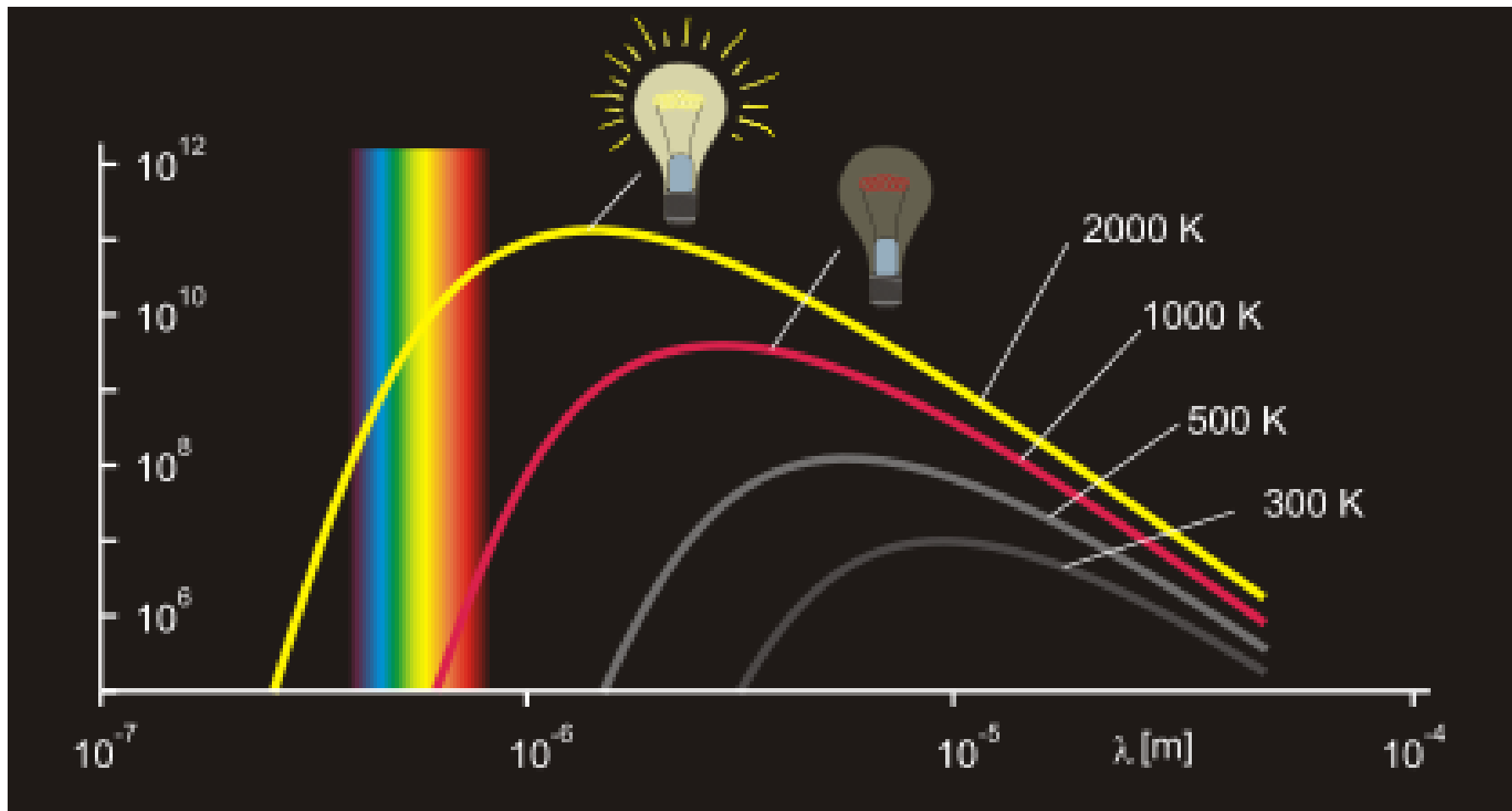


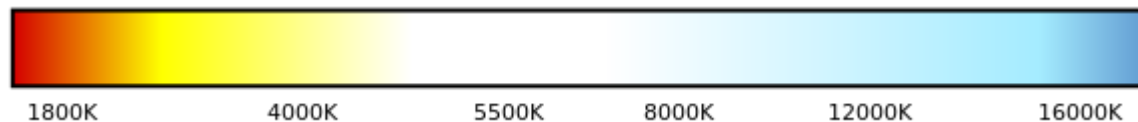
Wykład II

Termiczne i nietermiczne źródła promieniowania

CDC



Temperatura barwowa



2000 K – barwa światła świeczki

2800 K – barwa bardzo ciepło-biała (żarówkowa)

3000 K – wschód i zachód Słońca

3200 K – barwa światła żarowego lamp studyjnych

4000 K – barwa biała

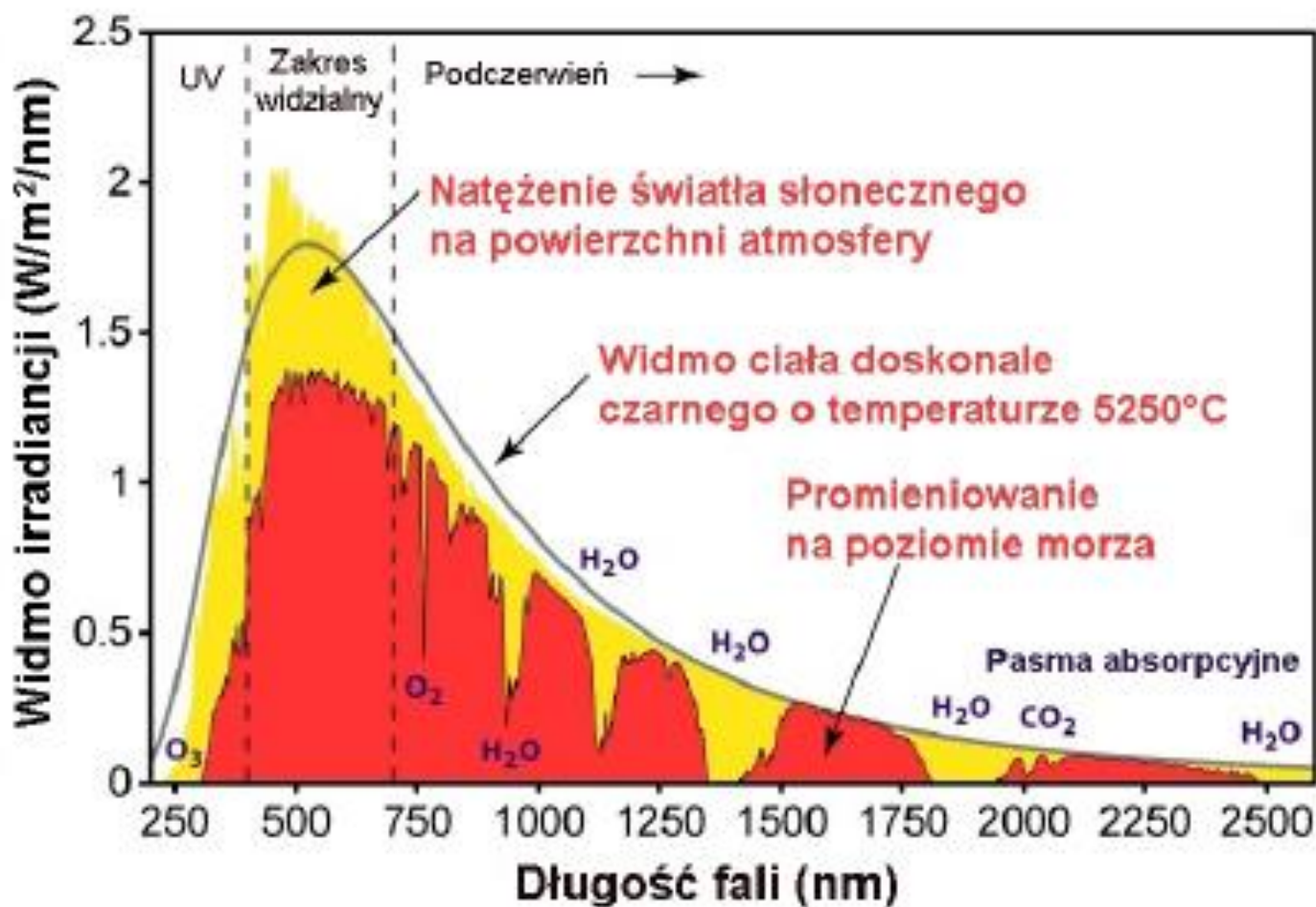
5000 K – barwa chłodno biała

6500 K – barwa dzienna - zimna

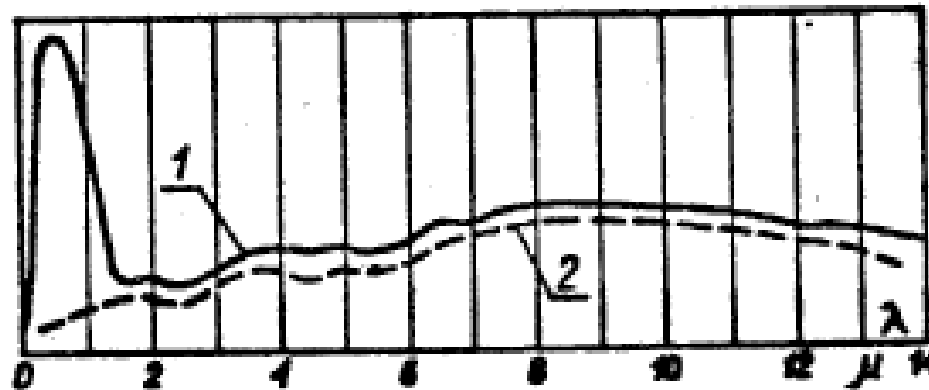
10000-15000 K – barwa czystego niebieskiego nieba

