

# Nagrzewanie laserowe

Dr inż. Piotr Urbanek

Miara stopnia monochromatyczności

$$\mu = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}$$

Aby uzyskać uporządkowane oddziaływanie fotonów należy wytworzyć nietypowy stan materii charakteryzujący się tym, że np. na dwóch poziomach energetycznych  $E_1$  i  $E_2$  nastąpią zmiany w obsadzeniu elektronami w stosunku do stanu równowagi termicznej określonej zależnością:

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

$n$  - liczba elektronów,  $E$  - energia odpowiadająca danemu poziomowi energetycznemu,  $k$  - stała Boltzmana,  $h$  - stała Planca,  $T$  - temperatura równowagi termicznej układu,  $\nu$  - częstotliwość promieniowania

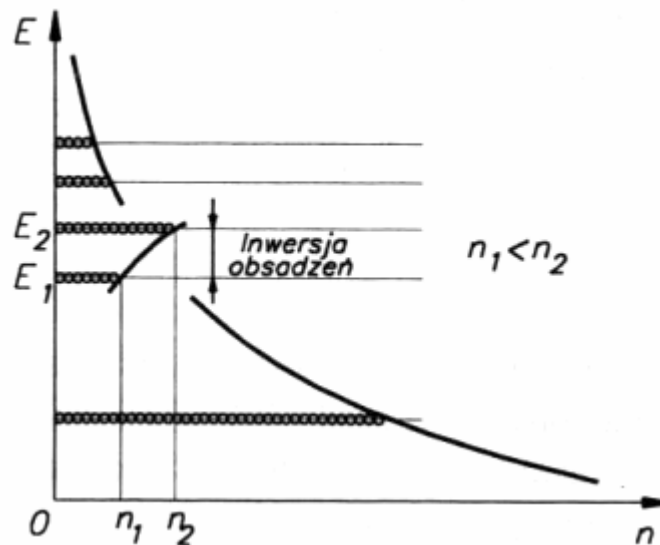
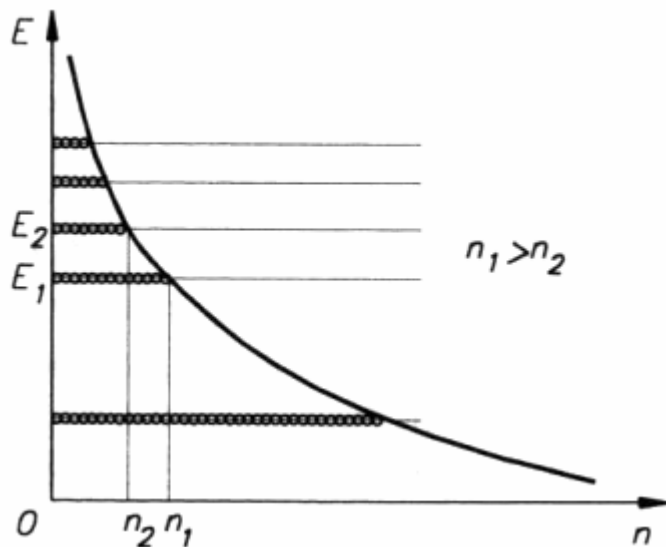
Każda zmiana stanu atomu może się oczywiście odbywać jedynie w postaci nieciągłego, skokowego przejścia elektronu z poziomu dla niego podstawowego do poziomu wzbudzonego (absorpcja kwantu energii) lub odwrotnie (emisja kwantu energii), czyli:

$$E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

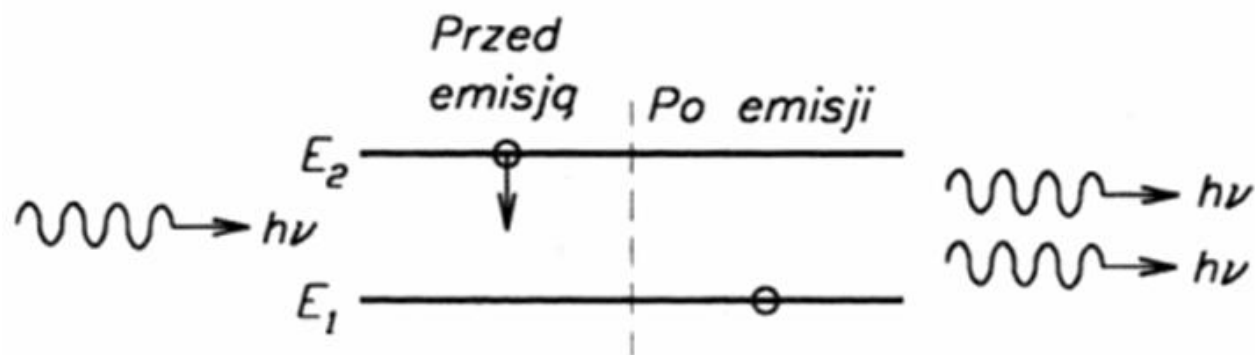
$h$  - stała Plancka,  $h\nu$  - energia kwantu promieniowania,  $c$  - prędkość światła,  
 $\lambda$  - długość fali promieniowania

## Obsadzenie poziomów energetycznych:

- rozkład normalny;
- rozkład z inwersją obsadzeń między poziomami energetycznymi  $E_1$  i  $E_2$



Aby wytworzyć inwersję obsadzeń i uzyskać emisję wymuszoną, ośrodek aktywny powinien mieć co najmniej trzy poziomy energetyczne. Przykładem takiego ośrodka jest kryształ syntetycznego rubinu, czyli  $\text{Al}_2\text{O}_3$  domieszkowany trójtlenkiem chromu w ilości 0,05 + 0,07 w stosunku wagowym. Odpowiada to średniej gęstości jonów chromu  $\text{Cr}^{3+}$  w kryształce o wartości równej ok.  $1,6 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$ . Rozproszone w  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jony chromu stanowią właściwe elementy aktywne układu kwantowego. Nazywa się je jonami aktywnymi lub aktywatorami

