



Meandry Techniki Laserowej

„Był sobie król”

4. Era Laserów Gazowych *- niestety już miniona*

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą – WAT, Warszawa 05.04.2019

Streszczenie

Laser gazowy na mieszaninie helu i neonu powstał w tym samym roku co pierwszy laser rubinowy. W Polsce laser He-Ne powstał jako pierwszy i wydaje mi się, że taka kolejność była właściwa. W latach 60. prawie pełna wiedza technologiczna do zbudowania lasera gazowego była znana nie tylko w USA, lecz także w Polsce. Opanowana była technika wysokiej próżni (produkcja lamp elektronowych), znana umiejętność napełniania rur szklanych gazami szlachetnymi i wzbudzanie ich do świecenia (budowa neonowych reklam). Zwierciadła o wysokich współczynnikach odbicia również stosowane były powszechnie w wielu przyrządach optycznych.

Do zbudowania lasera gazowego pozostało zatem osiąść wiedzę na temat ich budowy i skorzystać z istniejących na rynku elementów lub z stosowanej już technologii. Daleki jestem od trywializowania tego zagadnienia, ale mnogość uruchomień laserów w stosunkowo krótkim czasie może być dowodem na trafność tych spostrzeżeń.

Z drugiej strony łatwość budowy lasera gazowego, wielość ośrodków wykazujących zdolność do generacji i zalety gazowego ośrodka czynnego wskazywało na możliwość powszechnego i wszechstronnego wykorzystania nowoodkrytego promieniowania.

Zalety te w stosunku do kryształów (rubin, YAG a także szkło) zostały w prelekcji krótko wyszczególnione:

- * Duża jednorodność ośrodka – brak destrukcyjnego wpływu wad materiału na kształt wiązki i odwrotnie silna wiązka nie powoduje powstawania nieodwracalnych jego uszkodzeń skutkujących zmianami parametrów lasera lub jego zniszczeniem.
- * Łatwość formowania kształtu i rozmiarów ośrodka czynnego, składu (proporcji gazów tworzących mieszaninę), a w skrajnych przypadkach pełna ich wymiana - zdolność niemożliwa w przypadku ośrodków stałych.
- * Znany, stosowany w innych urządzeniach (neony, lampy gazowane) sposób zasilania poprzez wytworzenie w ośrodku czynnym strumienia elektronów o odpowiedniej energii kinetycznej.

Nic dziwnego, że lasery gazowe rozpoczęły szybki marsz od licznie powstających firm produkcyjnych do laboratoriów badawczych, a co ważniejsze do innych producentów jako urządzenia technologiczne, pomiarowe oraz części składowe wytwarzanych tam produktów.

Zasada uzyskiwania inwersji obsadzeni w laserach gazowych jest nieco odmienna niż w przypadku ciała stałego. Ośrodek aktywny jest częściowo jonizowany, a uzyskane w ten sposób swobodne elektrony przyśpieszane w polu elektrycznym (przeważnie stałym) w procesie zderzeń nie sprężystych oddają część swojej energii kinetycznej cząstkom aktywatora wzbudzając je do odpowiednich wyższych poziomów energetycznych. Akcja laserowa zachodzi z reguły pomiędzy parą poziomów wzbudzonych. W trakcie generacji cząstka aktywatora na skutek emisji wymuszonej przechodzi z **górnego** - **G** poziomu laserowego na **dolny** - **D** emitując kwant o energii $h\nu = E(G) - E(D)$. Proces przekazywania energii kinetycznej elektronu cząstkom nie jest selektywny. Obsadzane mogą być więc zarówno górne jak i dolne poziomy laserowe. Wystąpienie inwersji obsadzeni wymaga więc spełnienia dodatkowego warunku istnienia różnic w czasach życia tych poziomów:

$$\tau(G) \gg \tau(D).$$

Spełnienie tego warunku w warunkach stacjonarnych sprzyja generacji promieniowania w sposób ciągły (**cw**) i większość laserów gazowych jest laserami cw.

Szczególnie szybko rozwinęły się lasery **He-Ne** generujące promieniowanie widzialne (czerwone) o długości fali **632 nm**. Ich odmiany generujące fale monochromatyczne (**lasery jednoczęstotliwościowe**) umożliwiły budowę całej gamy urządzeń wykorzystujących **zjawisko interferencji** w tym **interferometry do pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych**. Inne ich typy o dobrze zdefiniowanej wiązce i małym kącie rozbieżności ($\sim 10^{-4}$ rad) powszechnie były wykorzystywane w pomiarowych urządzeniach geodezyjnych lub służących do sterowania maszynami budowlanymi. Lasery He-Ne są laserami małej mocy rzędu pojedynczych miliwatów. Ciśnienie w rurze jest niewielkie (pojedyncze tory), a do ich wzbudzania wystarczy rozładowanie jarzeniowe. Mimo skrajnie małej sprawności ($\sim 10^{-3}$) zarówno zasilanie lasera jak i jego chłodzenie nie stwarzają większych problemów.

W większości laserów gazowych (He-Ne także) ośrodek czynny jest mieszaniną co najmniej dwóch składników:

- * **gazu aktywatora** (gazu będącego domieszką czynną – przejścia pomiędzy jego poziomami energetycznymi biorą udział w generacji);

- * **gazu buforowego** - wspomagającego wzbudzenie domieszki czynnej.

Zasadniczy mechanizm wzbudzenia jest podwójny:

1. Niesprężyste zderzenia elektronów (powstałych w gazie częściowo zjonizowanym) z gazami **aktywatora (Ne)** i **bufora (He)** oraz wzbudzenie ich do wymaganych poziomów energetycznych:

$$A + e(A) = A^* + e \quad \text{gdzie } e(A) - e = \Delta E(A) - \text{energia wzbudzenia A}$$

$$B + e(B) = B^* + e \quad \text{gdzie } e(B) - e = \Delta E(B) - \text{energia wzbudzenia B}$$

2. Wymiana energii wzbudzenia pomiędzy gazem B i A

$$B^* + A = A^* + B \quad \text{przy warunku, że } |E(B) - E(A)| \leq kT$$

Ponieważ ciśnienie $p(B) \gg p(A)$ proces [2.] jest wydajny.

Schemat powyższy praktycznie obowiązuje w wszystkich zbudowanych dotychczas laserach gazowych, chociaż ich parametry mogą być zasadniczo różne. Wszystkich nie uda się omówić, ale pewne ich typy (poza Ne-Ne), ze względu na ich nawet obecnie przydatność warto i trzeba.

Do jednych z ważnych, chociaż trudnych konstrukcji należą lasery jonowe (typowi przedstawiciele to jonowy laser **argonowy** – Ar^+ i **kryptonowy** – Kr^+). Skupimy się na pierwszym. Ośrodek aktywny stanowi argon, ale aktywatorem jest argon zjonizowany (Ar^+ czasem dwukrotnie). Komplikuje to zasilanie i wymaga chłodzenia rury lasera. Linie generacyjne leżą w górnym zakresie pasma widzialnego: kolor zielny ($\sim 514 \text{ nm}$) i niebieski ($\sim 488 \text{ nm}$), a moc promieniowania może sięgać pojedynczych watów. Wymaga to zasilania rury prądem o dużej gęstości (pow. 100 A/cm^2) emitowanego przez gorące katody tlenkowe i stosowania pola magnetycznego skupiającego plazmę w centrum rury wyładowczej. Sama rura w ostatnich najbardziej zaawansowanych konstrukcjach była ceramiczna i miała segmentową budowę zapewniającą skuteczne chłodzenie gazu przy wysokiej gęstości i temperaturze słupa plazmy w jej centralnej części. Pokazane w prelekcji części (segmenty) rury lasera argonowego zostały opracowane i wykonane przez dr Kęsika z PW, który w warunkach uczelnianych przez długi czas wykonywał te lasery na potrzeby krajowych ośrodków badawczych i produkcyjnych.

Liczną i dotąd wykorzystywaną grupą laserów gazowych są **lasery molekularne** w szczególności na **dwutlenku węgla (CO_2)**. Opracowane zostały w końcu 1964 r. przez C. K. Patela z Bell. Lab. Ich twórca zdawał sobie sprawę z zalet tego ośrodka. Napisał, że zajął się nim bowiem chciał: „chciał zbudować laser o dużej mocy i sprawności”. Rzeczywiście dotychczas wykorzystywane materiały czynne oferowały sprawności bardzo niskie ($\sim 1\%$).

Nie wdając się w szczegółową analizę przyczyn tego stanu rzeczy, należy zauważyć, że w laserze CO₂ do generacji wykorzystywane są poziomy leżące bardzo blisko podstawowego (położonego najniżej), a energia kwantu generowanego (różnica energii górnego i dolnego poziomu laserowego) stanowi przeszło 40% całkowitej energii wzbudzenia molekuły CO₂. W tym stanie rzeczy nic dziwnego, że w niektórych konstrukcjach sprawność tych laserów dochodzi do 30%. Jeżeli połączymy ten parametr z możliwością wytwarzania promieniowania o dużych przekraczających nawet 10 kW mocach ciągłych (CW), to potencjalnie źródło to stanowi niespotykane ważne narzędzie technologiczne. W rzeczy samej lasery te okazały się przydatne do cięcia, topienia, odparowywania oraz spawania nie tylko metali, ale także i innych materiałów w tym trudno obrabialnych innymi metodami: ceramika, węgliki itp.

Lasery CO₂ stały się nieodłącznymi składnikami laserowych centrów obróbczych, a obecnie w dalszym ciągu są powszechnie wykorzystywane np. do spawania blachy ze stali nierdzewnej.

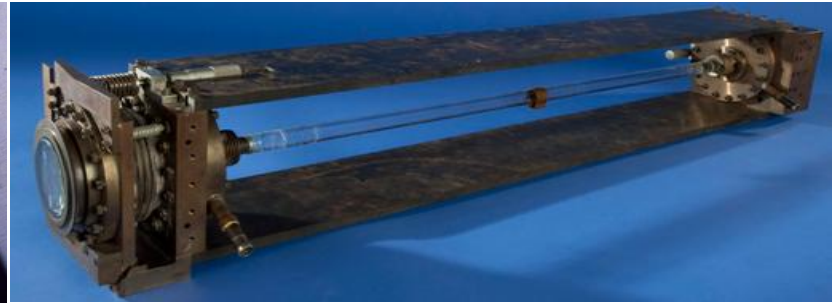
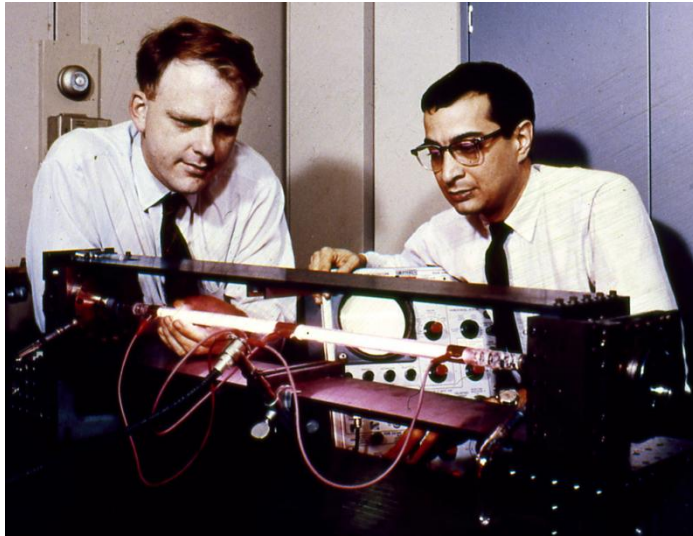
Ich wadą są stosunkowo duże rozmiary oraz długość fali (10,6 μm), która nie transmituje się w światłowodach szklanych. Stwarza to określone trudności w stosowaniu ich w medycynie, metrologii i przemyśle. To także przyczyna ich wypierania obecnie przez lasery ciała stałego głównie włóknowe.