28000-30000 K – błyskawica

Naturalne źródła promieniowania - Słońce



Widmo nieba



Widmo promieniowania bezchmurnego nieba w dzień i w nocy

Przyjmuje się, że otoczenie ziemskie jest źródłem o $T = 283 \text{ K}$ i efektywnej emisyjności $\varepsilon \cong 0.35$

Metale

Wolfram, molibden i tantal

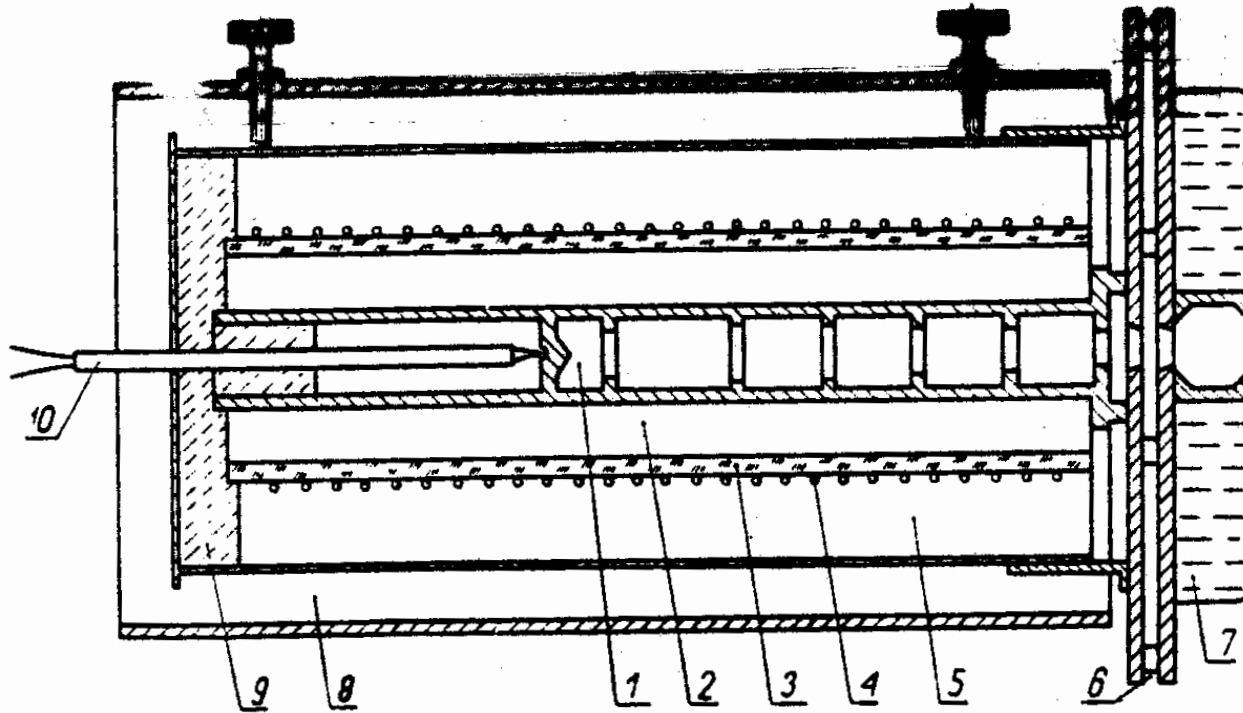
- **temperatury topnienia: W – 3663K; Mo – 2393K i Ta – 3303K;**
- **mogą być żarzone tylko w próżni gdyż w powietrzu ulegają bardzo szybko utlenieniu w wysokiej temperaturze, dlatego ich charakterystyka widmowa zależy od własności osłony.**
- **bańka szklana (do 3.5 μm) lub w celu przepuszczenia promieniowania UV - kwarcowa (do 5 μm).**

Źródła na podczerwień

Sility - są to pręty lub rury wykonane ze spiekanego węgla krzemu. Stosowane są w zakresie podczerwieni, od ok. $1.5 \mu\text{m}$. Zdolność emisyjna silitu jest bardzo dobra (ϵ od ok. 0.75 do 0.86 w zakresie λ od ułamka μm do ok. $15\mu\text{m}$).

Niść Nernsta - pręt lub rura z tlenków cyrkonu, itru i toru. Podobnie jak pręty silitowe niść Nernsta pracuje w powietrzu. Emisyjność tego źródła w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni jest bardzo mała ($\epsilon \sim 0.3$) i wykazuje znaczną selektywność. Dopiero powyżej ok. $7\mu\text{m}$ emisyjność grzejnika jest wysoka ($\epsilon \sim 0.8$) i stała w szerokim zakresie widmowym. Wadą tych źródeł jest ujemny współczynnik temperaturowy oporności skutkiem czego wymagają one wstępnego podgrzewania.

Model CDC

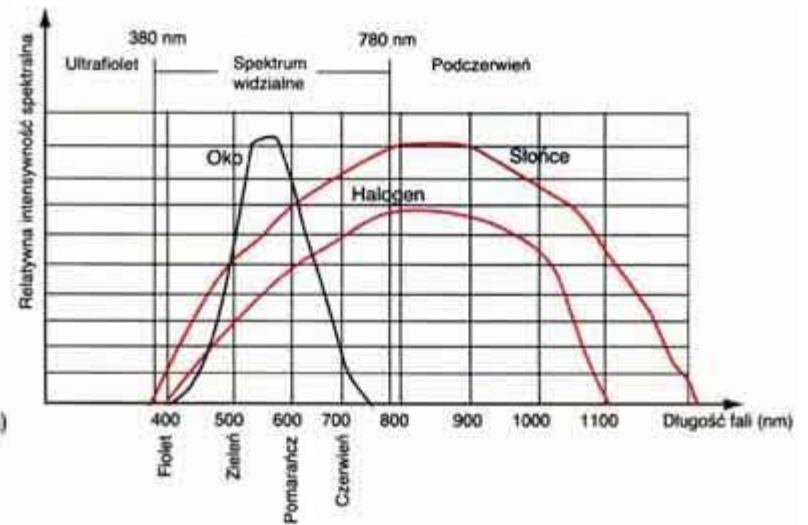
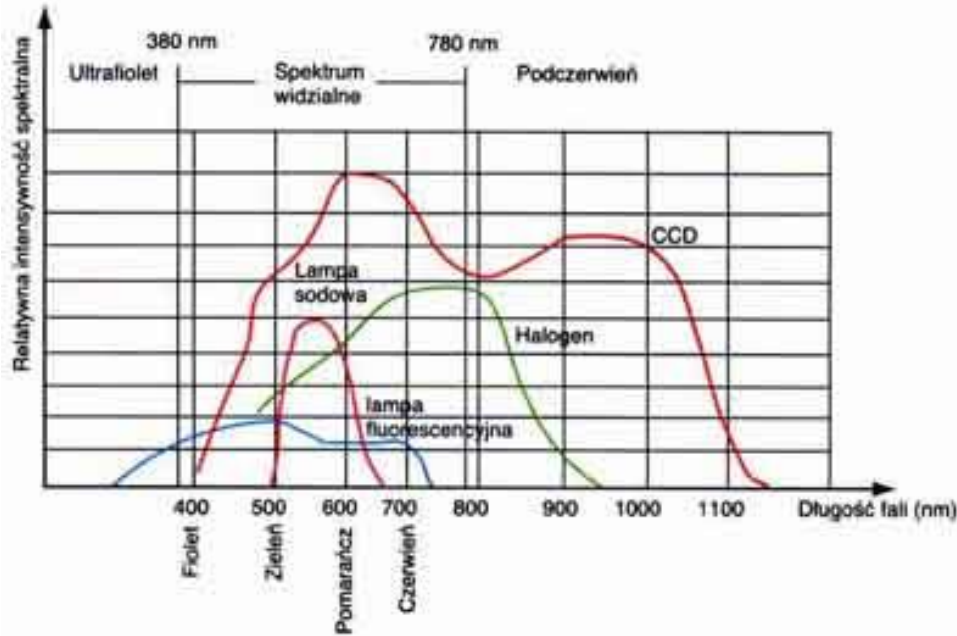


1-wnęka, 2- termostat, 3-rura ceramiczna, 4-grzejnik, 5-izolacja cieplna, 6-szczelina na tarczę modulatora, 7-chłodnica wodna, 8-płaszcz powietrzny, 9- azbest, 10 - termoelement

Skuteczność świetlna źródeł promieniowania

Źródło światła	Skuteczność świetlna [lm/W]
lampa żarowa	5,75...16,6
Lampa żarowo-rtęciowa	10...26
Żarówka halogenowa	14...28,5
Lampa rtęciowa	36...61
Świetlówka liniowa	40...105
Lampa metalohalogenkowa	50...120
Wysokoprężna lampa sodowa	68...150
Niskoprężna lampa sodowa	100...206

Charakterystyki widmowe



Halogen

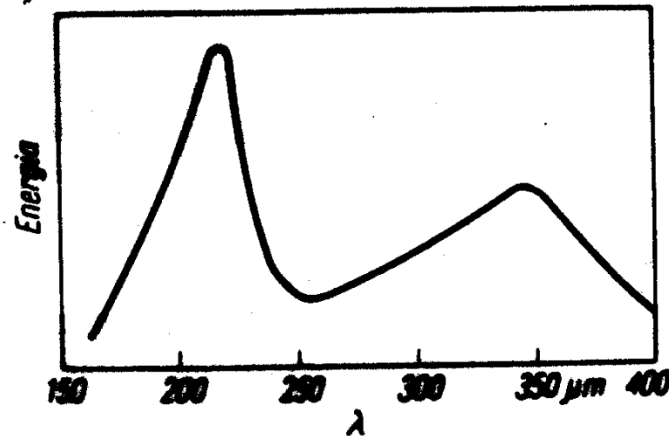


Lampa halogenowa – termiczne źródło światła. Jest to żarówka z włóknem wolframowym, wypełniona gazem szlachetnym z niewielką ilością halogenu (czyli fluorowca, np. jodu), który regeneruje żarnik, przeciwdziałając jego rozpylaniu, a tym samym ciemnieniu bańki od strony wewnętrznej.

