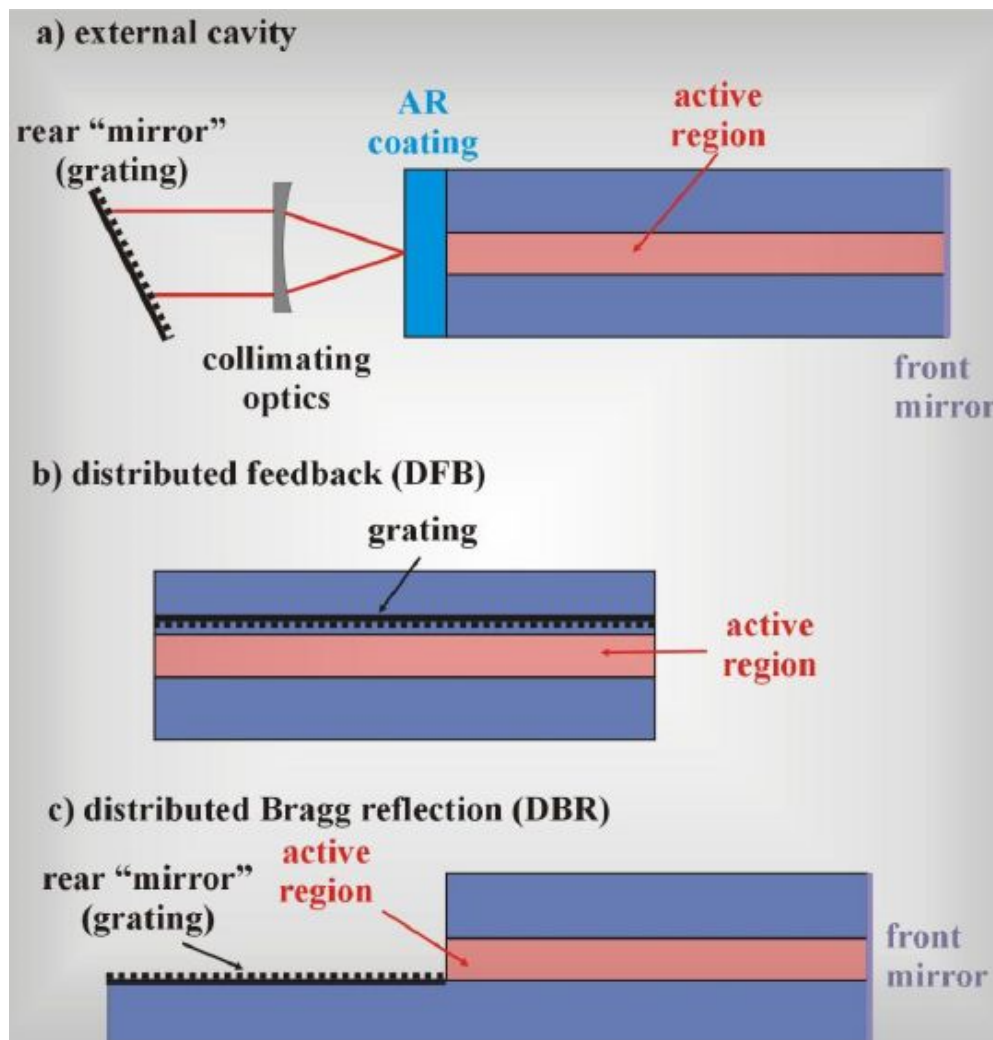
1. lasery o pojedynczej studni kwantowej SQW (single quantum-well);
2. lasery o wielokrotnych studniach kwantowych MQW (multiple quantum-well) – struktury MQW wykonane są w postaci wielu niezwykle cienkich warstw o grubości atomowej. Stosowane dla skuteczniejszego ograniczenia i grupowania elektronów, wielokrotne studnie kwantowe powstają w kolejno po sobie następujących cienkich warstwach poprzedzielanych warstwami falowodowymi

Planar-cavity surface-emitting diode laser (PCSEL); vertical-cavity surface-emitting diode laser (VCSEL)



Konfiguracje stosowane w celu uzyskania wąskiej widmowo wiązki promieniowania lasera diodowego

- a) Lasery z wnęką zewnętrzną
- b) lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym DFB – Distributed FeedBack
- c) lasery z ze zwierciadłem Bragga na końcach struktury (DBR – distributed Bragg reflector)



Lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym. Współczesne systemy transmisyjne często wymagają jednomodowej pracy lasera – większość laserów daje taką możliwość, lecz nie jest wystarczająco selektywna. Spowodowane jest to przez zastosowanie rezonatora Fabry–Perota (o periodycznym charakterze sprzężenia zwrotnego). W celu wyeliminowania tej niedogodności stosuje się często tzw. selektywnie rozłożone sprzężenie zwrotne. Lasery takie można podzielić na dwie kategorie: z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym (DFB – distributed feedback) i ze zwierciadłem Bragga na końcach struktury (DBR – distributed Bragg reflector)

III - V materials system