O rozwoju każdej techniki decydują jej możliwości aplikacyjne. Do zmniejszenia znaczenia, a z czasem eliminacji laserów gazowych przyczyniły się głównie lasery półprzewodnikowe. Mimo równoległego z innymi ich odkrycia, odpowiednie parametry użytkowe tzw. **Diod Laserowych** długo dojrzewały w laboratoriach technologii półprzewodnikowych. Zasadniczy przełom nastąpił w latach 1980 - 1990 po wprowadzeniu do ich budowy nowych technologii epitaksji (MBE i MOCVD) oraz konstrukcji studni kwantowych. Uzyskano w laserach półprzewodnikowych znacznie przekraczającą inne typy laserów wydajności energii z jednostki objętości i sprawność. Diody Laserowe o miniaturowych liczonej **w milimetrach** wymiarach miały podobne moce co He-Ne o wymiarach **decymetrowych**. Były znacznie tańsze i miały bardzo nieskomplikowane zasilanie. Diody Laserowe wkrótce wyparły lasery He-Ne z prostych, podstawowych zastosowań, a po użyciu źródeł półprzewodnikowych do pobudzania laserów włóknowych, ten sam los spotkał technologiczne lasery CO₂.

Ogólnie można ocenić, że lasery gazowe spełniły jednak swoją historyczną rolę. Pokazały, że lasery są niezwykle przydatne wręcz nieodzowne w nauce, technice i gospodarce, a przez to pobudziły badaczy do szukania postępu w zakresie tej techniki. Pojawiła się nowa specjalizacja w elektronice - **optoelektronika (fotonika)**, która przeżywa szybki rozwój i coraz głębiej wchodzi w nasze życie.

Era laserów gazowych

Uruchomienie w grudniu 1960 lasera gazowego He-Ne przez A. Javana*) i W. Bennetta z Bell Lab. rozpoczęło erę laserów gazowych w nauce i technice[1].



W. Bennett i A. Javan przy pierwszym laserze He-Ne ($\lambda = 1,15$ μm ; wkrótce po tym powstał laser na zakres widzialny - 632,8 nm).

*) Ali Javan w 1954-55 współpracował z Ch. Townesem; Ch. Townes był promotorem jego doktoratu.

[1] A. Javan, W. R. Bennett, and D. R. Herriott „Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture”, Phys. Rev. Lett. 6, 106 (1961)

Początki klasyfikacji laserów

Do 1965 r uruchomiono wszystkie podstawowe lasery do dziś użytkowane w tym gazowe: **1964 – laser CO₂; laser jonowy Ar⁺; laser ekscymerowy.** Od tego czasu zaczęto klasyfikować lasery stanem skupienia ośrodka. Lasery gazowe były swego czasu liczne i najbardziej rozpowszechnione.

I. Laserami gazowymi nazywano wszystkie konstrukcje, w których ośrodek czynny występował w gazowym stanie skupienia. Wyróżniono w ten sposób:

1. Lasery gazowe **atomowe** np. **He-Ne**;
2. Lasery gazowe **jonowe** np. **argonowe Ar⁺** i **kryptonowe Kr⁺**;
3. Lasery molekularne np. **CO₂**, **ekscymerowe (duża grupa związków)**;
4. Lasery na parach metali np. **Cu, Au** (metale mogą być atomami lub jonami);
5. Lasery dalekiej podczerwieni (**FIR**) na wieloatomowych molekułach.

Posługując się tymi samymi kryteriami wyróżnić można jeszcze grupy :

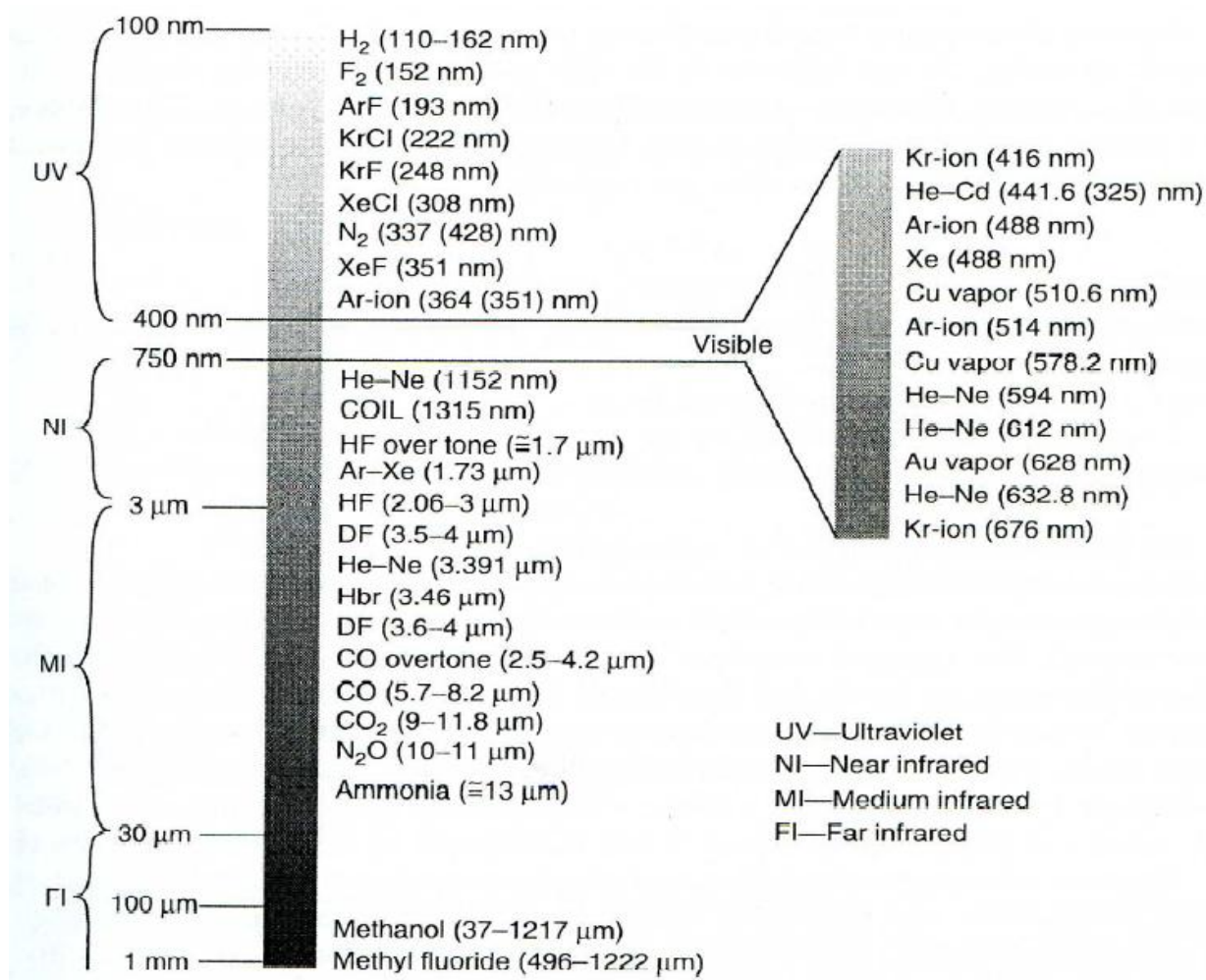
II. Lasery cieczowe – obecnie już nie spotykane w praktyce;

III. Lasery ciała stałego – łącznie z laserami półprzewodnikowymi grupa laserów obecnie znacząca i dominująca.

Zalety ośrodków gazowych – skąd era laserów gazowych

1. Opanowana technika rozładowania elektrycznego w gazach – nowa metoda wzbudzania ośrodków czynnych laserów.
2. Doskonała jednorodność ośrodka – dobrze zdefiniowana wiązka.
3. Gaz przyjmuje kształt kuwety wynikający z ograniczeń rezonatora; można dowolnie kształtować rozmiary bez znaczącego wzrostu kosztów.
4. Opanowana technika wysokiej próżni gwarantowała długotrwałą pracę; wymiana gazu znacznie przedłużała działanie lasera.
5. Gazowe media pozwalały na przepływ ośrodka przez obszar czynny.
6. Jednorodne mieszaniny gazów w różnych składach i ciśnieniu.
7. Niska gęstość - dobrze zdefiniowane położenia stanów energetycznych.
8. Możliwość stosowania izotopów – działanie na widmo generacji.
9. Bogactwo gazów zapewnia generację w pełnym widmie fal optycznych.

Pełna lista uruchomionych laserów gazowych



Ogólna charakterystyka gazowych ośrodków laserowych

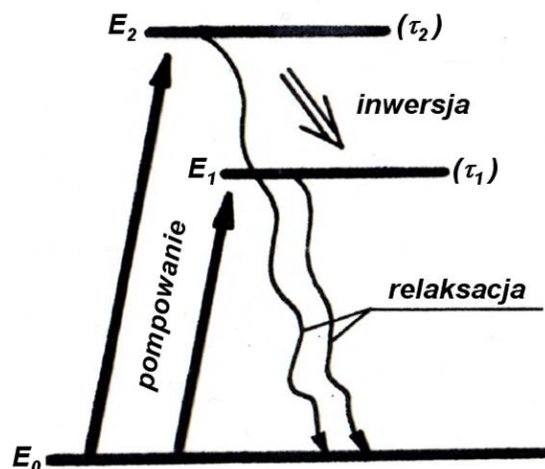
Wzbudzanie laserów gazowych - z reguły przez zderzenia cząsteczek gazu z elektronami wytworzonymi poprzez wyładowanie elektryczne w gazie.

Warunki pobudzania zderzeniami z elektronami pozostają niezmiennie gdy:

$$p D = N_A k T = \text{const.}$$

$N_A = 6,025 \cdot 10^{23}$ - st. Avogadry, k - wsp. Boltzmann, T - temp. p - ciśnienie; D - średnica rury.