Halogen tworzy związek chemiczny z wolframem (parami wolframu w bańce i na ściankach bańki). Związek ten krąży wraz z gazem w bańce a następnie rozpada się na wolfram i fluorowec. W rezultacie tej reakcji następuje przenoszenie cząstek wyparowanego wolframu z bańki na żarnik. Proces ten nazywa się halogenowym cyklem regeneracyjnym. Występowanie tego cyklu pozwala zwiększyć temperaturę żarnika do około 3200K, zatem żarówki halogenowe cechują się wyższymi skutecznościami świetlnymi aniżeli zwykłe lampy żarowe (do 18 lm/W).

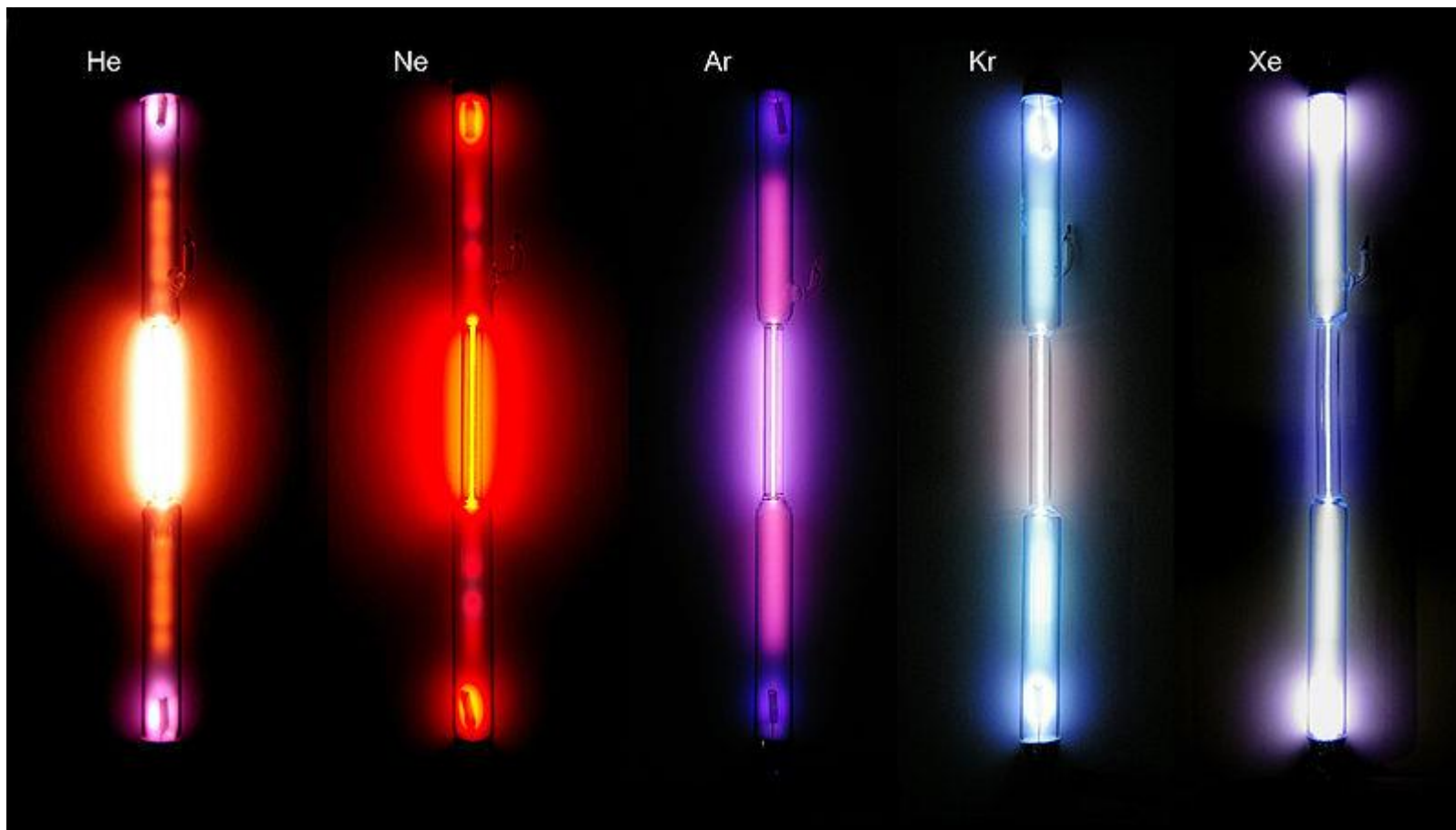
Lampy wyładowcze – nietermiczne źródła promieniowania

Źródłem promieniowania w lampach, wypełnionych gazami lub parami, jest wyładowanie jarzeniowe lub łukowe. Przy niskich ciśnieniach gazu występuje wyładowanie jarzeniowe lub łukowe a promieniowanie emitowane jest w postaci cienkich linii widmowych. Przy wysokim ciśnieniu gaz emituje taką dużą liczbę linii widmowych, że zlewają się one w jedno pasmo i promieniowanie ma charakter widma ciągłego.

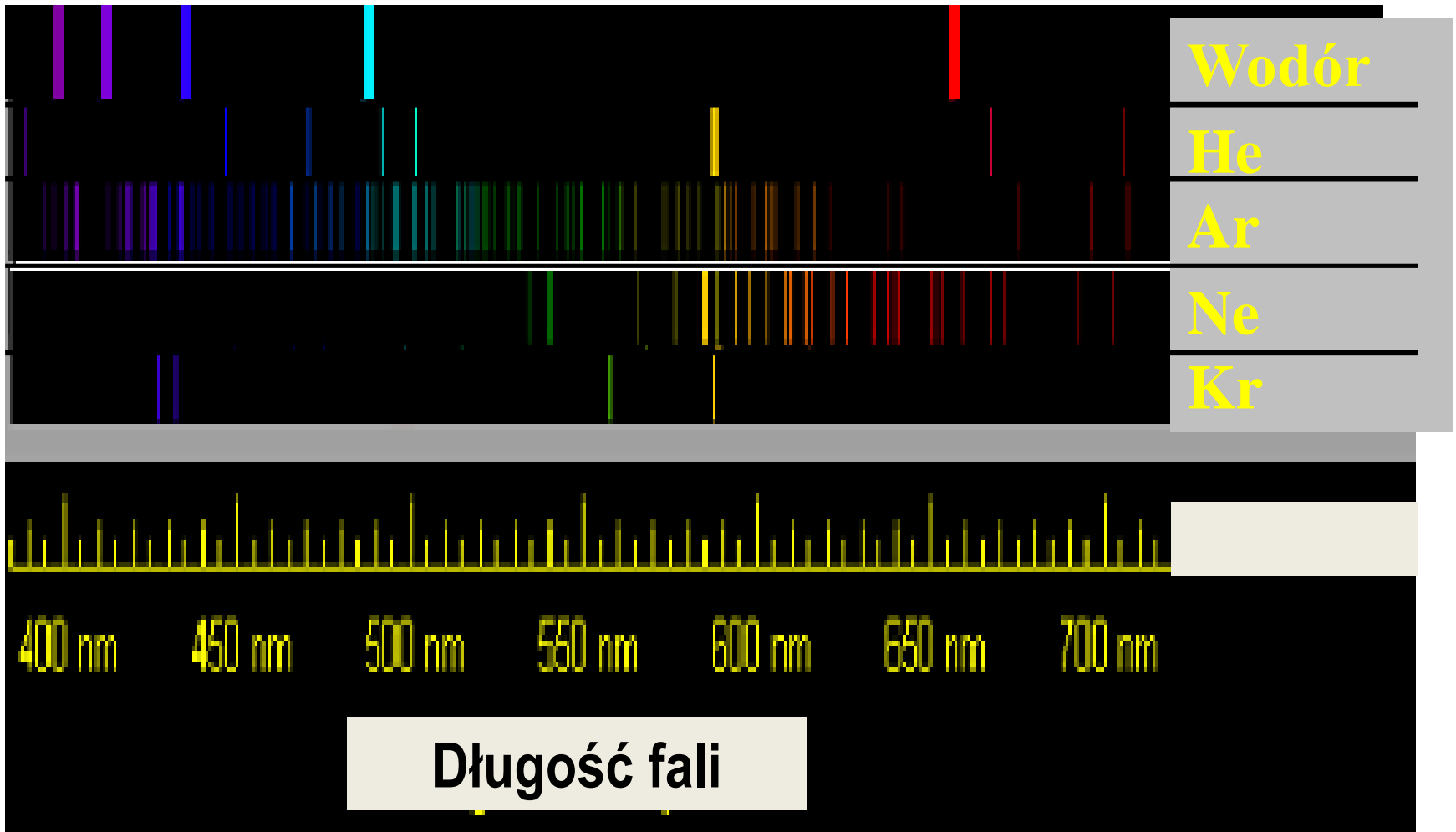


Lampa wyładowcza

Lampa wyładowcza – lampa, która świeci poprzez wyładowanie elektryczne w parach metali (Hg) lub gazów (najczęściej Ar, Ne), jej bańka może być pokryta luminoforem. Prawie wszystkie źródła wyładowcze wymagają urządzenia ograniczającego prąd wyładowania – statecznika (dławik)