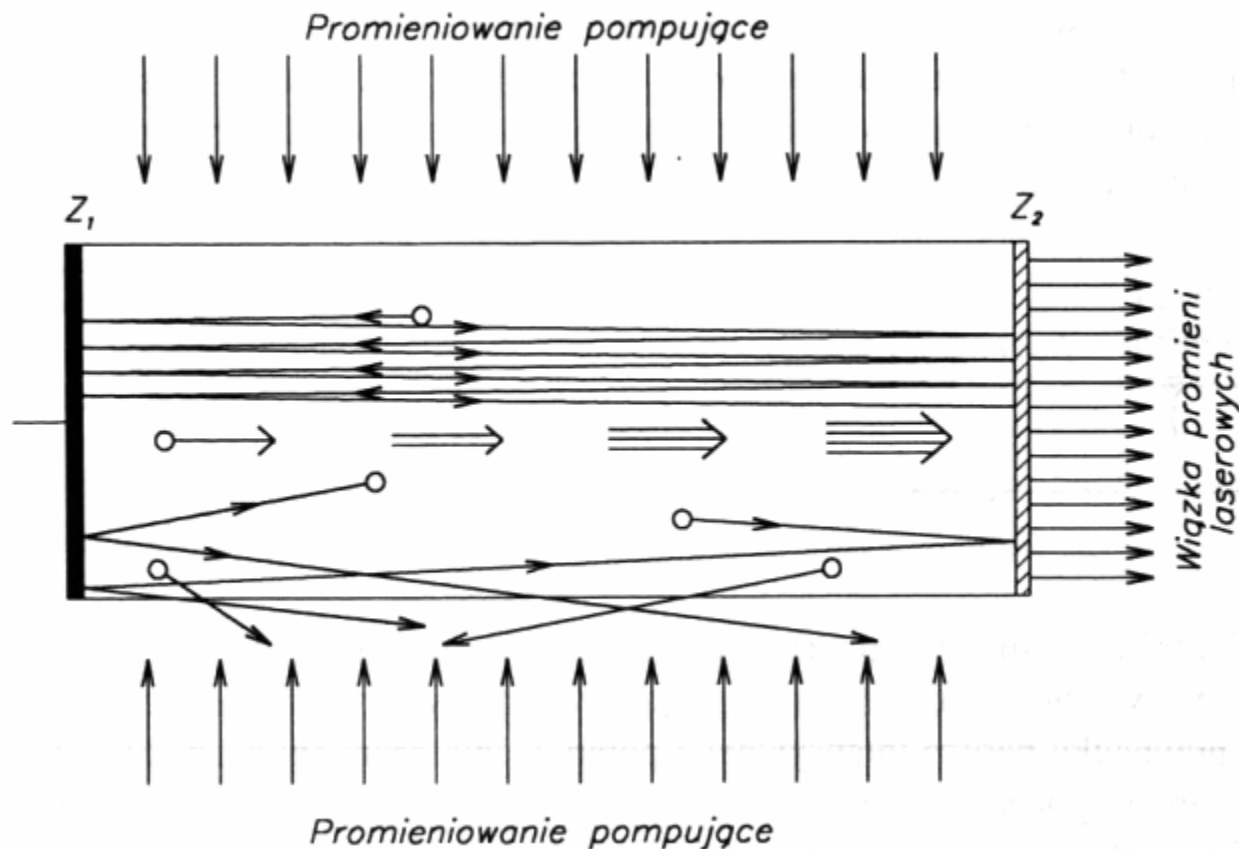


Pożądany nietypowy stan materii (inwersję obsadzeń) uzyskuje się dzięki temu, że:

- w niektórych ośrodkach materialnych istnieją układy atomów, których stan wzbudzenia może trwać np.  $10^{-3}$  s, a więc ok. 10<sup>5</sup> razy dłużej aniżeli stan wzbudzenia mikroukładu ośrodka wzbudzonego wskutek nagrzania;
- układy takie są intensywnie wzbudzane w tzw. procesie pompowania, czyli dostarczania do elementów aktywnych układu kwantowego energii, przy czym musi być przekroczony pewien minimalny poziom tego wzbudzenia (tzw. próg wzbudzenia) w warunkach dopasowania zakresu widmowego energii wzbudzającej do zakresu widmowego absorpcji ośrodka czynnego lasera.

# Schemat generacji wiązki promieniowania laserowego w rezonatorze Fabryego-Pérot

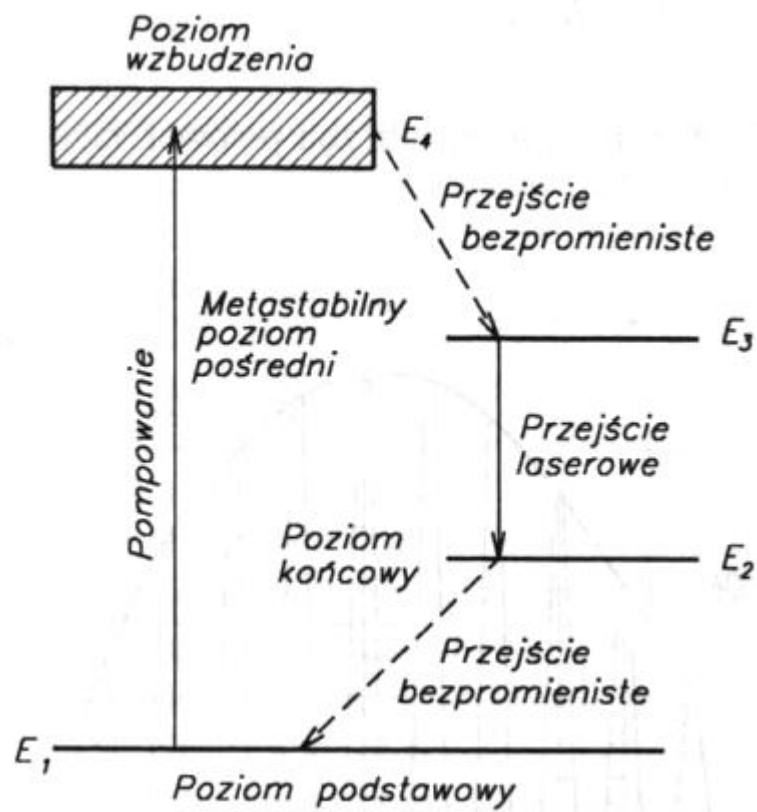
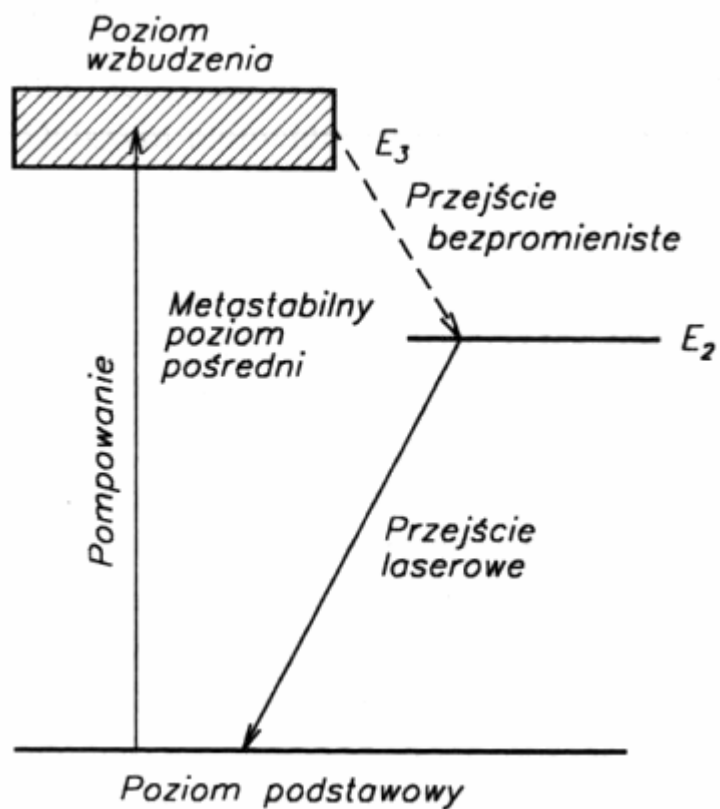
$Z_1$  - zwierciadło całkowicie odbijające,  $Z_2$  - zwierciadło częściowo przepuszczalne