Lasery gazowe są przeważnie źródłami zdolnymi do generacji promieniowania cw



Idea działania laserów gazowych:

1. Schemat: 3 – poziomowy; inwersja pomiędzy poziomami wzbudzonymi (nie obsadzone).
2. Energią elektronów można sterować poziom głównie obsadzany, ale wzbudzenie nie jest selektywne. Elektron traci część energii kinetycznej na wzbudzenie.
3. Warunek inwersji obsadzeń dla generacji cw:

$$\tau_2 > \tau_1$$

Jednostki ciśnienia

Układ SI – jednostka podstawowa: Pascal

$$\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{kg/s}^2\text{m}$$

Praktyczna: $1\text{hPa} = 100\text{ Pa} = 1\text{ mbar}$

Inne jednostki

jednostka ciśnienia	oznaczenie	Pa (SI); [Pa] = [N · m ⁻²]	przelicznik
milimetry słupa rtęci	mm Hg	133,322	1,33322hPa; 1/760atm
atmosfera fizyczna	atm	$1,01325 \cdot 10^5$	1013,25hPa; 14,696psi
atmosfera techniczna	at	$9,80665 \cdot 10^4$	980,665hPa
bar	bar	10^5	1000hPa
funt na cal kwadr., lb/in ²	psi	$6.8927 \cdot 10^3$	0,06893bar; 0,068025atm
tor	Tr	133,322	1mm Hg; 1/760atm

Tradycyjna jednostka ciśnienia gazu w rurach laserów: $1\text{ tor} = 1\text{ mmHg}$

Pobudzanie aktywnych ośrodków gazowych

Aktywny ośrodek laserowy tworzą mieszaniny dwóch lub więcej gazów:

A – aktywator; B – bufor. Z reguły:

$$p_B \gg p_A$$

$$p = p_A + p_B + \dots$$

Aktywatory: atomy (lasery atomowe); iony (lasery jonowe); molekuły (lasery molekularne);
pary metali (lasery na parach metali; metale mogą być atomami lub jonami)

Gaz buforowy wspomaga wzbudzenie, inne domieszki mogą spełniać inne funkcje

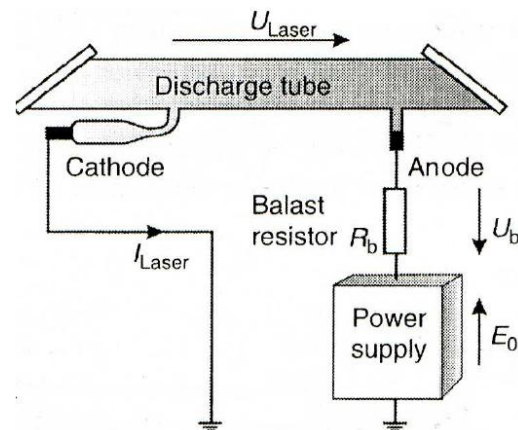
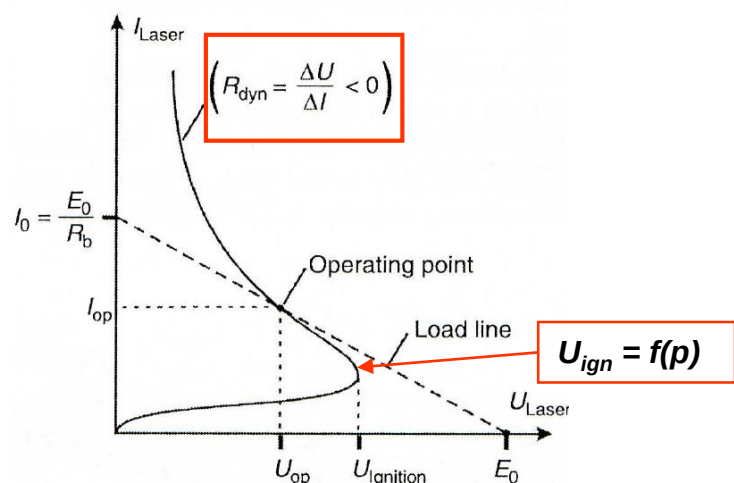
Do wzbudzenia ośrodków gazowych wykorzystywane są swobodne elektrony

Źródła elektronów:

1. Zimne katody: emisja elektronów pod wpływem pola elektrycznego i uderzeń jonów dodatnich po wstępnej jonizacji gazu.
2. Gorące katody: emisja elektronów z podgrzewanej (gorącej) katody w laserach jonowych o dużym prądzie pobudzenia.
3. Zewnętrzne źródła elektronów: generatory Marksa (mniej spotykane)

Zasilanie typowych laserów gazowych

Ograniczymy się do zasilania prądem stałym – najczęściej stosowane



$E_0 > U_{\text{ign}}$ - napięcie na rurze laserowej $U_{\text{op}} \ll E_0$ ($E_0 = U_{\text{op}} + U_b$)

Fizyka wzbudzenia

laserowych ośrodków gazowych

W polu elektrycznym (w cz lub stałe) elektrony uzyskują dużą średnią energię kinetyczną i wysoką równoważną temperaturę elektronów „ T_e ” znacznie większą niż temp. plazmy:

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT_e$$

$$T_e \gg T_p$$

Przy jarzeniowym wyładowaniu $T_p \sim T_0$ – otoczenia.
Podobnie $T_i \geq T_p \sim T_0$. Warunki te są spełnione w szczególności przy wzbudzeniu prądem w cz

Cząsteczki gazu i produkty wyładowania oddziałują na siebie w procesie zderzeń

1. Zderzenia niesprężyste – interesujące z punktu widzenia procesu wzbudzenia - **energia wewnętrzna cząstek ulega zmianie**, możliwa **jonizacja** i **wzbudzenie do wyższych stanów**;
2. Zderzenia sprężyste – zmianom ulega energia kinetyczna cząstek; **energia wewnętrzna jest zachowana** – nie biorą bezpośredniego udziału w procesie pobudzenia.

Zasadnicza własność: w zderzeniu elektrony przekazują jedynie część swojej energii kinetycznej (zmniejsza się ich prędkość ruchu) – **pobudzenie jest bardzo skuteczne**

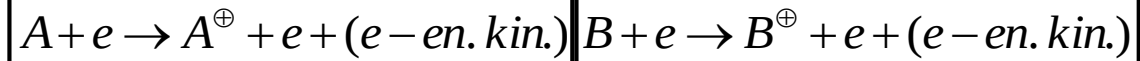
Podstawowy warunek:

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 \geq \Delta E$$

ΔE – przekazana energia na wzbudzenie

Mechanizmy wzbudzania laserowych ośrodków gazowych

1. Jonizacja:
(gdy potrzebna)



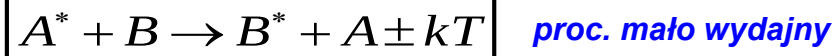
2. Wzbudzanie elektronowe:



3. Wspomaganie
wzbudzenia:



4. Gaszenie wzbudzenia:



Procesy 1 i 2 nie są selektywne (**duża zaleta**). Elektron traci tyle energii kinetycznej ile potrzeba na jonizację lub wzbudzenie cząsteczki gazu.

Procesy 3 i 4 są selektywne. Cząsteczka wzbudzona może przekazać jedynie pełną energię wzbudzenia. Konieczne spełnienie jest warunku:

$$E(B^*) \geq E(A^*) \pm kT$$

Jednorodnie i niejednorodnie poszerzone linie

Naturalna szerokość linii - związana z czasem życia stanu wzbudzonego: τ_{21}
izolowanej cząstki - opisywana funkcją Lorentza

$$G_L(\omega) = \frac{\left(\frac{1}{\tau_{21}}\right)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{1}{\tau_{21}}\right)^2}$$

Naturalna szerokość,
jednorodnej linii:

$$\Delta\omega_n = \frac{2}{\tau_{21}} \quad \text{lub}$$

$$\Delta\nu_n = \frac{1}{\pi\tau_{21}}$$

Naturalna szerokość linii wynika z zasady nieoznaczoności:
jeżeli przyjąć $\Delta t \sim \tau_{21}$, a $\Delta E = h(2\Delta\nu_n)$ otrzymamy wzór na

$$\Delta E \Delta t = h/2\pi; \\ \Delta\nu_n = 1/\pi\tau_{21}$$

Z naturalną szerokością linii rzadko spotykamy się w praktyce .
W normalnych warunkach szerokości linii są znacznie większe, chociaż
w dalszym ciągu mogą mieć charakter poszerzenia jednorodnego.

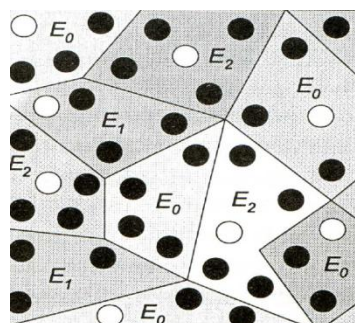
Z jednorodnie poszerzoną linią mamy do czynienia wtedy, gdy wszystkie aktywne
cząsteczki uczestniczące w procesie emisji wymuszonej mają identyczne
częstości centralne i identyczne funkcje opisujące ich rozkłady widmowe.

Niejednorodne poszerzenie linii

Wszelkie niejednorodności ośrodka czynnego mogą być przyczyną różnic pomiędzy cząstkami czynnymi i niejednorodnego poszerzenia linii

Najczęściej spotykane przyczyny niejednorodnego poszerzenia linii

1. Niejednorodności osnowy ciał stałych (kryształów)



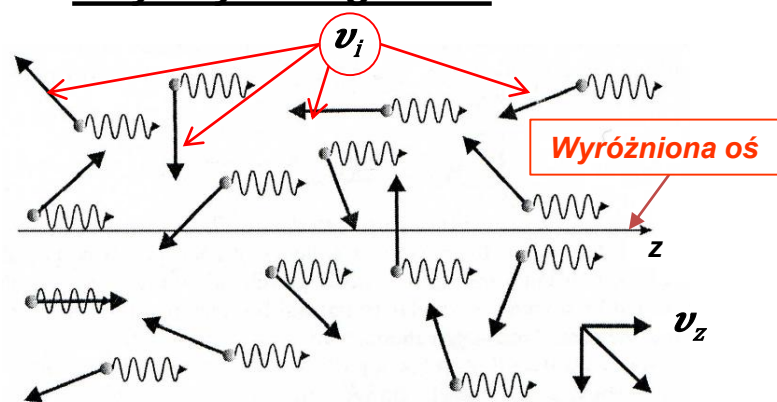
Niejednorodny kryształ lub szkło

○ jon aktywny
● atom osnowy

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{E_2}{E_1} & \frac{E_2'}{E_1'} & \frac{E_2''}{E_1''} \\
 \frac{E_2 - E_1}{h} & \frac{E_2' - E_1'}{h} & \frac{E_2'' - E_1''}{h} \\
 v_0 & v_1 & v_2
 \end{array}
 \quad
 \boxed{v_0 \neq v_1 \neq v_2}$$

E_0, E_1, E_2 – lokalne pole elektryczne osnowy

2. Ruchy Browna cząstek aktywnych w gazach



$$v = v_0 \left(1 \pm \frac{v_z}{c} \right)$$

$$v = v_0 \rightarrow v_z = 0$$

Ocena charakteru poszerzenia linii

Z niejednorodnym poszerzeniem linii mamy do czynienia wtedy, gdy istnieją przyczyny skutkujące różnicą częstotliwości centralnych części aktywnych. Takich przyczyn, prowadzących do niezbyt istotnych zmian może być więcej. Przeważnie mamy do czynienia z poszerzeniem mieszanym: jednorodnym i niejednorodnym jednocześnie. Prowadzone były próby ich uwzględniania. Przeważnie ocenia się wpływ dominujący i w zależności od jego charakteru uznaje się dany ośrodek jako poszerzony jednorodnie lub niejednorodnie.

Ośrodki z poszerzeniem niejednorodnym o szerokich liniach luminescencji wykorzystuje się do generacji bardzo krótkich impulsów lub budowy laserów przestrzajanych w szerokim paśmie.

Przy budowie laserów jednoczęstotliwościowych chętniej sięga się do ośrodków z poszerzeniem jednorodnym linii, chociaż nie jest to warunek konieczny.