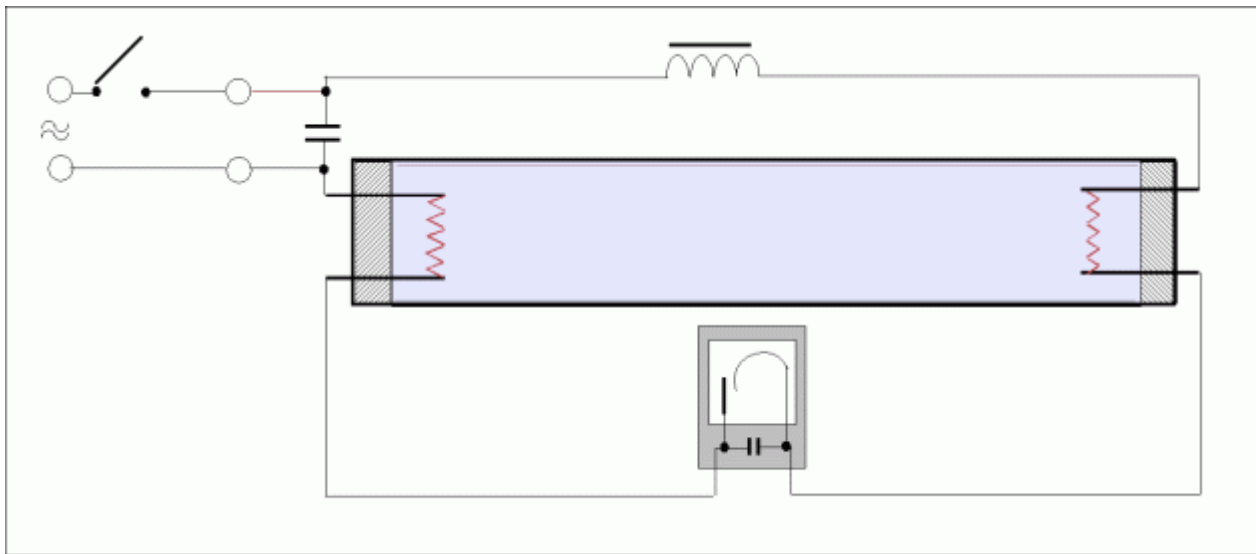
Widmo lamp wyładowczych



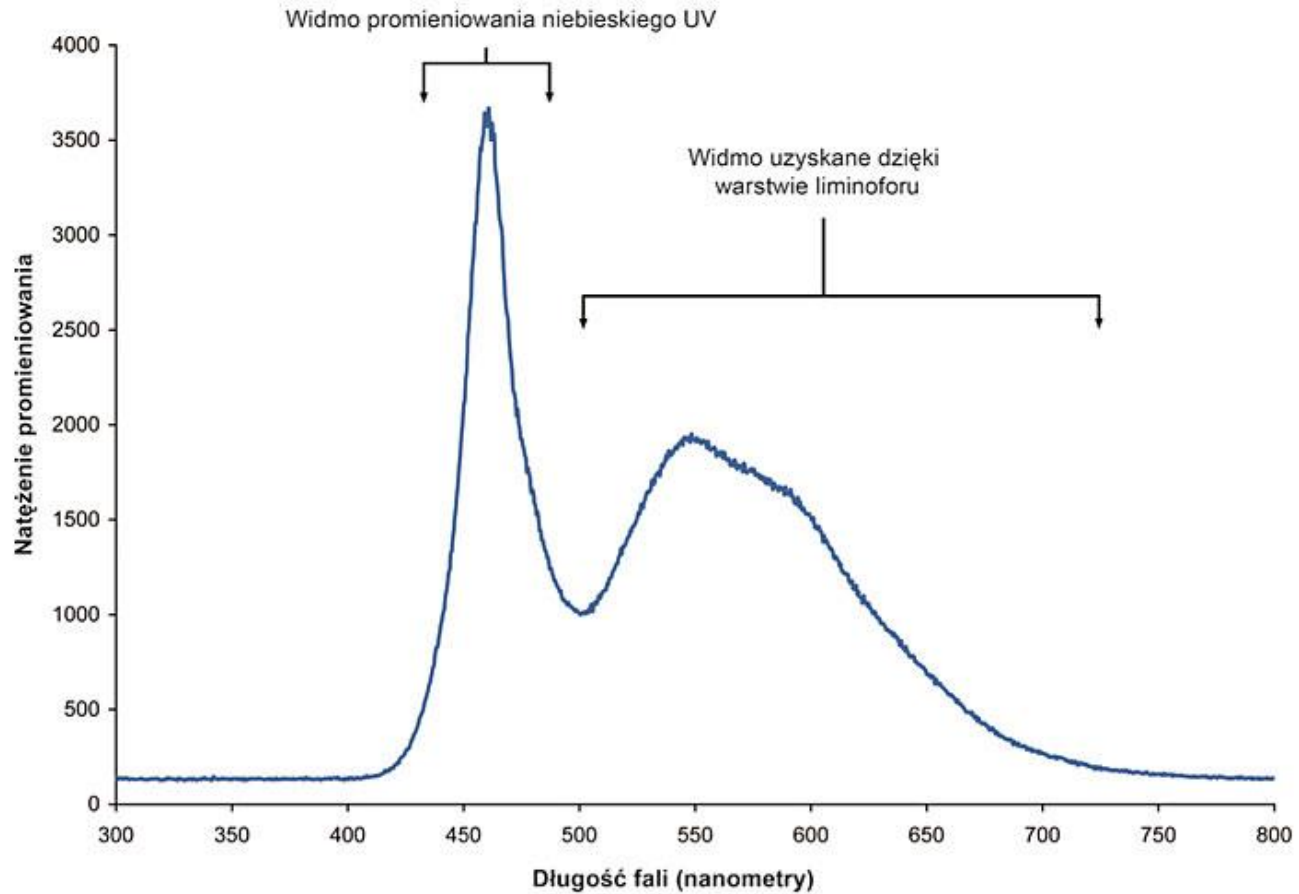
Świetlówka

Lampa fluorescencyjna – jest to lampa wyładowcza, wypełniona rtęcią i argonem, w której światło emitowane jest przez luminofor, zaś luminofor emituje światło na skutek pobudzenia promieniowaniem ultrafioletowym. To ostatnie powstaje w wyniku wyładowania jarzeniowego w rurze wypełnionej gazem.

Luminofory: organiczne (polimery) i nieorganiczne np. CdS lub ZnS



Luminofor



Lampa metalohalogenkowa

Lampa metalohalogenkowa – lampa wyładowcza wysokociśnieniowa, w której światło powstaje dzięki wyładowaniu elektrycznemu w mieszaninie par Hg, Ar oraz halogenków metalu (fluorki np. jodki, bromki), niekiedy również innych gazów szlachetnych oraz bromu lub jodu.

Zastosowanie - m.in. bilbordy, iluminacja obiektów architektonicznych



Neonówka

Różnica potencjałów między katodą i anodą (ok. 60V) powoduje zapłon neonówki. Jony gazu w neonówce są przyspieszane polem elektrycznym i wywołują efekt lawinowy jonizując kolejne atomy. Procesowi jonizacji towarzyszy emisja światła.

Zastosowanie: próbnik napięcia, dawniej – m.in. w wyświetlaczach



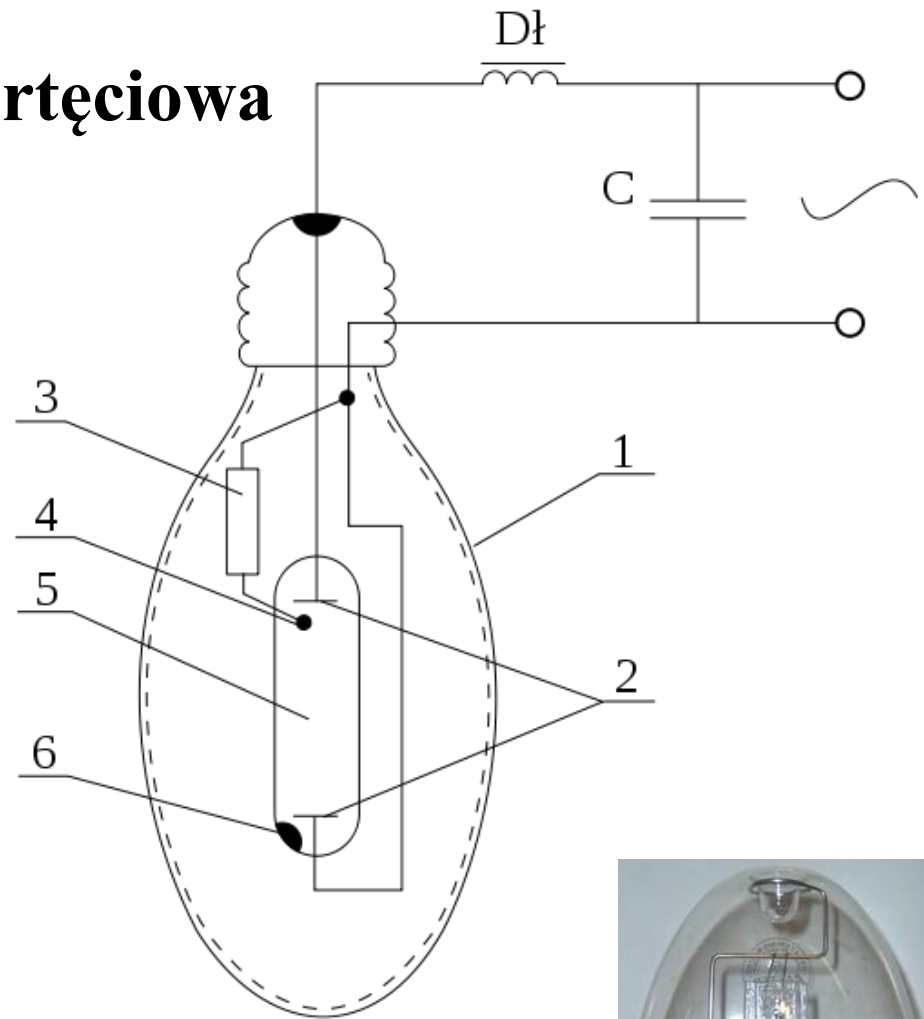
Lampa rtęciowa

1-bańka szklana pokryta luminoforem od wewnątrz, 2-elektrody główne, 3-rezystor zapłonowy, 4-elektroda pomocnicza, 5 - jarznik kwarcowy, 6-kropla rtęci.