# Schematy energetyczne układów pompowania:

a) trójpoziomowego

b) b) czteropoziomowego

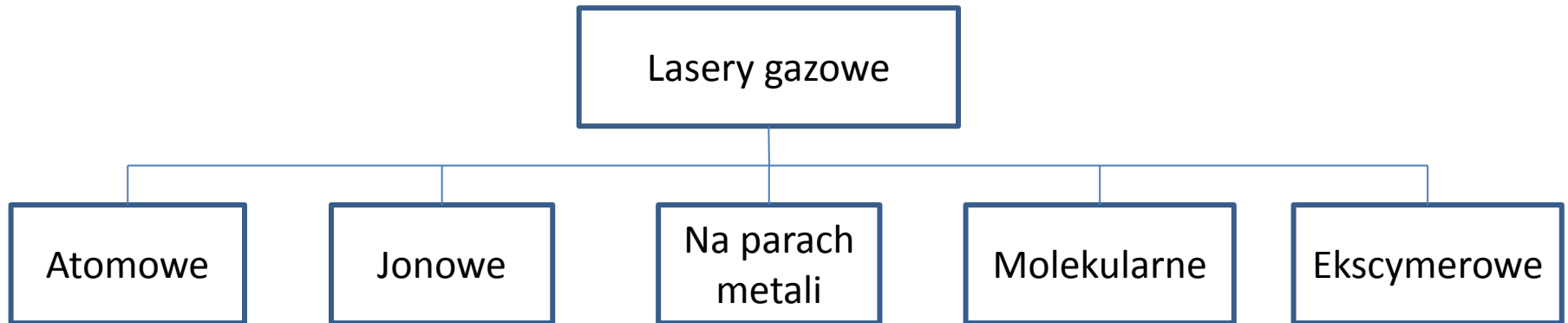




# Charakterystyka laserów technologicznych

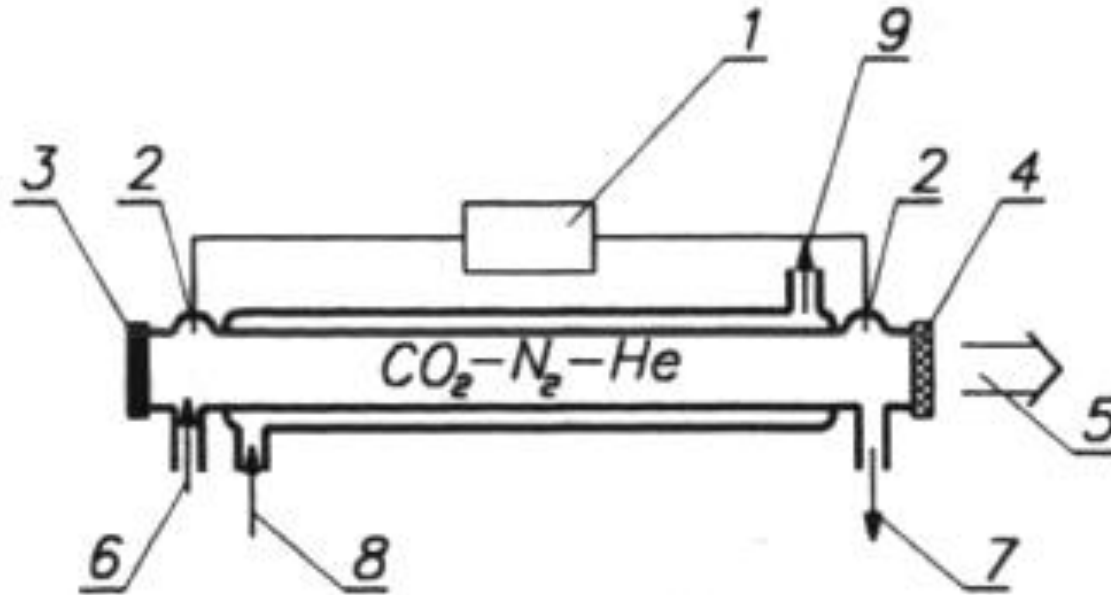
W termicznej obróbce materiałów oraz w termicznych aplikacjach medycznych aktualnie są stosowane tylko niektóre rodzaje laserów gazowych i stałych (na ciele stałym).

Lasery gazowe są generatorami i wzmacniaczami promieniowania, w których ośrodkiem aktywnym jest **gaz, mieszanina gazów** lub **mieszanina gazów i par metalu**.



## Schematy subatmosferycznych laserów gazowych CO<sub>2</sub>

Z wolnym osiowym przepływem gazu w układzie otwartym (chłodzenie dyfuzyjne) i pobudzeniem podłużnym



1 - zasilacz elektryczny, 2 - elektroda, 3 - odbijające zwierciadło rezonatora,  
4 - przepuszczalne zwierciadło rezonatora, 5 - wiązka laserowa, 6 i 7 - wlot i wylot gazu,  
8 i 9 - wlot i wylot wody chłodzącej rurą wyładowczą.

# Subatmosferyczne lasery molekularne CO<sub>2</sub>

Laser molekularny został wynaleziony w 1964 przez Kumara Patela w Laboratorium Bella.

Pracują z ośrodkami aktywnymi w postaci mieszaniny: 5 ÷ 10 % CO<sub>2</sub>, 15 ÷ 35 % N<sub>2</sub> i 60 ÷ 80 % He przy ciśnieniu 3000 ÷ 20 000 Pa.

Cząsteczki CO<sub>2</sub> oraz N<sub>2</sub> są wzbudzane przez rozpędzone na skutek wyładowania elektrycznego elektrony. Cząsteczki He mają za zadanie zwiększyć przewodność cieplną właściwą ułatwiając chłodzenie dyfuzyjne wnętrza ośrodka aktywnego.