Mechanizmy poszerzenia linii w gazach

1. Poszerzenie ciśnieniowe (zderzeniowe)

Wszelkiego rodzaju kolizje poruszających się cząstek są przyczyną skrócenia czasu życia na poziomach wzbudzonych i poszerzenia linii: τ_c

$$\frac{1}{\tau_c} = N_g \sigma_c \bar{v} = N_g f_c$$

N_g - gęstość gazu, σ_c – przekrój czynny na zderzenia;
 $\bar{v}$ - średnia prędkość cząstek; f_c - częstość zderzeń.

Ogólnie można stwierdzić, że poszerzenie zderzeniowe zależy od ciśnienia gazu.

Poszerzenie ciśnieniowe ma podobny charakter jak naturalne i opisywane jest za pomocą funkcji Lorentza, ale z obniżonym czasem życia stanów wzbudzonych:

$$G_L(\omega) = \frac{\left(\frac{1}{\tau}\right)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2}$$

gdzie:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{21}} + \frac{1}{\tau_c}$$

i

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{\pi\tau}$$

Poszerzenie zderzeniowe podaje się w jednostkach [MHz/tor], [laser He-Ne, 632 nm – 70 MHz/tor; laser CO₂, 10,6 μm – 5 MHz/tor].

2. Poszerzenie Dopplera

$$\nu = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v_z}{c} \right)$$

Rozkład Maxwella – Boltzmanna składowej prędkości wyrażony jest zależnością:

$$f(v_z) = \frac{1}{\bar{v}\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{v_z^2}{\bar{v}^2}\right)$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

- średnia (najbardziej prawdopodobna) prędkość cząstki o masie m w temp. T

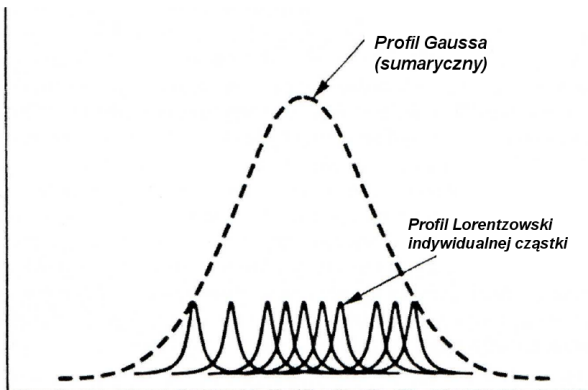
Wypadkowa funkcja widmowa oddziaływania cząstek z polem ma kształt Gaussa:

$$g(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left\{-\ln 2 \left[\frac{2(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_D}\right]^2\right\}$$

Szerokość linii

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2\ln 2 kT}{mc^2}}$$

$$\Delta\nu_D = \varphi(\nu_0, T, m)$$



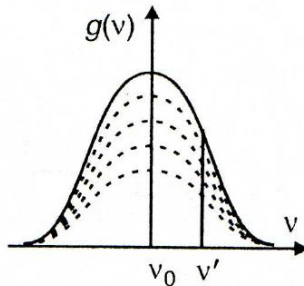
$$\Delta\nu_D \gg \Delta\nu_L$$

Oddziaływanie Dopplera jest bardzo silne i ujawnia się silniej na krótszych falach. ($\Delta\nu_D \propto \nu_0$)

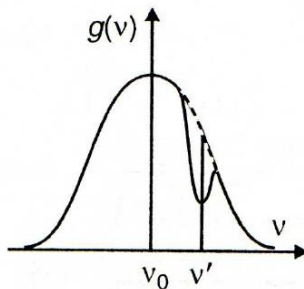
Poszerzenie Dopplera – dominujący efekt kształtujący profil linii oddziaływania w laserach gazowych

He-Ne (632nm): $\Delta\nu_D \cong 1,5 \text{ GHz}$; **CO₂ (10,6μm):** $\Delta\nu_D \cong 60 \text{ MHz}$

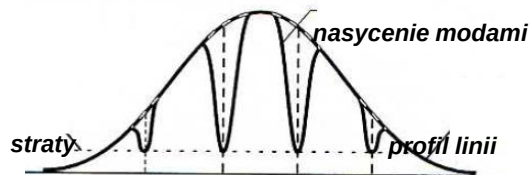
Oddziaływanie promieniowania z ośrodkami jednorodnie i niejednorodnie poszerzonymi



Wszystkie cząstki o poszerzeniu jednorodnym oddziałują z polem monochromatycznym o częstotliwości leżącej ich pasmie. Przy nasyceniu wzmacnienia objawia się to zmniejszeniem całej krzywej.



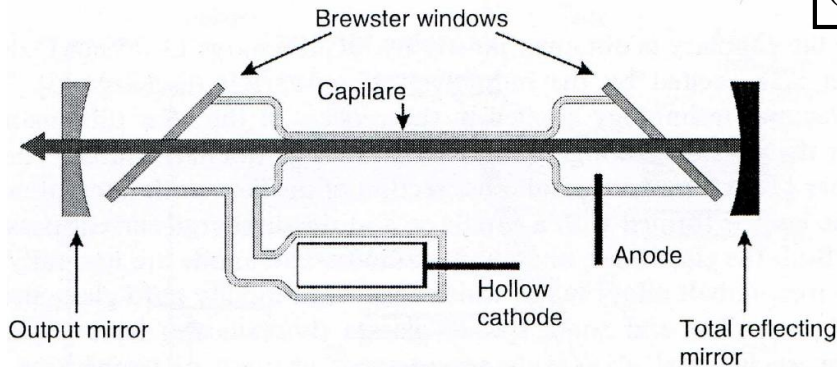
Przy identycznej definicji mamy zupełnie inny obraz oddziaływania przy zbiorze cząstek o niejednorodnie poszerzonej linii. Przy nasyceniu wzmacnienia pojawi się zagłębienie „burn holl” w okolicy częstotliwości fali monochromatycznej o szerokości linii jednorodnej. Linia poszerzone niejednorodnie składa się bowiem z wielu linii jednorodnych.



Ośrodek aktywny o niejednorodnym poszerzeniu w rezonatorze lasera wysyca się w okolicach **częstotliwości modowych**. Takie ośrodki generują **większe moce** przy **pracy wielomodowej** gdy odstęp pomiędzy modami jest mniejszy od szerokości linii poszerzonej jednorodnie.

2. Zasady technologii i konstrukcji

Dwie podstawowe konstrukcje: **otwarta i scalona**



$$(pD)_{opt} \approx 3,6 [tor \cdot cm] - \text{ optymalny iloczyn } pD$$

Typowe średnice kapilar

$$D = (1 \div 2) mm$$

Ogólne i parcjalne ciśnienia gazów

$$p_{He+Ne} \cong (2 \div 5) tor$$

$$p_{He} / p_{Ne} \approx (5 \div 10)$$

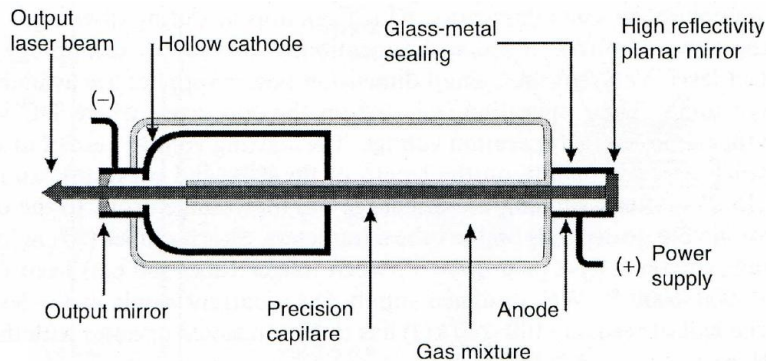
Pobudzanie prądem stałym: zimna katoda; rozładowanie jarzeniowe

Dla typowych p_{He+Ne}

$$\bar{E} \approx (50 \div 100) \left[\frac{V}{cm} \right]$$

Uzyskiwane T_e

$$T_e \approx 80 kK$$



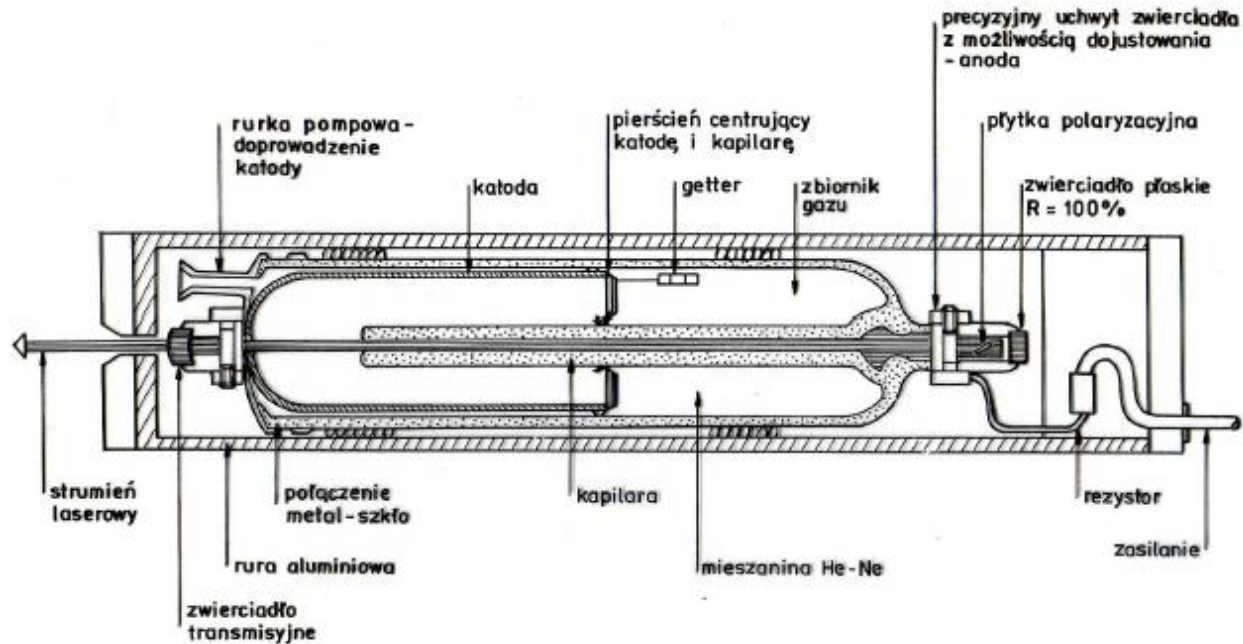
Rozbudowane zasilanie:

Typowe lasery: 20 cm $U \cong (1000 - 1500) V$
60 cm $U \cong (4000 - 6000) V$

Napięcie zapłon u : (8 -10) kV; $R_B \sim (0,1-0,2) M\Omega$

Konstrukcja laserów scalonych He-Ne

Rysunek przedstawia wersję całkowicie zamkniętą zwierciadłami



Przykłady krajowych rozwiązań

Podać je mogą dwa zespoły uczelniane: WAT i Politechnika Warszawska

Lasery scalone He-Ne WAT serii LM



Rura lasera scalona całkowicie lub częściowo zamknięta zwierciadłami typu „lasertron” w obudowie metalowej (bezpieczne użytkowanie)

LM 200 (0,5 –1) mW, mod TEM_{00} ; 1-częstot.