Dł-dławik, C-kondensator.

Jarznik - rurka kwarcowa z wyprowadzonymi na zewnątrz dwiema elektrodami głównymi i jedną lub dwiema elektrodami pomocznymi, zawierająca Ar oraz Hg.

- Zapłon – przy ok. 180V między elektrodami 4 i 2 i następuje wyładowanie jarzeniowe;
- Rtęć rozgrzewa się, odparowuje i następuje wyładowanie łukowe między elektrodami 2;



Lampy sodowe

- **Niskoprężne**

W niskoprężnych lampach sodowych w jarzniku (szklana rura wygięta w kształt litery U) znajduje się metaliczny sód oraz gaz pomocniczy (mieszanina Ne i Ar). Do zasilania lamp sodowych niskoprężnych stosuje się najczęściej transformatory zapewniające wysokie napięcie w czasie zapłonu i ograniczenie jego wartości w czasie normalnej pracy. Po załączeniu lampy rozpoczyna się wyładowanie w gazie pomocniczym i dopiero po odparowaniu sodu, wyładowanie w parach sodu staje się dominujące. Pełną wydajność świetlną uzyskują po kilku minutach.

- **Wysokoprężne**

Lampy, w których źródłem światła jest jarznik wykonany zazwyczaj z materiału ceramicznego, zawierający Na, Hg oraz gaz pomocniczy (Xe) o ciśnieniu ok. 2 kPa.

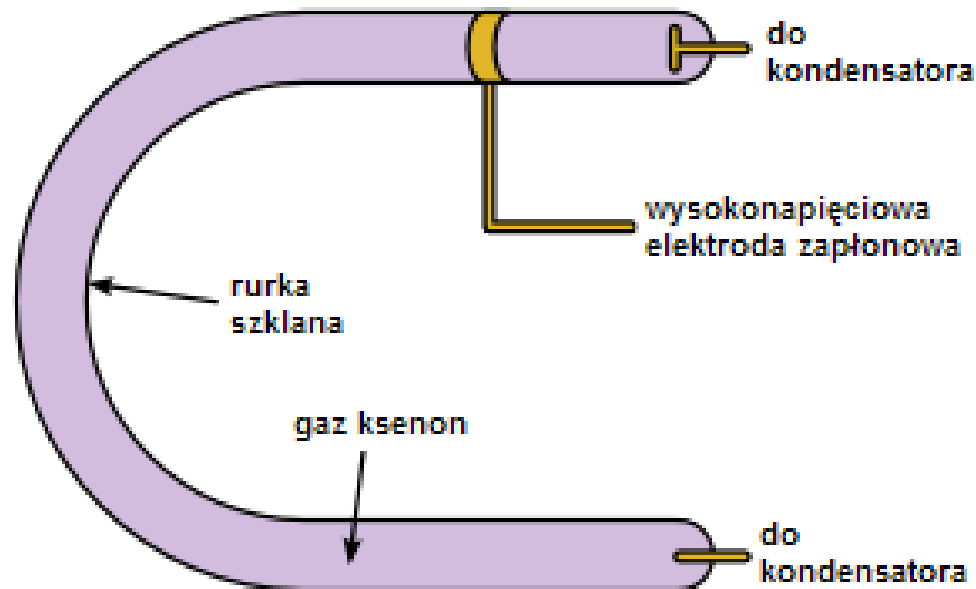


Wysokoprężna lampa sodowa

Długość fali 589,3 nm.

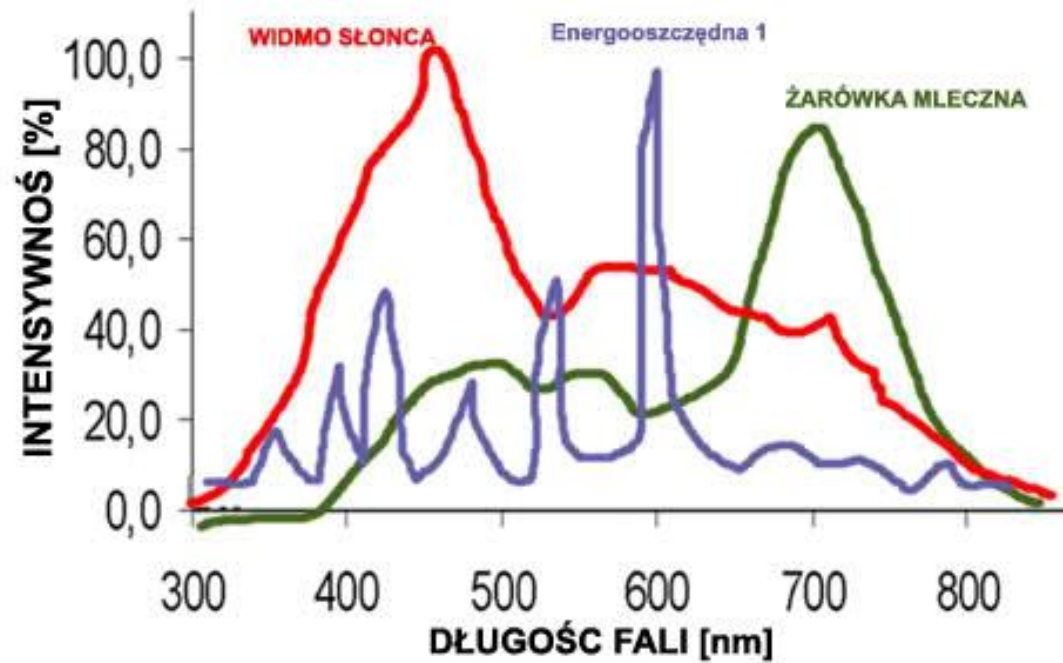
Lampa ksenonowa

Zasada działania tej lampy opiera się, tak jak w innych lampach wyładowczych, na zjawisku przepływu prądu przez zjonizowany i zamknięty w szklanej rurce gaz (Xe). Przepływ prądu jest wywoływany impulsem wysokiego napięcia (kilkanaście lub kilkadziesiąt kV), przykładanym do elektrod, Ksenon wykorzystywany jest ze względu na białą barwę świecenia.

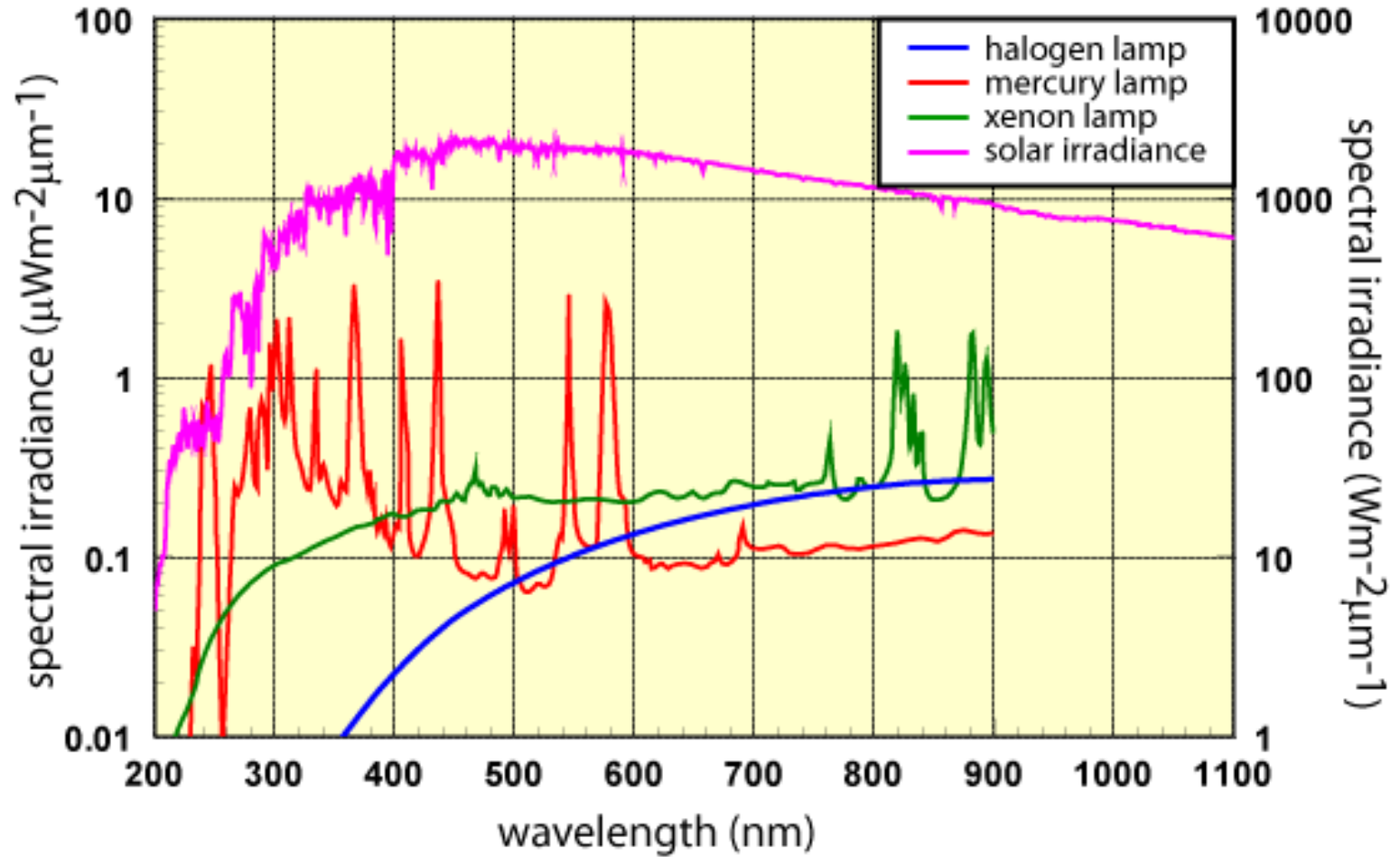


Widma promieniowania

WIDMA POSZCZEGÓLNYCH ŹRODEŁ ŚWIATŁA



Spektralne natężenie promieniowania



$$I_{e,\lambda} = \frac{P_\lambda}{A} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right)$$