Wzbudzone cząsteczki CO<sub>2</sub> w czasie emisji wymuszonej emitują promieniowanie podczerwone o długości fali 10,63 μm.

Ośrodek aktywny znajduje się w rurze wyładowczej, wykonanej ze szkła kwarcowego bądź z ceramiki korundowej lub berylowej.

Jest on pobudzany przez stałoprądowe wyładowanie jarzeniowe lub coraz częściej stosowane wyładowanie wielkiej częstotliwości. Temperatura ośrodka aktywnego nie powinna przy tym przekraczać 600 ÷ 700 K ponieważ maleje wtedy uzyskiwane wzmocnienie.

**Moc: 100 kW przy pracy ciągłej, 1x10<sup>10</sup> kW przy pracy impulsowej**

# Lasery neodymowe Nd:YAG

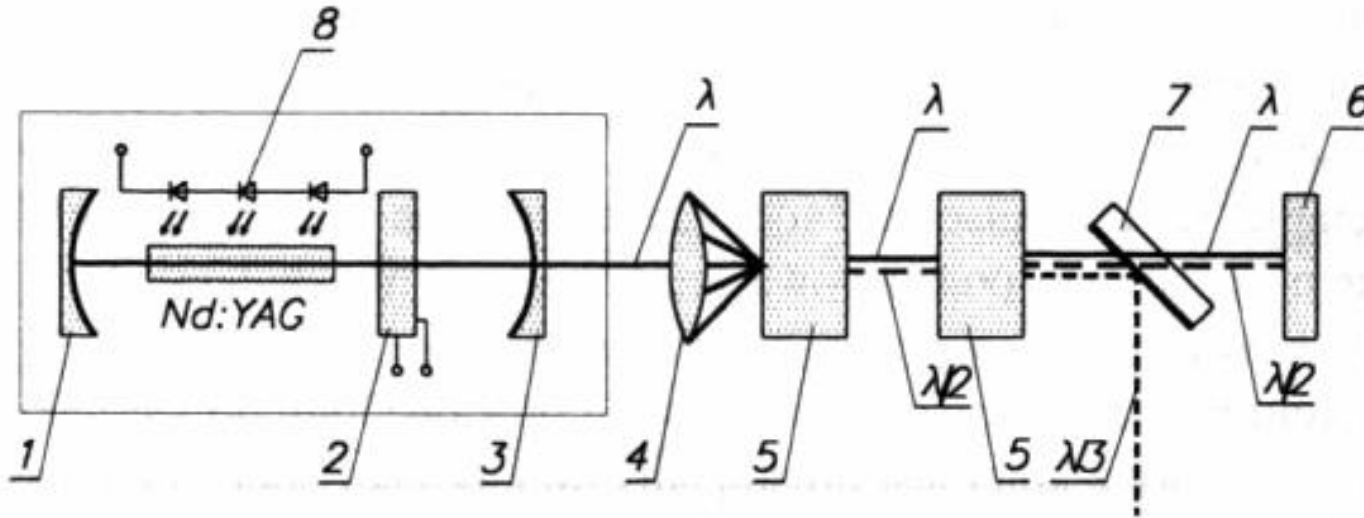
Posiadają ośrodki czynne w postaci prętów z granatu itrowo-aluminiowego  $Y_3Al_5O_{12}$ , aktywowanego trójwartościowymi wbudowanymi w sieć krystaliczną jonami neodymu  $Nd^{3+}$  o zawartości  $0,8 \div 1,5\%$  wag.  $Nd_2O_3$  i tworzącymi układ czteropoziomowy.

Emitują promieniowanie podczerwone o długości fali  $\lambda = 1,064 \mu m$ , a także promieniowanie o długości  $\lambda/2 = 0,532 \mu m$  oraz  $\lambda/3 = 0,3546 \mu m$ .

Do pompowania ośrodka aktywnego używa się ksenonowych lamp błyskowych (stosowanych przy pracy impulsowej), kryptonowych lamp łukowych (przy pracy ciągłej), a ostatnio coraz częściej - diod laserowych.

Przy pracy ciągłej jest wytwarzana wiązka wielomodowa o mocy wyjściowej do 2000 W. Dla pracy impulsowej wielomodowa moc średnia wynosi zwykle  $500 \div 2000$  W, a nawet 5000 W, Czas impulsów może być regulowany w zakresie  $0,1 \div 10$  ms przy częstotliwości ich powtarzania  $0,1$  Hz  $\div$  25 kHz.

# Lasery neodymowe Nd:YAG



. Schemat lasera Nd:YAG z modulacją dobroci, pompowanego diodami laserowymi i wyposażonego w układy przetwarzania częstotliwości.

1 - zwierciadło odbijające, 2 - modulator dobroci, 3 - zwierciadło przepuszczające, 4 - soczewka skupiająca, 5 - kryształ nieliniowy, 6 - absorber, 7 - zwierciadło, 5 - diodowy układ pompujący

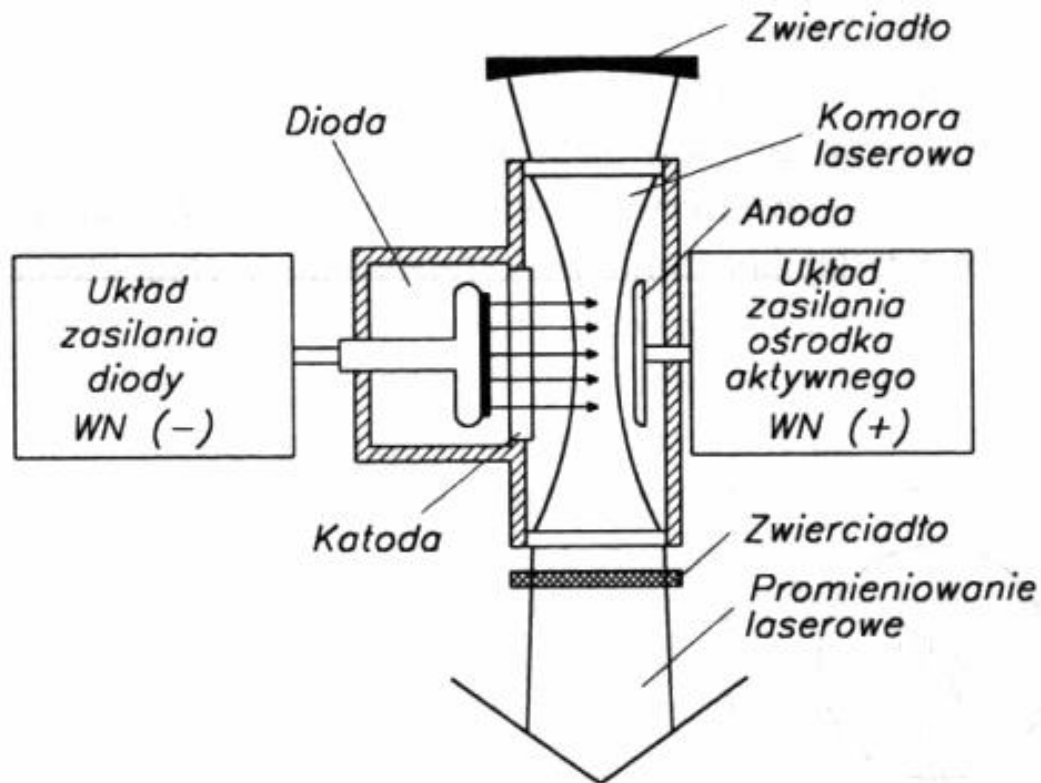
# Laser ekscymerowy pobudzany wyładowaniem stabilizowanym wiązką elektronów