LM 300 ~ 2mW; mod TEM_{00} - podstawowy

LM 500 do 5 mW; mod TEM_{00} – pow. moc

LM 700 na specjalne zamówienie

W latach 1970 -1990 (KUM) - Katedra Urządzeń Mikrofalowych, (IUMiL) - Instytut Układów Mikrofalowych i Laserowych i (IOE)- Instytut Optoelektroniki WE WAT wytworzono kilkaset sztuk tych laserów na potrzeby krajowe

Nie mogę nie wspomnieć w tym miejscu Twórców - Konstruktorów tych opracowań:
1. Płk mgr inż. Jan Malinowski (†) **2. Mgr inż. Maksym Gębczak**

„Wzlot” i „zmierzch” laserów He-Ne

Zalety laserów He-Ne – przyczyny szybkiego ich rozwoju:

1. Generacja w zakresie widzialnym – **podstawowa 628 nm** – inne do spec. zastosowań;
2. Doskonała jakość wiązki TEM_{00} ($M^2 \cong 1$), o małym kącie rozbieżności $\theta \sim 10^{-4}$ rad.
3. Wiązka b. bliska Gaussa łatwo jest przekształcana przez układy optyczne – **szklane**;
4. Możliwość (łatwość) generacji wiązki o różnej polaryzacji: **liniowej i kołowej**;
5. Ośrodek aktywny gazowy (**bardzo jednorodny**), łatwa **optymalizacja składu**;
6. Zwarta konstrukcja – **lasertrony** – pozwalała montować je w urządzeniach użytkowych;
7. Były one nie tylko jedne z najlepszych do wykorzystania praktycznego, ale jedyne.

Lasery He-Ne znalazły tak szerokie zastosowanie praktyczne gdyż było na lasery ogromne zapotrzebowanie zarówno w nauce jak i gospodarce

Wkrótce okazało się, że bez laserów nie mogły obejść się:

- Laboratoria optyczne, fizyczne i optoelektroniczne uczelni;
- Zakłady wytwórcze sprzętu optycznego i optoelektronicznego;
- Sprzęt geodezyjny i pomiarowy sprzęt budowlany;
- Szereg opracowywanych (nowych) urządzeń pomiarowych i technicznych.

Wady, (przyczyny) spadku zainteresowania laserami He-Ne

1. Stosunkowo **duże gabaryty**, szczególnie w porównaniu z pojawiającymi się DL;
2. Skomplikowane zasilanie – **wysokie napięcie** i bardzo mała **sprawność** ($> 0,1\%$);
3. Skomplikowane i **pracochłonne wykonanie** - koszty (przy dużych seriach **cena $< 100\$$**);
4. **Resurs działania** w najlepszych laserach dochodził do **5000 h**;
5. „**Zatruwanie aktywnego ośrodka**” uwalnianymi resztkowymi gazami (szkło i elektrody);
6. Zmiana proporcji składu mieszanki gazowej – **ucieczka helu**;
7. **Nieopłacalna** i zbyt skomplikowana (ogromna czystość) **regeneracja rury**;
8. Te „wady” byłyby do zniesienia, gdyby nie **postęp w laserach półprzewodnikowych**.

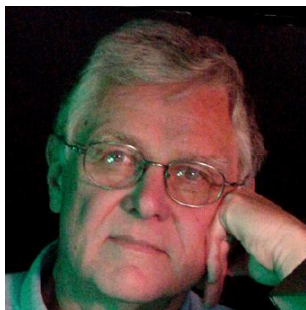
Lasery gazowe He-Ne z powszechnego użycia zostały wyparte przez lasery półprzewodnikowe, które nie miały większości ich wad. Niestety laserowe diody półprzewodnikowe nie mają również większości zalet laserów He-Ne. Powoduje to, że lasery He-Ne pozostały w specyficznych, choć nielicznych zastosowaniach, tam gdzie ich zalety są decydujące i niezbędnym potrzebne.

II. Lasery jonowe

Laser jonowy – argonowy (Ar^+)

Nazwę – **laser jonowy** - przypisuje się laserom gazowym w których obiektem czynnym jest **jon** jakiegoś **pierwiastka**. Powszechnie są znane lasery jonowe gazów szlachetnych **Ar^+ , Kr^+ , Ne^+ , He^+** . Nazwę - **laser jonowy** - stosuje się także do laserów w których domieszką aktywną są **jony par metali**: np. kadmu (**Cd^+**) lub selenu (**Se^+**).

Idea działania laserów jonowych



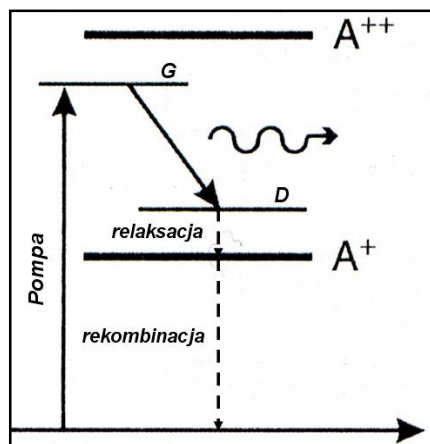
William B. Bridges (1934)

Ideę lasera **argonowego** przedstawił W.B. Bridges w 1964r[4]

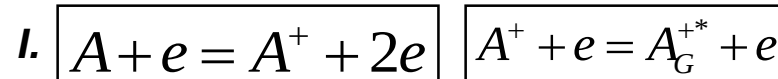
Przejścia laserowe **G** → **D** zachodzą pomiędzy poziomami energetycznymi jonów: **A⁺**, **A⁺⁺**, lub **A⁺⁺⁺**
Pompowanie: **jonizacja** oraz **wzbudzenie** do stanu **G**.

Gęstość obsadzeń (moc lasera) proporcjonalne do **J² [A/m²]**

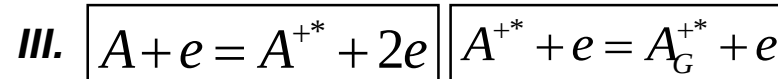
Rodzaje wzbudzeń: (poziomy uczestniczące w generacji: **G** – górny; **D** – dolny)



1. Jednokrotne: $A + e = A_G^{+*} + 2e$ Małe moce i lasery impulsowe



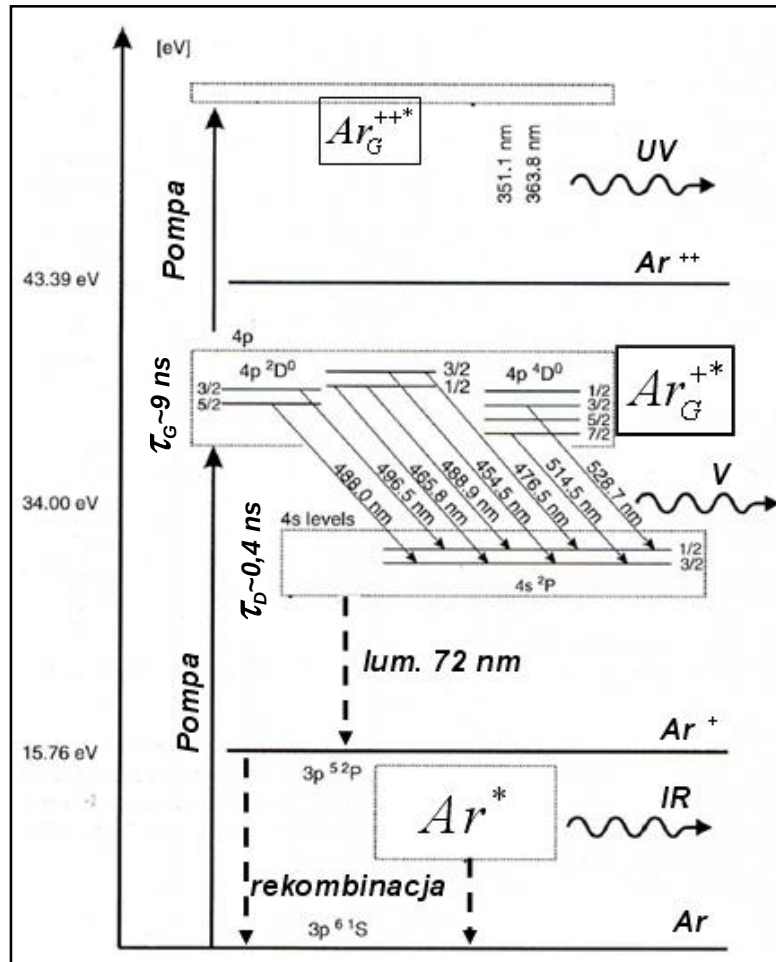
2. Dwukrotne: II. $A + e = A^* + e$ $A^* + e = A_G^{+*} + 2e$



Lasery jonowe wymagają dużych gęstości prądu wzbudzenia

[4] W.B. Bridges, „Laser oscylation in singly ionized argon in the visible spectrum” Appl. Phys. Lett., 4, 128, (1964)

Spektroskopia jonu argonu – Ar^+



$$\tau_G \gg \tau_D \quad - \text{Możliwość gen. CW}$$

Możliwość generacji kilkunastu długości fal w zakresie widzialnym (430÷530) nm.
Najważniejsze: 488,0 nm; 514,5 nm;

Typowe wartości dla rury wyładowczej:

Pierwsze konstrukcje: kapilara kwarcowa
 $d = (1 \div 5) \text{ mm}$ $L = (0,25 \div 100) \text{ cm}$; ośrodek:
 Ar , $p = (01 \div 1) \text{ tora}$; $J_{\min} \sim 100 \text{ A/cm}^2$,
 Konieczna wydajna katoda gorąca (tlenkowa).