Wykład III

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

Historia

1917 – Einstein objaśnia emisję wymuszoną

1954 – maser amoniakalny: Townes, Basow, Prochorow
(1964 – nagroda Nobla z fizyki)

1960 – Maiman, laser rubinowy

1962 – laser półprzewodnikowy

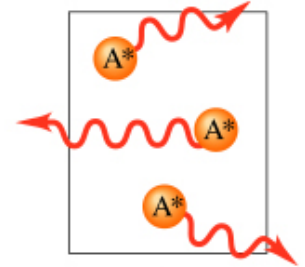
1966 – Nobel dla A. Kastlera za teorię pompowania optycznego

1970 – laser półprzewodnikowy w obszarze widzialnym
(Z. I. Alferov i H. Kroemer – Nobel 2000)

Emisja spontaniczna i wymuszona

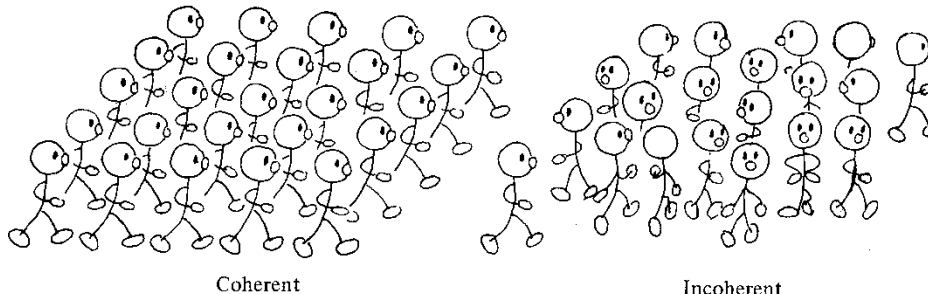
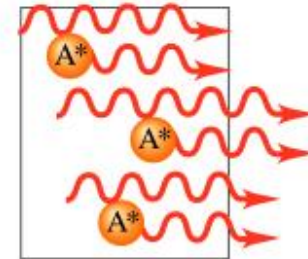
Emisja spontaniczna – źródła termiczne, dioda elektroluminescencyjna (LED)

- Fotony emitowane są we wszystkich kierunkach z jednakowym prawdopodobieństwem w przypadkowych chwilach.
- Emitowana fala elektromagnetyczna nie jest spójna.



Emisja wymuszona – laser

- Wymuszający i emitowany foton mają takie same :
 - częstotliwość
 - kierunek
 - fazę
- Emitowana fala jest spójna



Inwersja obsadzeń

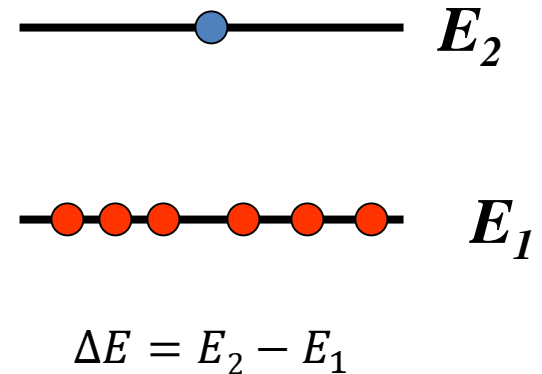
Rozważmy układ dwóch poziomów energetycznych atomu. Prawdopodobieństwo obsadzenia poziomu o energii E jest opisane rozkładem Boltzmann'a. Liczba cząstek w stanie o energii E jest dana wzorem:

$$n = C e^{\frac{-E}{kT}}$$

Ilość cząstek w stanie o energii E_1 lub E_2 :

$$n_1 = C e^{\frac{-E_1}{kT}} \quad n_2 = C e^{\frac{-E_2}{kT}} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right)$$



W stanie równowagi termodynamicznej zawsze $n_2 < n_1$ ponieważ $E_2 > E_1$.

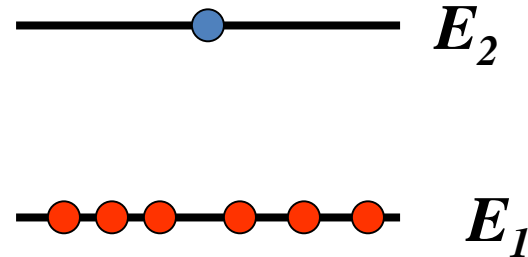
EINSTEIN: Aby zaszła akcja laserowa konieczne jest inwersja obsadzeni, czyli musi być spełniona równość:

$$n_2 > n_1$$

Przykład

Z równania Boltzmana

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right)$$



n_1 - ilość elektronów na poziomie E_1 ; n_2 - ilość elektronów na poziomie E_2

Załóżmy, że $T = 300\text{ K}$ i $E_2 - E_1 = 2\text{ eV}$ \longrightarrow $\frac{n_2}{n_1} = 4.4 \times 10^{-4}$

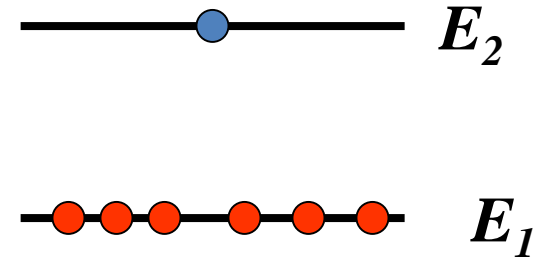
W stanie równowagi termodynamicznej zawsze $n_2 < n_1$ ponieważ $E_2 > E_1$. Aby doszło do akcji laserowej konieczne jest spełnienie warunku $n_2 > n_1$, czyli aby doszło do inwersji obsadzeń.

Inwersja obsadzeń

W stanie równowagi termodynamicznej zawsze $n_1 > n_2$

EINSTEIN: Aby zaszła akcja laserowa konieczne jest inwersja obsadzeń:

$$n_2 > n_1$$

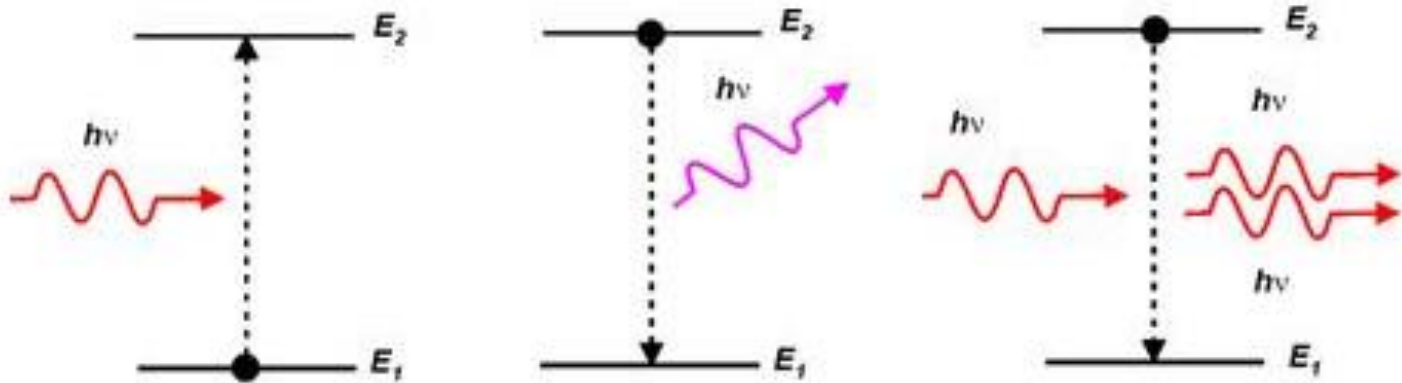


W celu uzyskania inwersji obsadzeń układ musi być „pompowany”

Podstawowe metody pompowania:

- wyładowania elektryczne
- pobudzanie optyczne
- wstrzykiwanie nośników (złącze p-n).

Absorpcja, emisja spontaniczna i wymuszona



absorpcja

emisja spontaniczna

emisja wymuszona

Współczynniki Einsteina A_{2-1} , B_{1-2} , B_{2-1}

- $\rho(\nu)B_{1-2}$ - prawdopodobieństwo absorpcji (wymuszonej)
- $\rho(\nu)B_{2-1}$ - prawdopodobieństwo emisji wymuszonej
- A_{2-1} - prawdopodobieństwo emisji spontanicznej

$\rho(\nu)$ – gęstość widmowa promieniowania CDC

Współczynniki Einsteina

Prawdopodobieństwo absorpcji wymuszonej R_{1-2}



$$R_{1-2} = \rho(\nu) B_{1-2}$$



Proces emisji:

$$R_{2-1} = \rho(\nu) B_{2-1} + A_{2-1}$$

A_{2-1} – prawdopodobieństwo emisji spontanicznej

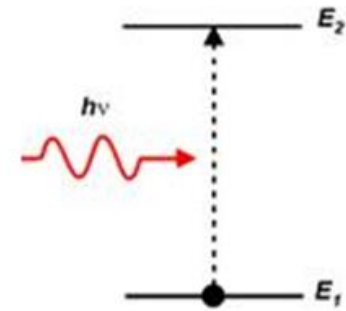
Zał: n_1 atomów w stanie E_1 i n_2 atomów w stanie E_2 jest w równowadze w temperaturze T z polem promieniowania o gęstości $\rho(\nu)$:

$$n_1 R_{1-2} = n_2 R_{2-1} \quad n_1 \rho(\nu) B_{1-2} = n_2 (\rho(\nu) B_{2-1} + A_{2-1})$$