Są to impulsowe lasery gazowe pracujące głównie w zakresie  $0,126 \div 0,540 \mu\text{m}$ , czyli w nadfiolecie i w zakresie widzialnym. Generowanie spójnego promieniowania następuje w wyniku przejść kwantowych molekuł nazywanych ekscymerowymi, które istnieją praktycznie tylko w stanie wzbudzonym. Mogą one powstać w wyniku procesów zderzeniowych (zderzeń wzbudzonych atomów, rekombinacji jonów itp.) zachodzących w ośrodku aktywnym pod wpływem jego pobudzania elektronami lub strumieniem fotonów.

W skład mieszanki gazowej wchodzi  $1 \div 10\%$  gazu szlachetnego, ok.  $0,2\%$  halogenku (ArF, KrCl, KrF, XeBr, XeCl, XeF, Kr<sub>2</sub>F, XeF(C—A), Xe<sub>2</sub>Cl) oraz He jako gaz buforowy.

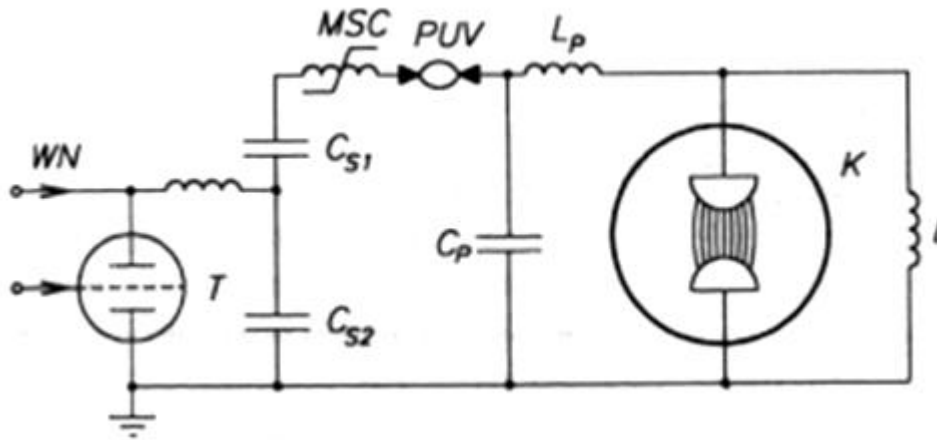
Molekuły ekscymerowe mają krótki czas trwania i z tego względu - w celu uzyskania niezbędnej ich koncentracji dla osiągnięcia progu generacji - konieczne jest stosowanie intensywnego pobudzania, zapewniającego gęstość mocy deponowanej w ośrodku rzędu  $10^4 \div 10^6 \text{ W/cm}^3$ . Najczęściej stosuje się pobudzanie wiązką elektronów oraz pobudzanie wyładowaniem elektronów, rzadziej pobudzanie optyczne, mikrofalami, a incydentalnie wiązką protonów. W przypadku pobudzania wyładowaniem elektrycznym stosuje się wyładowanie stabilizowane wiązką elektronów lub wyładowanie lawinowe.

# Laser ekscymerowy pobudzany wyładowaniem stabilizowanym wiązką elektronów



Schemat lasera ekscymerowego pobudzanego wyładowaniem elektrycznym stabilizowanym wiązką elektronów.

# Schemat elektryczny komercyjnego lasera pobudzanego wyładowaniem elektrycznym.



Schemat obwodów głównych lasera ekscymerowego pobudzanego wyładowaniem z prejonizacją ultrafioletem.

*WN* - wysokie napięcie, *PUV* - układ prejonizacji ultrafioletem, *K* - komora lasera, *T* - tyratron, *MSC* (Magnetic Switch Control) - indukcyjność zabezpieczająca tyratron przed uszkodzeniem, *L<sub>p</sub>* - indukcyjność dopasowująca, *L* - indukcyjność determinująca stałą czasową, *C<sub>s1</sub>* *C<sub>s2</sub>* - pojemności magazynujące, *C<sub>p</sub>* - pojemność wyostrzająca impuls napięciowy.



# Lasery ekscymerowe

Stosuje się w nich wstępną jonizację ośrodka ultrafioletem w celu wytworzenia w miarę jednorodnej koncentracji elektronów, umożliwiającej zapoczątkowanie wyładowania jarzeniowego. Prejonizacja UV pozwala na wytworzenie początkowej koncentracji rzędu  $10^6 \div 10^9$  elektronów w  $1 \text{ cm}^3$  ośrodka aktywnego. W tym celu najczęściej źródłem promieniowania ultrafioletowego jest wyładowanie iskrowe w ośrodku lub po powierzchni dielektryka.