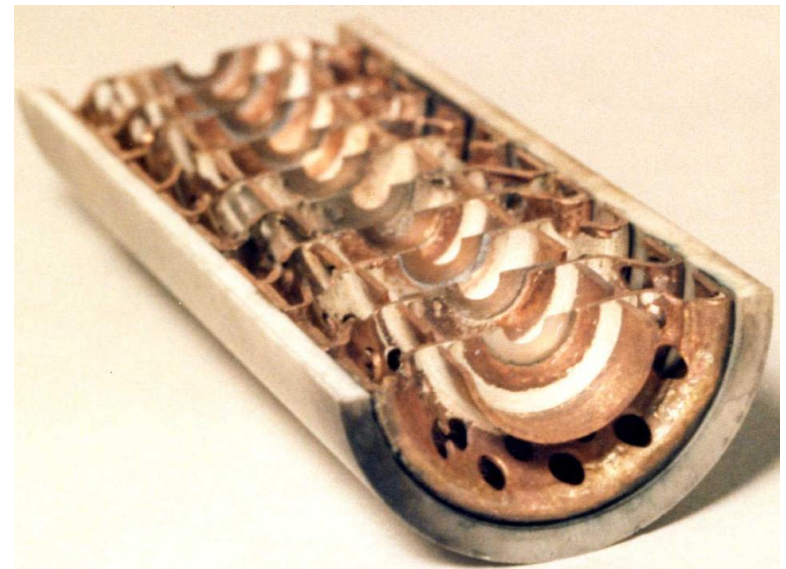
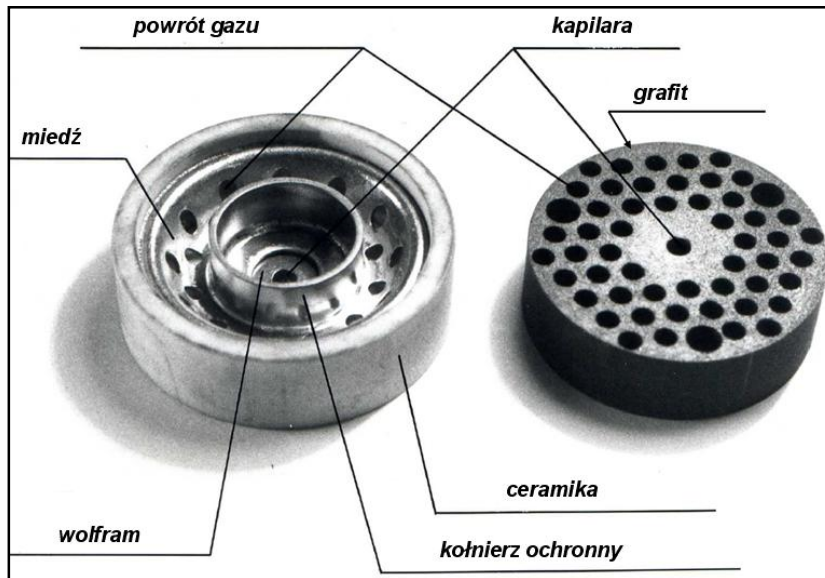
Główne problemy: 1. nagrzewanie i rozpylanie kapilary, krótka praca mimo chłodzenia wodą;
 2. nierównomierny rozkład jonów wzdłuż rury;
 3. mała sprawność $< 0,1 \%$; 4. mała moc $< 1 \text{ W}$.

Możliwości rozwiązania: 1. zmiana konstrukcji i materiału kapilary; 2. swobodny przepływ gazu wzdłuż rury wyładowczej; 3. skupienie polem magnetycznym plazmy w centrum kapilary

Konstrukcje laserów jonowych dużej mocy^{*)}

1. Rozdzielenie funkcji zbiornika gazu i kapilary kanalizującej plazmę.

Zbiornik stanowi rura ceramiczna (ceramika alundowa), a **plazmę kanalizują** **wkładki** (początkowo) **grafitowe**, a później **miedziane z tarczą wolframową**.

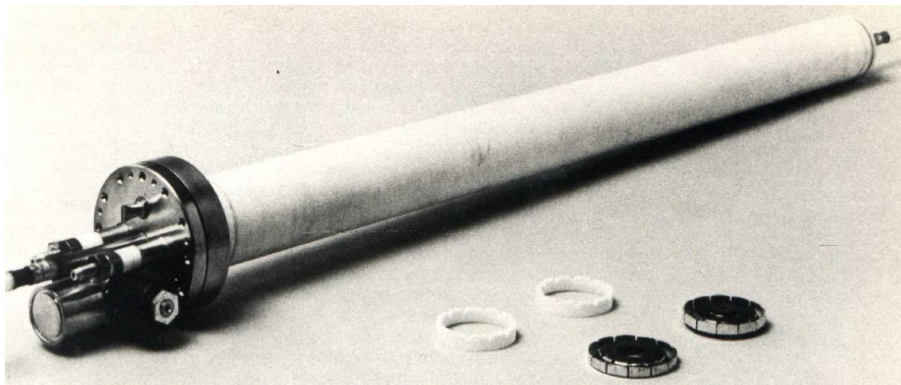


2. Zapewnienie jednorodnego rozkładu ciśnienia w rurze (otwory powrotne)

^{*)} Konstrukcje dr inż. Kęsika - PW

3. Skupienie polem magnetycznym plazmy w centrum kapilary

Geometria wzbudzenia wymusza rozładowanie łukowe w kapilarze. **Gaz elektronowy i dodatnie jony** aktywne poruszają się wzdłuż kapilary tworząc wspólnie **prąd wzbudzenia**. Symetryczne **pole** magnetyczne **H** wzdłużne **będzie kanalizowało** rozładowanie skupiając **plazmę w centrum**.
Naturalne wymuszenie generacji modem podstawowym TEM_{00}

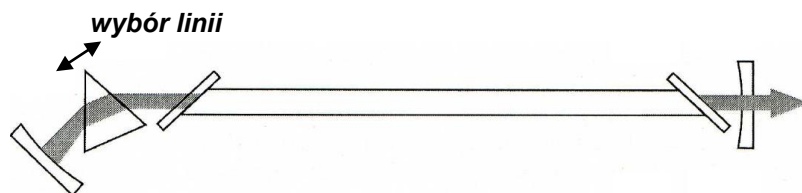


Zwarta konstrukcja alundowej rury laserowej umieszczana jest w płaszczu chłodzącym wodnym i cewce wytwarzającej pole H .

Lasery wykonywane zgodnie z podanymi zasadami mogą generować moce rzędu kilkudziesięciu watów.

Charakterystyki widmowe laserów jonowych

Liczba generowanych linii zależy od zakresu widmowego zwierciadeł i poziomu wzbudzenia. Zwykle generacja jest w kilku silniejszych liniach. W laserze argonowym dotyczy to przejścia 488,0 nm i 514,5 nm.



Prosty rezonator dyspersyjny zapewni generacją w zakresie wybranej linii

Charakterystyka rezonansu w laserze jonowym opisywana jest rozkładem Gausa, gdyż jest niejednorodnie poszerzona dopplerowsko ruchem gazu.

$$\Delta \nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2 \ln 2 kT}{mc^2}}$$

$\Delta \nu_D$ jest większe niż w laserze Ne-Ne
gdyż ν_0 i T są wyraźnie większe.

Typowe wartości: w zakresie linii V: $\Delta \nu_D = (3 \div 5)$ GHz; UV: $\Delta \nu_D = (5 \div 12)$ GHz

Najczęściej stosowana linia 514,5 nm ma $\Delta \nu_D = 3,5$ GHz.
Przy $L=0,75$ m generuje się ~35 modów wzdłużnych

Zastosowania laserów jonowych

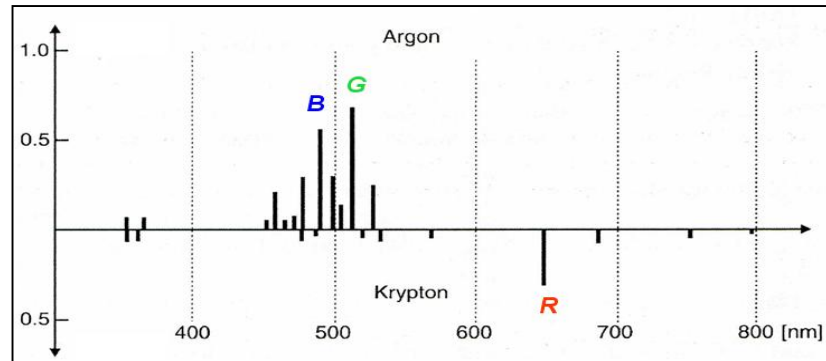
Poza laserem He-Ne, laser o małym kącie rozbieżności i rozkładzie TEM_{00} .

Najczęściej stosowany w **medycynie** (np. okulistyka) i **metrologii**.

Idea lasera „białego”

napętnienie rury jednocześnie argonem i kryptonem. Mieszanka generuje jednocześnie trzy podstawowe kolory **R** (647,1 nm), **G** (514,5 nm) i **B** (488,0 nm).

Wynik: światło zbliżone do białego



1. Powszechnie stosowany w okulistyce – dzięki doskonałej wiązce (TEM_{00} - dobra koncentracja prom. na siatkówce, barwie (brak absorpcji) i łatwej regulacji mocy.
2. Metrologia – walory powyższe (mimo skomplikowanej budowy i wysokiej ceny) czynią go dobrym narzędziem metrologicznym: np. **dopplerowskie pomiary przepływu**.
3. Podświetlanie występów artystycznych – głównie dzięki wysokiej mocy i możliwości użycia skanerów. **Barwne, ruchome napisy i kontury** np. postaci (wilk i zając)

III. Lasery molekularne

Najważniejszy laser molekularny CO₂

Pierwszy laser CO₂ zbudował C. K. N. Patel w 1964 w Bell Laboratory [5,6]

Patel C. K. N. „Zajęliśmy się ośrodkami molekularnymi, gdyż chcieliśmy zbudować lasery o większej mocy i sprawności”

Lasery CO₂ były pierwszymi laserami, które dzięki wysokiej mocy wyjściowej cw (kW) i sprawności (do 30%) znalazły zastosowanie do celów przemysłowych (spawanie metali, cięcie) i medycznych (chirurgia).

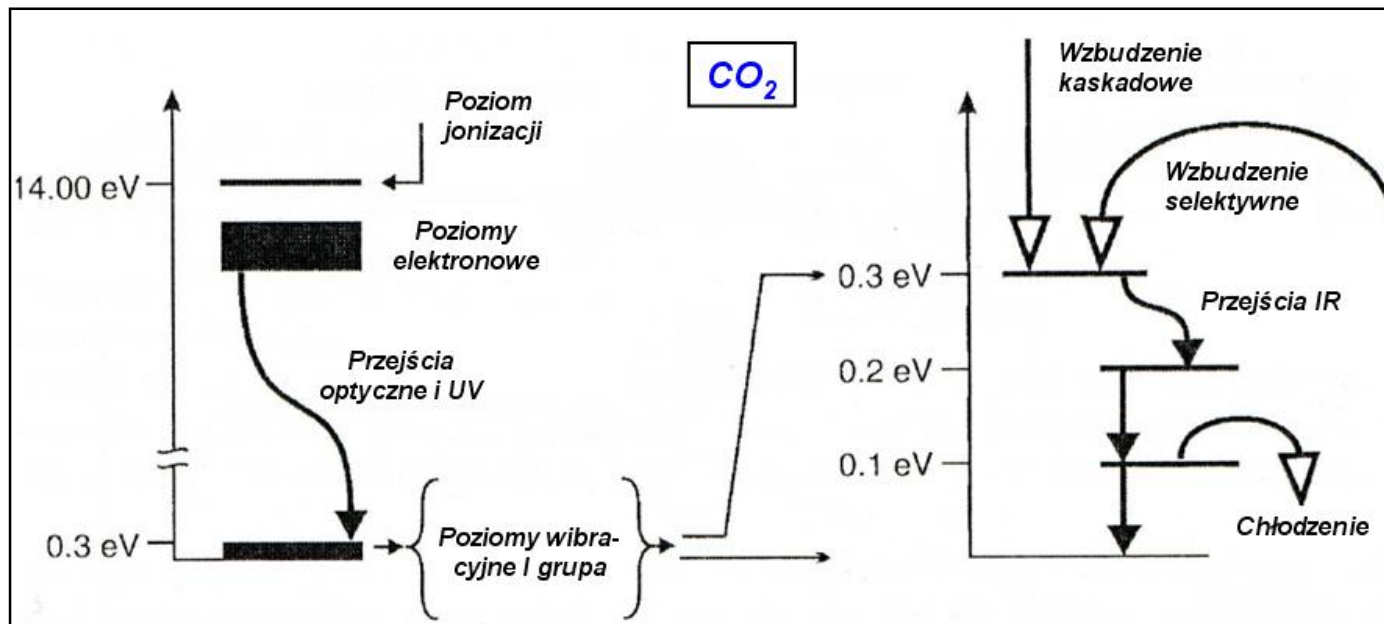
Mimo upływu przeszło 50. lat od skonstruowania pierwszego lasera CO₂ i zbudowaniu laserów ciała stałego (szczególnie włóknowych**) o podobnych mocach i sprawności, w dalszym ciągu centra obróbcze oparte o stosowanie laserów molekularnych są z powodzeniem nadal budowane i wykorzystywane.**