Stąd $\rho(\nu)$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{2-1} / B_{2-1}}{\frac{n_1 B_{1-2}}{n_2 B_{2-1}} - 1}$$

Współczynniki Einsteina



Względna liczba cząstek na dany stan:

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right) \quad \frac{n_1}{n_2} = \exp(E_2 - E_1) / kT = \exp(h\nu / kT)$$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{2-1} / B_{2-1}}{\frac{B_{1-2}}{B_{2-1}} \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \frac{8\pi h \nu^3 / c^3}{\exp(h\nu / kT) - 1}$$

gęstość widmowa
promieniowania CDC
(prawo Plancka)



$$\frac{B_{1-2}}{B_{2-1}} = \mathbf{1}$$

$$\frac{A_{2-1}}{B_{2-1}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}$$

Stosunek A_{2-1} prawdopodobieństwa emisji spontanicznej do prawdopodobieństwa emisji wymuszonej $B_{2-1}\rho(\nu)$:

$$\frac{A_{2-1}}{B_{2-1}\rho(\nu)} = \exp(h\nu/kT) - 1$$

- Energia $h\nu$ fotonów światła widzialnego - 1.6eV – 3.1eV.
- kT w temperaturze 300K ~ 0.025eV – dominuje emisja spontaniczna
- Dopiero gdy $h\nu/kT \ll 1$ emisja wymuszona może być dominująca. I tak np. w zakresie mikrofalowym $h\nu < 0.0015\text{eV}$.

W ogólności częstość emisji do częstości absorpcji x jest dana wzorem:

$$x = \frac{n_2 A_{2-1} + n_2 B_{2-1} \rho(\nu)}{n_1 B_{1-2} \rho(\nu)} = \left[1 + \frac{A_{2-1}}{B_{2-1} \rho(\nu)} \right] \frac{n_2}{n_1} \approx \frac{n_2}{n_1}$$

jeśli $h\nu/kT \ll 1$.

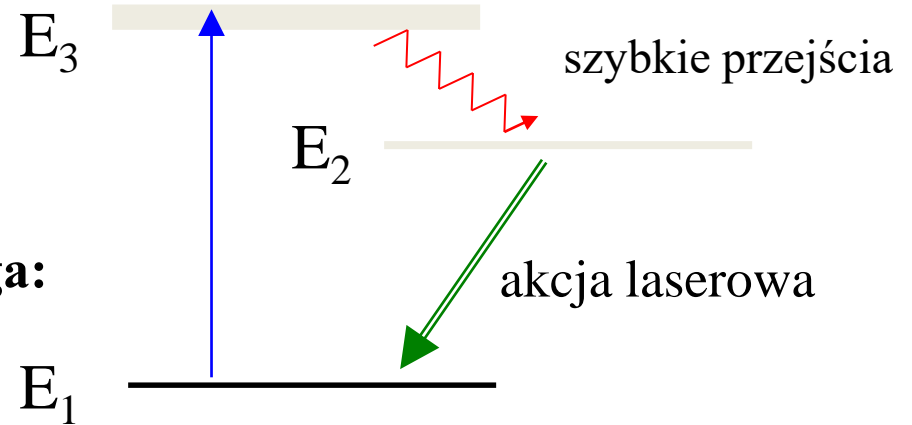
$$x \sim n_2/n_1$$

Inwersja obsadzeń

Przebieg akcji laserowej

Relacja nieoznaczoności Heisenberga:

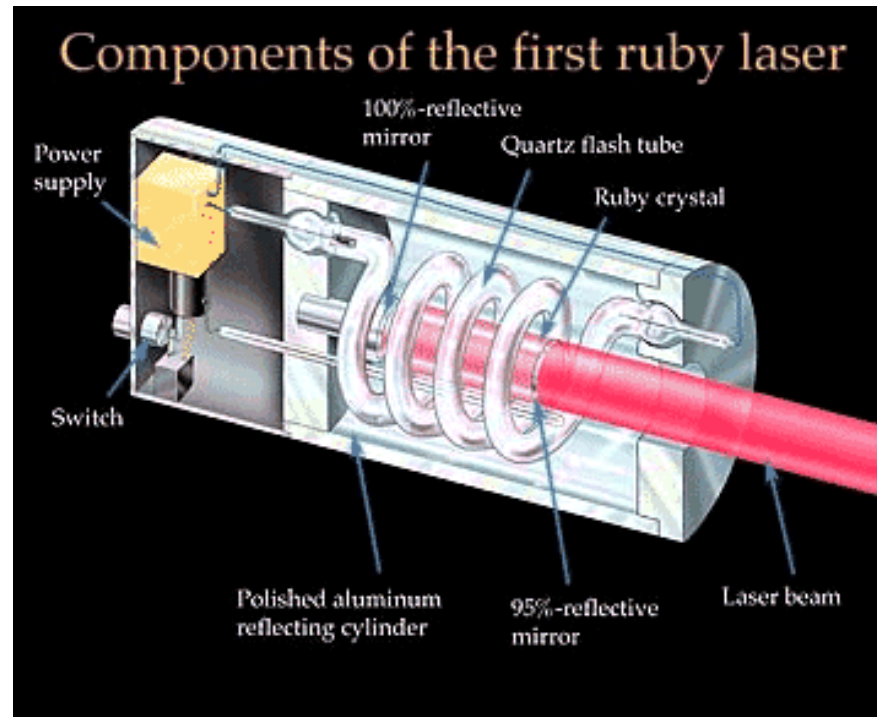
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$



- **Pompowanie optyczne obsadza szeroki poziom E_3 o krótkim czasie życia, rzędu 10^{-8} s; poziomy: metastabilny i podstawowy są wąskie**
- **Elektrony przechodzą z pasma wzbudzonego na poziom metastabilny i gromadzą się: inwersja obsadzeń.**
- **Emisja wymuszona. (Wystarczy aby jeden elektron opuścił stan metastabilny w procesie emisji spontanicznej. Powstający foton zapoczątkuje emisję wymuszoną.)**
- **Wiązka fotonów porusza się prostopadle do luster - powstaje fala stojąca –drugi bardzo ważny warunek aby wystąpiła akcja laserowa.**

Laser rubinowy

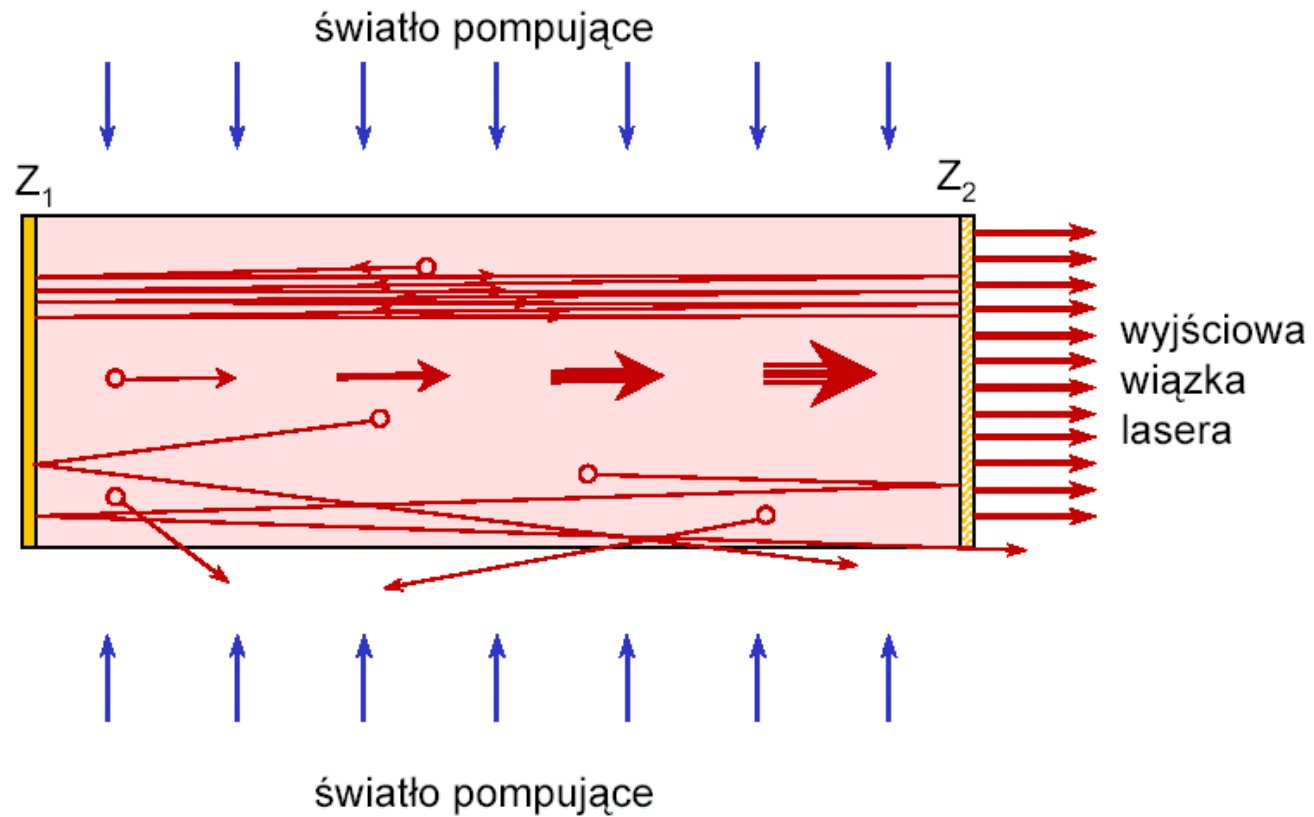
- Wynaleziony w latach 60-tych.
- Czynnik roboczy: monokryształ rubinu czyli Al_2O_3 domieszkowany Cr. Chrom ma tę samą wartościowość co glin (+3) i nadaje kryształowi różową barwę.