Lasery ekscymerowe z pobudzaniem UV i z szybkim przepływem gazu mają średnią moc nawet do 1000 W, moc w impulsach zaś – kilka ÷ kilkadziesiąt megawatów. Pracują one najczęściej przy częstotliwości powtarzania impulsów  $0,5 \div 2000 \text{ Hz}$  oraz czasie ich trwania równym kilka ÷ kilkadziesiąt nanosekund. Ze względu na technologię najbardziej istotną cechą znamionującą ten typ lasera jest możliwość ogniskowania tego promieniowania na powierzchni o promieniu  $1 \div 10 \mu\text{m}$ , podczas gdy w przypadku lasera Nd:YAG jest to  $10 \div 100 \mu\text{m}$ , a  $\text{CO}_2$  -  $50 \div 500 \mu\text{m}$

# Oddziaływanie promieniowania laserowego na materię

W zastosowaniach przemysłowych korzysta się z promieniowania laserowego **podczerwonego, widzialnego i nadfioletowego.**

Wiązki laserowe można koncentrować na powierzchniach mniejszych od  $1\mu\text{m}$   
W przypadku wiązek multilaserowych promieniowanie laserowe może być doprowadzone do stosunkowo dużych powierzchni, przy gęstościach mocy rzędu  $10^{20}\text{ W/cm}^2$

Analizę oddziaływania promieniowania laserowego na materię dodatkowo komplikują bardzo złożone i na ogół nieregularne rozkłady przestrzenne mocy w wiązce i to zarówno w przypadku wiązki jednomodowej, jak i wiązek wielomodowych, zmiany profilu w czasie wiązki oraz nietermiczne efekty towarzyszące, które prowadzą często do zniszczenia wiązań chemicznych materiału warstwy wierzchniej oraz zmian w strukturze atomów i molekuł środowiska.

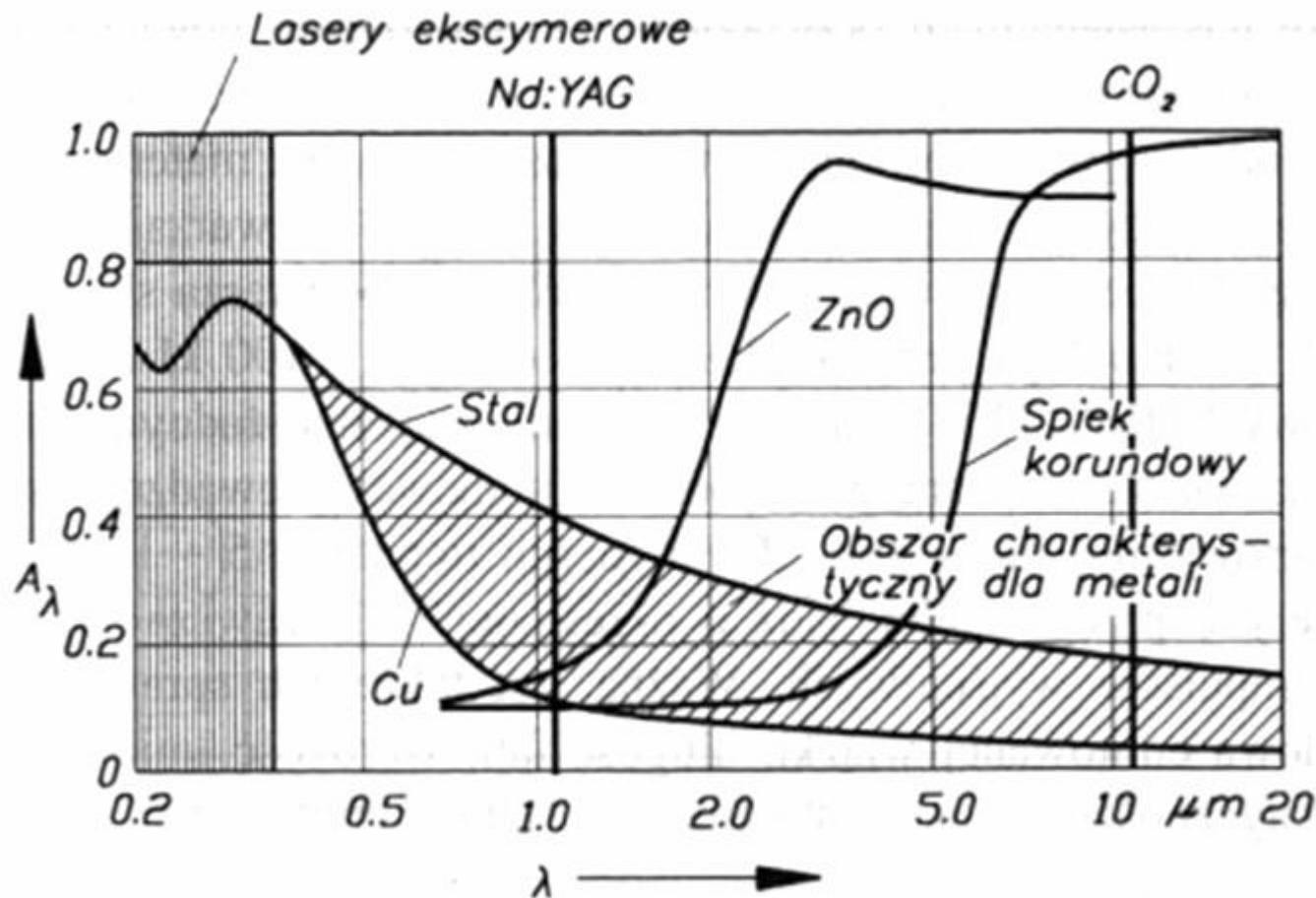
W procesie nagrzewania laserowego część padającego promieniowania zostaje pochłonięta w materiale i przez przewodzenie ciepłe odprowadzona w głąb, część zaś odbita. Na zjawiska te w znacznym stopniu wpływają właściwości promienne powierzchni, a w szczególności absorpcyjność monochromatyczna  $A_\lambda$ , która dla materiałów nieprzezroczystych jest związana z refleksyjnością monochromatyczną  $R_\lambda$  związkiem

$$A_\lambda = 1 - R_\lambda$$

## Rodzaje laserów technologicznych.

Rodzaj lasera	Rodzaj pracy	Długość fali	Moc maksymalna	Czas impulsu	Częstotliwość impulsów	Sprawność
		$\mu\text{m}$	W	s	Hz	%
CO <sub>2</sub>	ciągła z modulacją Q	10,63	10 <sup>4</sup>	–	–	5 + 10
		10,63	10 <sup>5</sup>	10 <sup>-6</sup>	1,0	–
Nd:YAG	impulsowa	1,06	10 <sup>6</sup>	10 <sup>-4</sup> + 10 <sup>-2</sup>	0,3	–
	ciągła	1,06	10 <sup>3</sup>	–	–	0,1 + 4,0
	z modulacją Q	1,06	10 <sup>9</sup>	10 <sup>-8</sup> + 10 <sup>-7</sup>	–	–
Ekscymerowy	impulsowa	0,19 + 0,35	10 <sup>7</sup>	10 <sup>-8</sup> + 10 <sup>-7</sup>	0,5	1 + 5

# Absorpcyjność monochromatyczna różnych materiałów podczas promieniowania emitowanego przez trzy rodzaje laserów używanych w procesach termicznych.