[5] Patel C.K.N. „Interpretation of CO₂ optical maser experiments” Phys. Rev. Lett. 12, 588-590 (1964)

[6] Patel C.K.N. „Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transition of CO₂” Phys. Rev. Lett. 136, (1964)

Spektroskopia molekuly CO_2

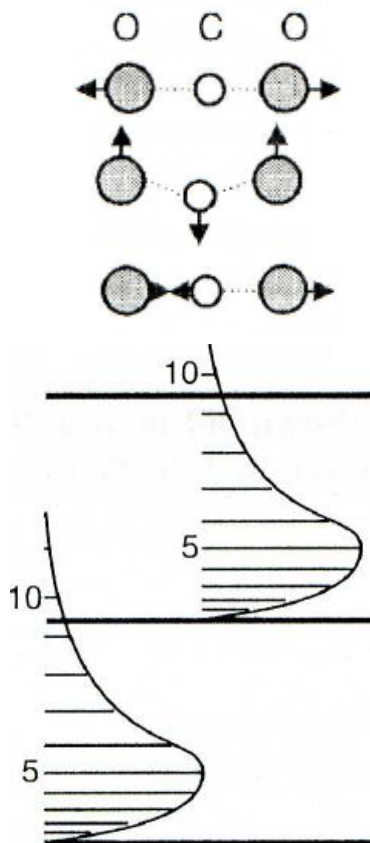
Dlaczego C.K.N. Patel uważał, że budując laser CO_2 uzyska dużą moc i sprawność?



W akcji laserowej bierze udział pierwsza grupa poziomów wibracyjno-rotacyjnych o energii zaledwie 0,3 eV (równoważne: $\nu \sim 70\text{THz}$, $\lambda \sim 4,3 \mu\text{m}$, $\lambda^{-1} \sim 2400 \text{ cm}^{-1}$)

Długość fali generacji ($10,6 \mu\text{m}$) odpowiada $\sim 0,4$ energii pobudzania, co wskazuje na możliwość uzyskania bardzo wysokiej sprawności tego lasera

Poziomy energetyczne i przejścia w gazowych ośrodkach molekularnych



Reguły wyboru dla poziomów oscylacyjno - rotacyjnych:

$$\Delta V' = \pm 1$$

$$\Delta J' = 0, \pm 1$$

Przejścia

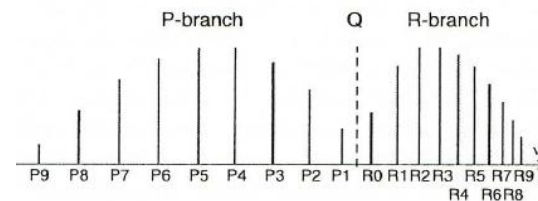
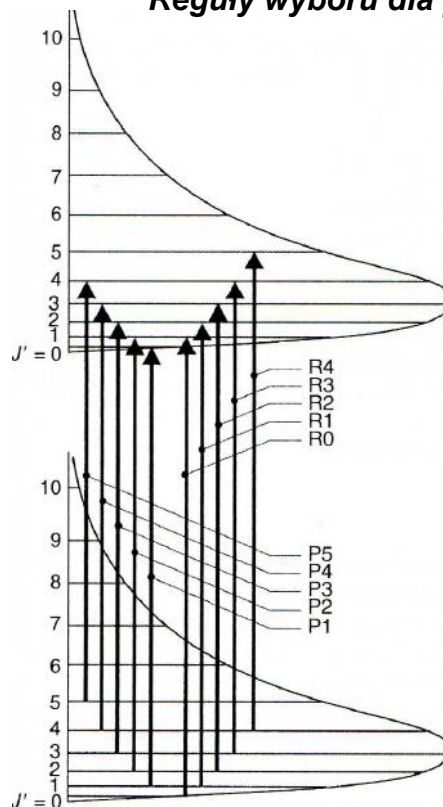
$$\Delta J' = +1$$

tworzą termy R

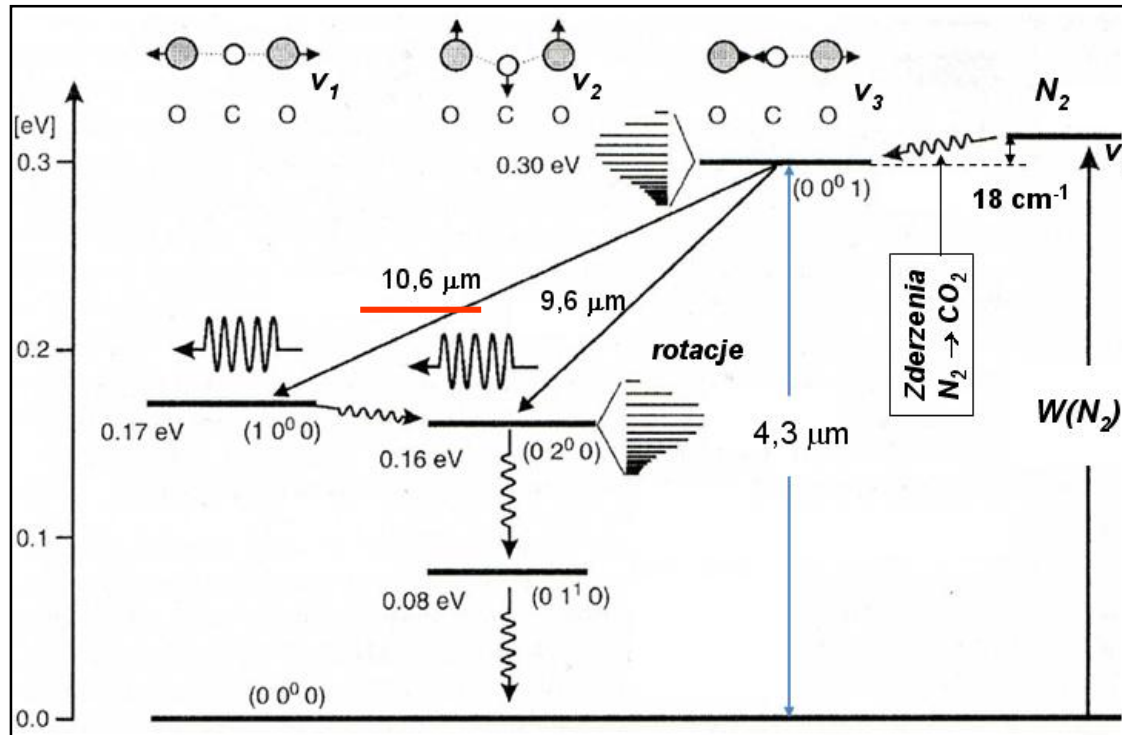
Przejścia

$$\Delta J' = -1$$

tworzą termy P



Poziomy energetyczne molekuly CO₂

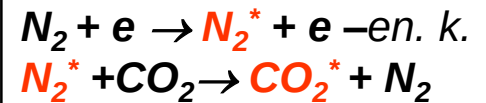


Optymalny ośrodek

CO₂ : N₂ : He

(1 : 1 : 3) ÷ (1 : 1 : 8)
p ≅ (8 ÷ 50) tor

Selektywne wzbudzenie:



He – chłodzenie (v₁, v₂ → v₀)

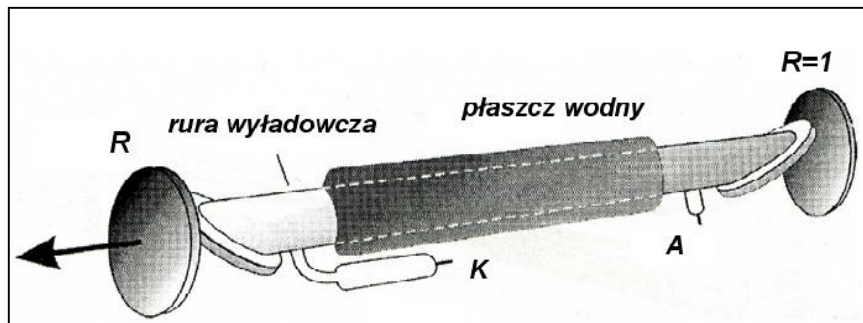
10,6 μm – silna linia generacyjna

τ(v₃) ≅ 2ms, τ(r) ≅ 10⁻⁷s
- szybka termalizacja

Lasery CO₂ (DC, p < 50 tor) mają **linię poszerzoną jednorodnie** (mała prędkość molekuly i poszerzenie Dopplera) i **duże jednorodne poszerzenie ciśnieniowe**

Podstawowe rodzaje laserów CO₂

Łatwość zasilania i wysoka sprawność preferowała konstrukcje energetyczne.

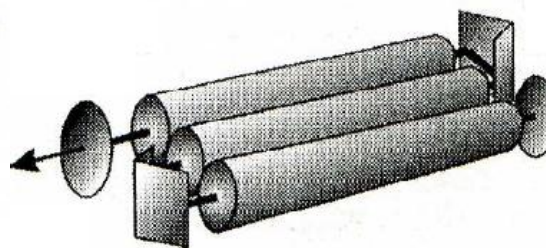
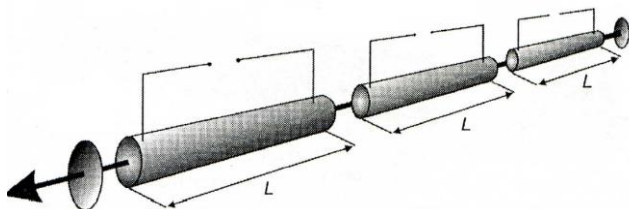


**Najprostsza konstrukcja rurowa
– chłodzenie dyfuzyjne**

$$p \cdot d \approx (15 \div 40) [Pa \cdot m] \approx const$$

$$\frac{P_{wyj}}{l} \approx (60 \div 80) \left[\frac{W}{m} \right] \approx const$$

Im dłuższy laser, tym większa generowana moc



Możliwe konstrukcje:

- a. segment. liniowa;
- b. segment. łamana.

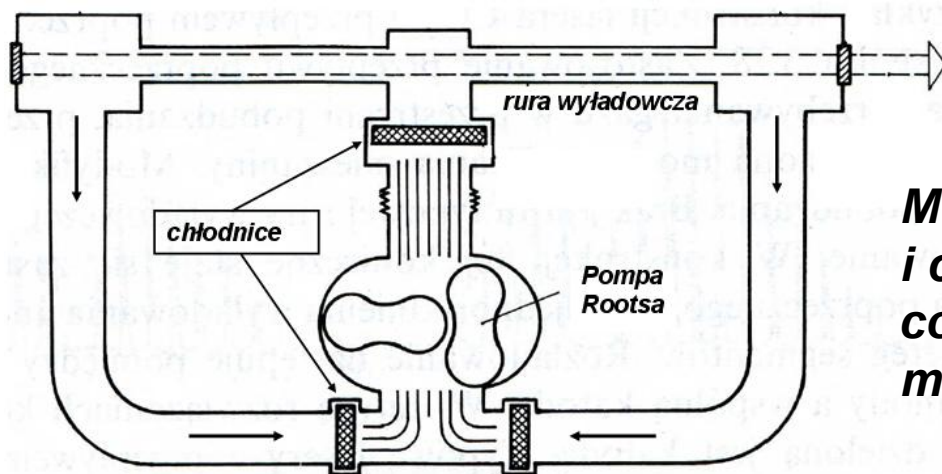
$$P_{wyj} \leq 1 kW$$

Główne ograniczenie: nagrzewanie się gazu (najbardziej centrum rury) i nadmierne obsadzenie niższych (100) pośrednich (020 i 010) poziomów molekuly CO₂.