- Pompowanie optyczne poprzez nawiniętą spiralnie lampę błyskową
- Lustra na obu końcach kryształu.
- Laser światła czerwonego (694,3 nm)

Laser rubinowy

Optyczne sprzężenie zwrotne - rezonator Fabry-Perota



Lasery

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.

Lasery gazowe

- 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) (40 μm - 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 - 11 μm),
- 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).

Lasery ekscimerowe

Lasery ekscimerowe emitują promieniowanie o impulsach trwających od kilku nanosekund do setek nanosekund. Ośrodkiem czynnym jest mieszanina gazów szlachetnych (Ar, Kr, Xe) i halogenów (F, Cl), które tworzą krótko żyjące, niestabilne w stanie podstawowym halogenki gazów szlachetnych, np.: ArF, KrF, XeF, XeCl. Ekscimer jest skrótem od angielskiego wyrażenia excited dimer czyli sztuczna molekula, która istnieje tylko w stanie wzbudzonym o energii E^1 , a nie istnieje w stanie podstawowym o energii E^0 . Taka molekula może zostać utworzona podczas wyładowania elektrycznego. Przejścia laserowe zachodzące między stanem wzbudzonym ekscimera 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 , co prowadzi do akcji laserowej.

Fluor i chlor są toksyczne i powodują korozję (zwłaszcza w kontakcie z wilgocią). Dlatego wymagają specjalnych środków w zakresie dostarczania gazu i pozbywania się zużytego gazu.

Lasery-rodzaje cd.

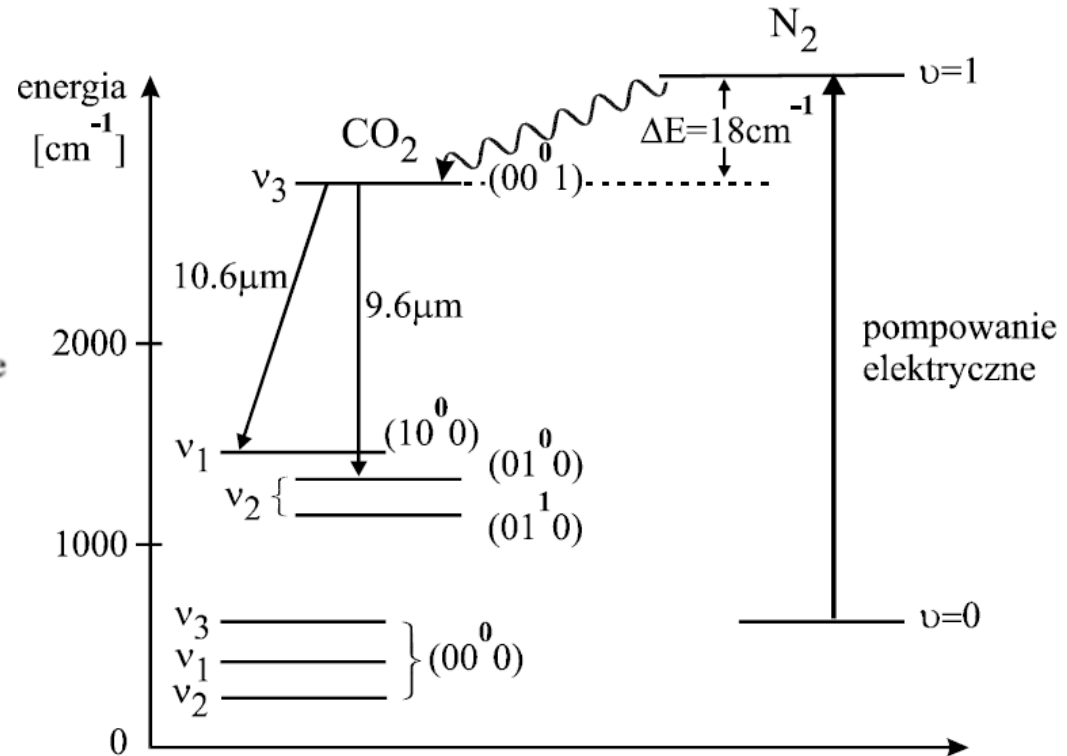
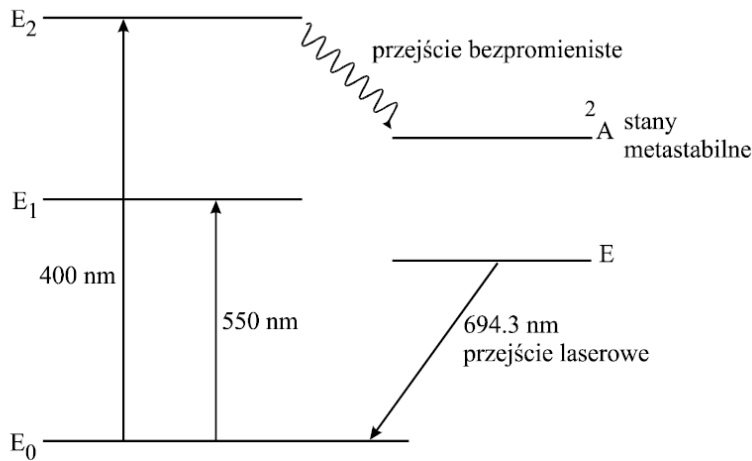
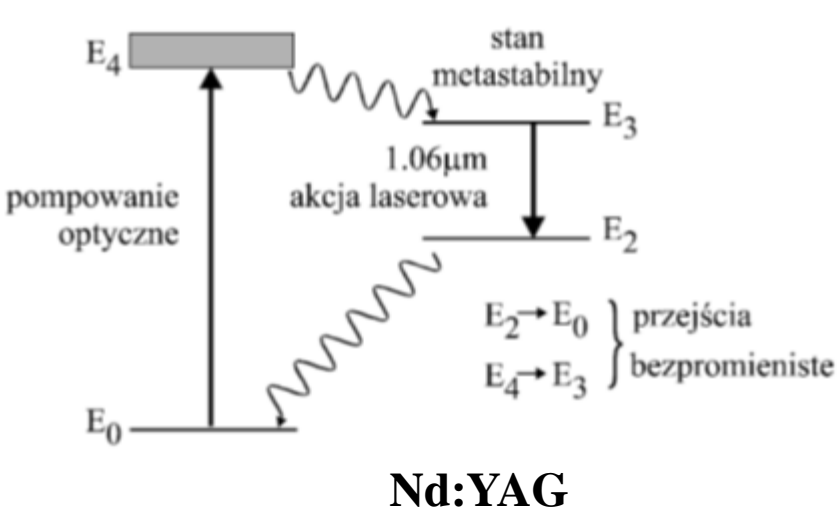
Lasery ciekłe

Do najczęściej używanych laserów ciekłych należą lasery barwnikowe, emitujące światło w zakresie widzialnym. Cząsteczki barwnika są wzbudzane optycznie za pomocą lamp błyskowych, lamp łukowych lub laserów impulsowych i ciągłych: neodymowego Nd:YAG (druga harmoniczna), argonowego, ekscimerowego, azotowego.

Lasery na ciele stałym

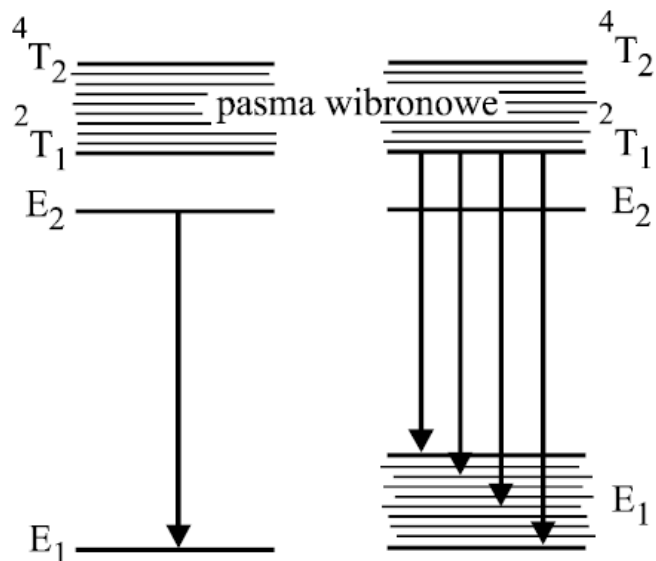
- a) laser rubinowy (694,3 nm) (zakres widzialny),
- b) laser Nd:YAG, w którym matrycą jest granat itrowo-glinowy, a domieszką neodym (1064nm), ($Y_3Al_5O_{12}$ - granat itrowo-glinowy)
- c) laser tytanowo-szafirowy (690 - 1080 nm) i inne lasery przestrajalne na ciele stałym,
- d) lasery na pierwiastkach ziem rzadkich (holmowy, erbowy, tulowy) emitujące promieniowanie o długości fal około 2 μm w zależności od rodzaju matrycy oraz od rodzaju domieszki,
- e) lasery półprzewodnikowe emitujące w szerokim zakresie widmowym, począwszy od zakresu widzialnego do podczerwieni.

Przejścia laserowe



Lasery CO₂ są najczęściej wzbudzane poprzez wyładowania elektryczne w gazie. Elektron, które powstają na skutek jonizacji, wzbudzają drgania cząsteczek N₂, które oddają energię cząsteczkom CO₂ co powoduje ich przejście do stanu wibracyjnego (00⁰1).

Lasery przestrzajalne



a) lasery nieprzestrzajalne

b) lasery przestrzajalne

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

(YLF=YLiF₄)

Poszerzenie linii fluorescencyjnej powodujące przestrzajalność lasera wynika z silnego sprzężenia między elektronami i drganiami wibronowymi sieci krystalicznej, która otacza domieszkowany jon.