# Zastosowanie lasera

## **Poligrafia**

Computer-to-Film CtF czyli w naświetlarkach filmów poligraficznych

Computer-to-Plate CtP w naświetlarkach offsetowych form drukowych

Computer-to-Press CtPress czyli w naświetlarkach zintegrowanych z maszyną drukarską

Computer-to-Print CtPrint czyli w jednym z typów druku cyfrowego, tj. w technologii analogicznej do używanych w cyfrowych kserokopiarkach

## **Znakowanie produktów**

- usuwanie cienkiej warstwy farby z powierzchni przedmiotu;
- zmiana barwy - zachodzi ona dzięki stosowaniu różnych domieszek lub poprzez pokrywanie powierzchni przedmiotu specjalnymi rodzajami farb lub tlenków.

## **Laserowe cięcie metali**

- przez odparowanie;
- przez topnienie i wydmuchiwanie;
- przez wypalenie;
- poprzez generowanie pęknięć termicznych;
- poprzez zarysowanie;
- przez tzw. zimne cięcie.

# Zastosowanie lasera

Cięcie laserowe wykonuje się w obecności gazu ochronnego takiego jak: azot, tlen lub argon, którego zadaniem jest:

- wydmuchiwanie materiału stopionego podczas cięcia;
- zapobieżenie utlenianiu się powierzchni przecięcia;
- zapobieżenie spalaniu się łatwopalnych materiałów;
- przyspieszenie procesu cięcia i zwiększenie jego precyzji.

Proces cięcia laserowego zależy od absorpcji padającego promieniowania i przewodności cieplnej materiałów. Z kolei współczynnik absorpcji zależy od: rodzaju materiału, stanu jego powierzchni, długości fali promieniowania  $\lambda$  i temperatury  $T$ .

## Laserowe spawanie metali

Spawanie laserowe polega na łączeniu detali przez stopienie obszarów ich styku przy pomocy skoncentrowanej wiązki lasera. Duża gęstość mocy wiązki laserowej gwarantuje, że energia spawania jest na poziomie minimalnym potrzebnym do stopienia złącza. Strefy wpływu ciepła i stopienia są bardzo wąskie. Odształcenie materiału jest bardzo małe, a po procesie spawania nie trzeba wykonywać dodatkowej obróbki mechanicznej. Podczas spawania spoina musi być zabezpieczona przed utlenianiem i zanieczyszczeniami przy pomocy gazów ochronnych takich jak np.: Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He. Efektywność spawania zależy od absorpcji energii wiązki przez powierzchnię metali, która wynosi: 1 ÷ 5% dla laserów CO<sub>2</sub> i 2 ÷ 30% dla laserów stałych. Z tego powodu powierzchnie niektórych metali powinny być poczernione lub zmatowione.

## **Laserowe drążenie**

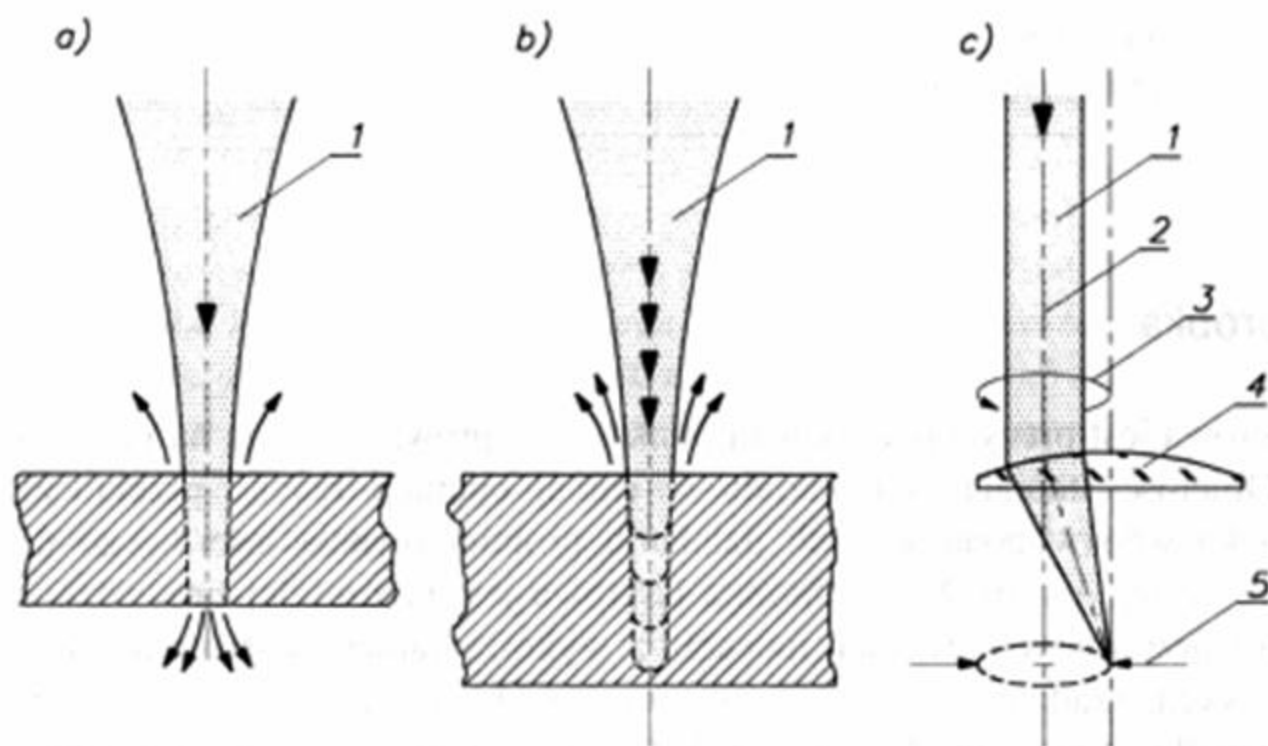
Za pomocą lasera można drążyć bardzo małe otwory w bardzo twardych materiałach np. w diamencie, a także w bardzo kruchych np. w ceramice. Otwory są wykonywane z dużą prędkością i mają powtarzalny kształt. Wiązka laserowa topi metal, tworzy się jezioro płynnego metalu, a strumień gazu częściowo spala i usuwa stopiony metal z obszaru oddziaływania wiązki laserowej. Materiał musi być usuwany na tę samą stronę, z której działa gaz.