Przepływowe molekularne lasery CO₂

Rozwiązanie radykalne – wymiana gorącej mieszanki na nową chłodną, prowadzi to do budowy nowych jakościowo **laserów przepływowych**

A. Lasery z przepływem wzdłużnym:



Nagrzana mieszanka czynna jest **usuwana** z przestrzeni rezonatora **i chłodzona**.

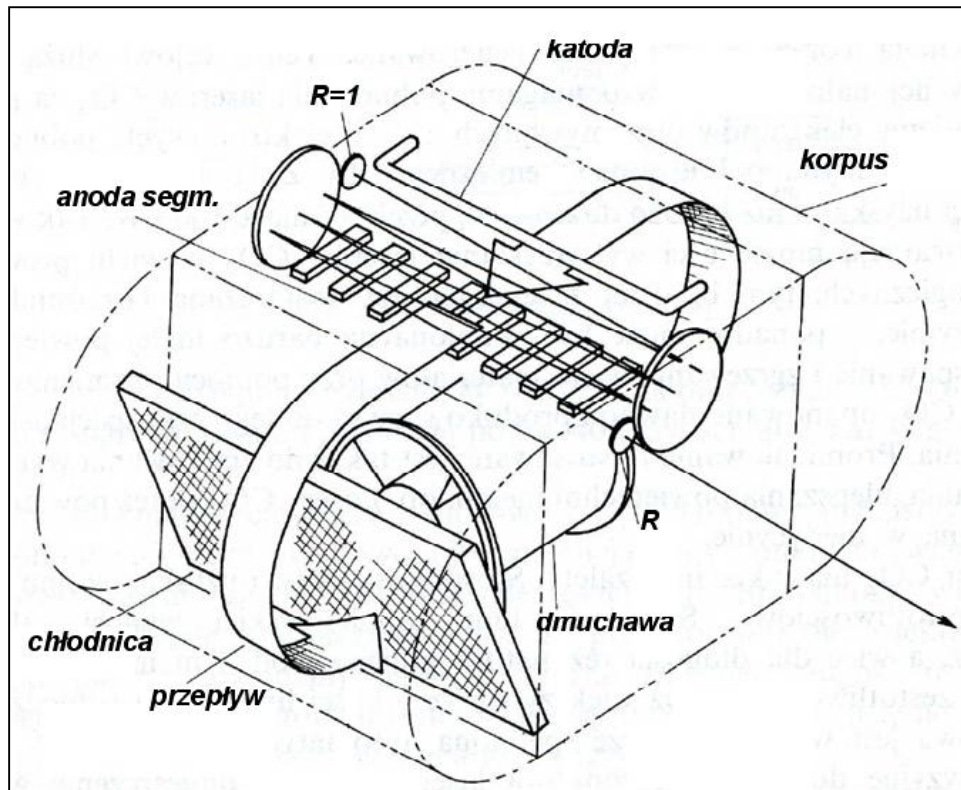
Możliwe jest podniesienie mocy i całkowitego ciśnienia gazów co prowadzi do podniesienia mocy wyjściowej lasera CO₂.

$$p \cdot d \approx (100 \div 150) [Pa \cdot m] \approx const$$

$$P_{wyj} \approx (0,5 \div 3) kW$$

B. Lasery z przepływem poprzecznym

Lasery z przepływem poprzecznym uniezależniają nas nagrzewania ośrodka.



Generowana **moc** zależy od **ilości przepływającego przez rezonator gazu** (oraz jego pobudzenia)

$$\frac{P_{wyj}}{G} \approx (90 \div 150) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

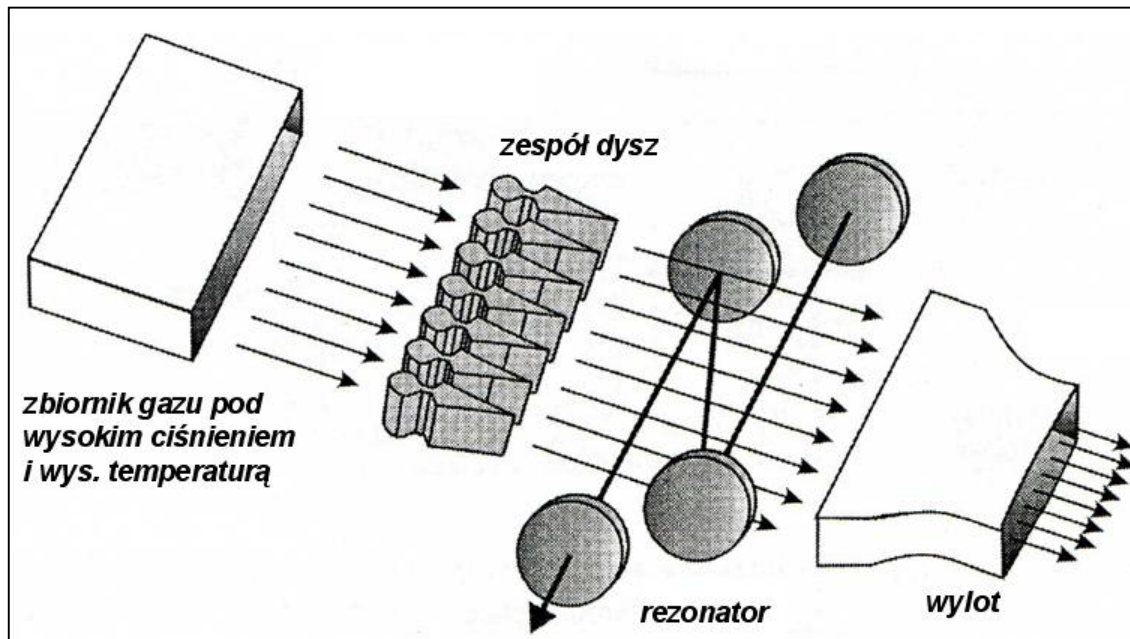
Moc rośnie wraz z prędkością przepływu gazu czynnego, gdy warunki zasilania na to pozwalają.

$$P_{wyj} \approx (3 \div 20) kW$$

Główne ograniczenie: jednorodne i wystarczające wzbudzenie mieszanki czynnej

Molekularny laser gazodynamiczny

Konstrukcja uniezależniająca moc wyjściową lasera od warunków zasilania.



Ośrodek: $\text{CO}_2 + \text{N}_2$
nie jest jonizowany.

Zbiornik gazu:

$T \sim 2000\text{K}$; $p \sim (10\div 50)\text{ atm.}$
Warunki obsadzenia górnych stanów laserowych N_2 i CO_2 .

Za dyszami: rozprężenie gazu do kilku torów i ochłodzenie do temp. otoczenia.

Stany metastabilne:

$\text{N}_2(v_1)$ i $\text{CO}_2(v_3)$ pozostaną obsadzone i w rezonatorze wystąpi generacja.

Laser przewidziany do celów specjalnych o mocy powyżej 100 kW

Ogólna charakterystyka i miejsce laserów CO₂

Uruchomienie lasera CO₂ – to możliwość przemysłowego stosowania laserów.

Powstały **przemysłowe centra cięcia** różnych materiałów i **spawania metali**.
Powszechnie stosowane są w przemyśle samochodowym i sprzętu medycznego.
Drugim polem zastosowań jest chirurgia, w tym organów wewnętrznych.

Długość fali lasera CO₂ – **10,6 μm** - można traktować jako jego podstawową wadę.

Promieniowanie nie jest transmitowane przez powszechnie stosowane szkła.
Inne ośrodki jak: sole (NaCl, KCl), german, krzem itp. są kłopotliwe w użyciu.
Specjalnie opracowane światłowody są kosztowne, stratne i mało trwałe.

Długość fali **10,6 μm** znajduje się w „**długofalowym oknie**” transmisji atmosfery i może być z niewielkimi stratami przesyłana na stosunkowo duże odległości.

Czyni to laser CO₂ ważnym ze względu na zastosowania strategiczne.

Lasery excymerowe

Ekscymer (Excimer $\equiv$ Excited dimer) – **molekuła istniejąca w stanie wzbudzonym**

Ciekawy materiał aktywny – obsadzenie wyższego stanu laserowego N_G
jest inwersją obsadzeń: $\Delta N = N_G$

Stan podstawowy molekuły nie istnieje – rozpada się ona na atomy w $\sim 10^{-13}$ s.

Ważniejsze ekscymery i długości generowanych przez nie fal

Ekscymer	ArF	KrCl	KrF	XeBr	XeCl	XeF	$N_2^{*)}$
λ [nm]	195	222	248	282	308	351	337

Cechy charakterystyczne:

- 1. Emisja w ultrafiolecie** (cecha rzadka i ważna; wymaga dużej energii kin. elektronów),
- 2. $\tau_G \sim (10^{-8} \div 10^{-9})$ - krótki czas życia** (gen. krótkimi nanosekundowymi impulsami),
- 3. Typowa budowa lasera: pobudzenie poprzeczne TEE** (ciśnienie atm. ośrodka).
- 4. Ze względu na długość fali lasery excymerowe są często spotykane w praktyce.**

$^{*)} N_2$ nie jest ekscymerem, ale budowa lasera na N_2 jest identyczna jak ekscymerowych.

Zmierzchy laserów gazowych

O rozwoju każdej techniki decydują jej możliwości aplikacyjne

Do zmierzchu i końca ery laserów gazowych jako branży przyczynił się **rozwój technologii ośrodków aktywnych laserów ciała stałego**, a przede wszystkim **rozwój technologii laserów półprzewodnikowych**.

I. **Najpierw lasery półprzewodnikowe wyeliminowały lasery He-Ne.**

Miniaturowe (mm) diody laserowe (DL) o podobnych mocach (~mW) zastąpiły znacznie większe (dcm) lasery He-Ne w popularnych zastosowaniach.

Były one tańsze, masowo produkowane i prosto zasilane: kilka V_{DC}.

Uwidocznily się inne wady laserów He-Ne: „zatrucie ośrodka czynnego” skracające ich czas pracy. Wszystko razem spowodowało, że pozostały one jedynie w nielicznych, specyficznych zastosowaniach np. interferometrach.

II. **Następnie DL – użyto do pompowania laserów ciała stałego**

Skutkowało to znacznym podwyższeniem ich sprawności (>10%) i pojawieniem się nowych geometrii w tym laserów włóknowych. Moce ciągłe (cw) jakie oferują lasery włóknowe są porównywalne z generowanymi przez lasery CO₂, co biorąc pod uwagę możliwość przesyłania jej światłowodem i znacznie mniejsze ich rozmiary powoduje, że eliminują one technologiczne lasery CO₂.

Dziękuję za przeczytanie