## **Laserowa obróbka cieplna metali**

Wiązkę jest skupiana na małej powierzchni, dzięki czemu da się obrabiać cieplnie określone fragmenty powierzchni. Za pomocą wiązki laserowej można zastąpić klasyczne metody obróbki cieplnej lub stopować powierzchnie metali innymi pierwiastkami dzięki czemu następuje zmiana składu i właściwości warstwy wierzchniej. Do laserowej obróbki powierzchniowej metali zaliczyć można m.in.:

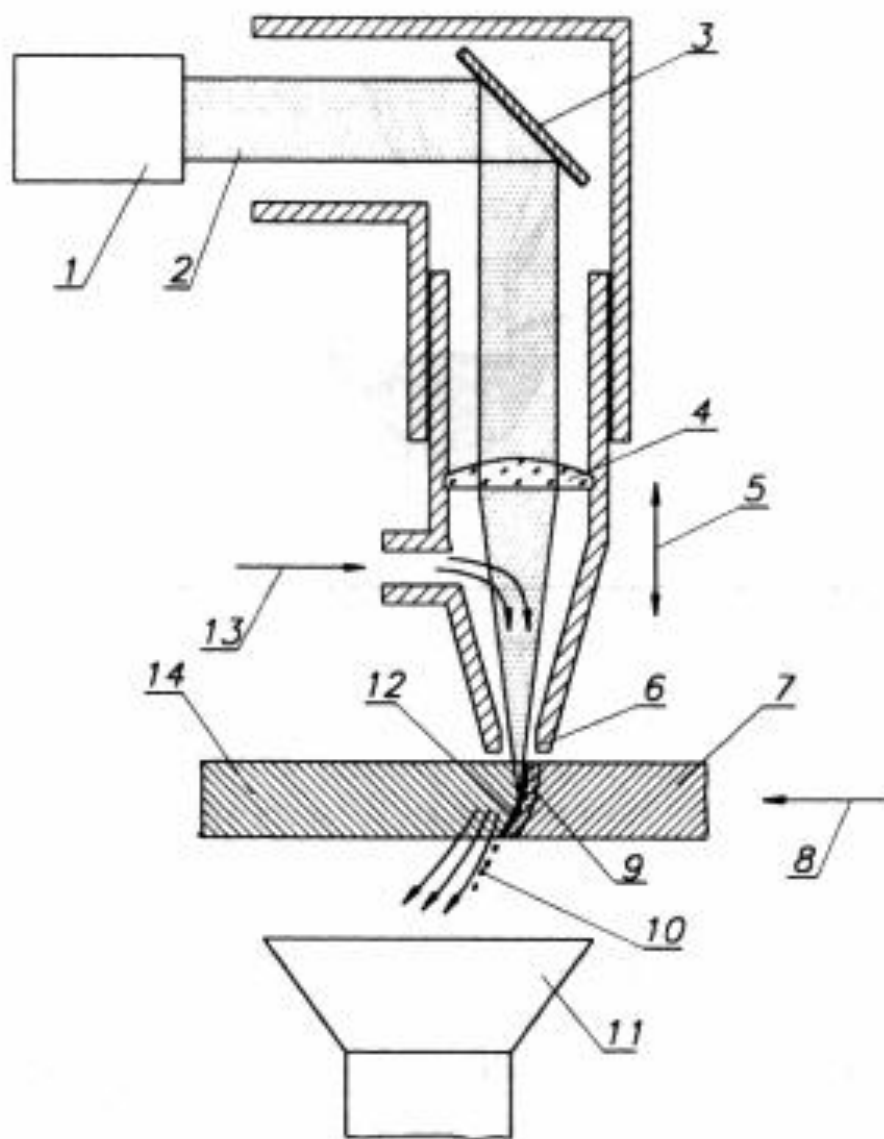
### Hartowanie:

- Bezprzetopieniowe - daje twardsze i cieńsze warstwy, o bardziej drobnoziarnistej strukturze, odporne na tarcie i korozję. Ponadto zwiększa się ich wytrzymałość statyczna i zmęczeniowa, udarność oraz ciągliwość.
- Przetopieniowe - jednoczesne topnienie i mieszanie materiału stopującego ze stopowanym (podłożem). Wiązka laserowa topi materiały, które ulegają wymieszaniu i powstaje wypływka na obrzeżu jeziora. Na granicy podłoża i stopu pojawia się cienka warstwa dyfuzyjna. Po ustaniu działania wiązki laserowej powstały stop krzepnie, a materiał podłoża w jego sąsiedztwie hartuje się samoistnie.



**Rys. 11.17.** Drażenie laserowe, wg [696]: a) perforacyjnej; b) perkusyjnej; c) trepanacyjnej  
 1 – wiązka laserowa, 2 – oś drążonego otworu, 3 – rotacja soczewki wokół osi otworu,  
 4 – soczewka, 5 – średnica drążonego otworu





## ☐ Stopowanie:

- Przetapianie - naniesienie na podłoże materiału stopującego i przetopienie go razem z warstwą wierzchnią materiału podłoża.
- Wtapienie - wprowadzenie w obszar działania wiązki laserowej i utworzenie jeziorka z przetopionego materiału podłoża stopującego w postaci proszku, pasty, gazu. Topnienie obydwu materiałów odbywa się jednocześnie.

## Technologia wojskowa

- Dalmierze laserowe, stosowane do oceny odległości od celu, wchodzą w skład systemów kierowania ogniem lub systemów rozpoznawczych czołgów i niektórych innych pojazdów bojowych, samolotów i śmigłowców, mogą być także przenośne.
- W systemach naprowadzających cel jest oświetlany wiązką laserową, promieniowanie odbite jest emitowane praktycznie we wszystkich kierunkach (z uwagi na rozpraszanie wiązki na powierzchni). Pocisk raketowy, artyleryjski lub bomba kierowana, wyposażony w czujnik laserowy, określa źródło odbitej wiązki, i za pomocą układów elektronicznych naprowadza się na podświetlony cel.
- Laserowy wskaźnik celu, w tym przypadku laser wskazuje cel, a operator broni (strzelec) samodzielnie naprowadza promień lasera na cel.
- Lasery niszczące obiekty wroga – najczęściej systemy optyczne, krótkotrwałe oślepienie żołnierzy.
- Łącza telefoniczne na krótkie odległości. Nadajnik i odbiornik muszą być w polu widzenia.

## **Technologia wojskowa, cd..**

Mierniki stosowane głównie w lotnictwie takie jak:

- wysokości (altimetry);
- składowych szybkości gazu (aneometry);
- przyspieszenia;
- szybkości lotu.

## **Medycyna**

Lasery są wykorzystywane w medycynie do takich celów jak:

- diagnostyka (lasery diagnostyczne);
- terapia schorzeń (lasery stymulacyjne i chirurgiczne);
- oświetlanie pola operacji.

Lasera używa się w medycynie przede wszystkim dla "twardej" obróbki tkanek:

- cięcia,
- koagulacji,
- odparowania (fotoablacji oraz ablacji stymulowanej plazmą)
- obróbki mechanicznej (rozrywania, fragmentacji czy kawitacji)