

Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Piotr Targowski i Bernard Ziętek

Pracownia Optoelektroniki  
Specjalność: Fizyka Medyczna

**IMPULSOWY LASER BARWNIKOWY**

Zadanie VIII

Zakład Optoelektroniki

Toruń 1999

## Cel zadania

Celem zadania jest zapoznanie studentów z:

- wzmocnieniem i wzmacniaczami fotonów, efektem wzmocnionej emisji spontanicznej,
- budową impulsowego lasera barwnikowego niestrojonego i strojonego,
- metodami strojenia laserów barwnikowych,
- budową i działaniem lasera azotowego,
- metodami pomiaru charakterystyk światła.

## Zasada działania lasera

Lasery mogą się różnić między sobą konstrukcją, parametrami emitowanej wiązki ale zasada działania jest zwykle taka sama (wyjątkiem są lasery na swobodnych elektronach).

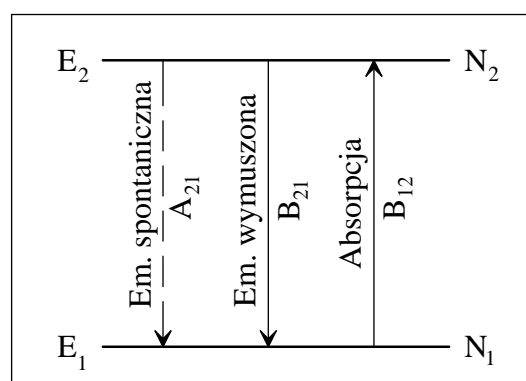
### Ośrodek aktywny.

Weźmy pod uwagę układ złożony z atomów (dla zwięzłości, mówiąc o atomach będziemy mieć na myśli również jony czy cząsteczki), który znajduje się pod działaniem pola elektromagnetycznego - pola promieniowania. Załóżmy, że atomy posiadają tylko dwa stany kwantowe (o energiach  $E_2$  i  $E_1$ ,  $E_2 > E_1$ ) między którymi mogą zachodzić przejścia promieniste.

Jeśli energia fotonu  $h\nu = E_2 - E_1$ , wówczas część atomów może przejść ze stanu o energii  $E_1$  do stanu wzbudzonego  $E_2$  - zachodzi proces absorpcji. Niech  $n_2$  oznacza liczbę atomów na jednostkę objętości w stanie  $E_2$ , a  $n_1$  w stanie  $E_1$ , to dla układu dwupoziomowego  $n_1 + n_2 = n$ . Ilość atomów, które znajdują się w stanie wzbudzonym będzie zależała od  $n$ , od prawdopodobieństwa absorpcji i od gęstości energii pola.

Pod nieobecność pola promieniowania (albo jeżeli to pole jest słabe) atomy w stanie wzbudzonym pozostają średnio przez pewien czas zwany *czasem życia* danego stanu. Proces przechodzenia do stanu podstawowego z emisją fotonu nazywa się *emisją spontaniczną*. Ponieważ emisja spontaniczna jest procesem przypadkowym, więc emitowane fotony będą miały przypadkowe fazy i polaryzacje. Również energie emitowanych fotonów będą się trochę między sobą różniły (w zakresie szerokości linii widmowej). Ilość atomów przechodzących do stanu niższego jest zależna od prawdopodobieństwa emisji spontanicznej i od ilości atomów w stanie wyższym.

Jeżeli pole promieniowania o częstotliwości  $\nu = (E_2 - E_1)/h$  jest dostatecznie silne znaczenia nabiera proces *emisji wymuszonej*. Wówczas atom w akcie emisji wymuszonej wyemituje foton o dokładnie takiej samej energii jak foton wymuszający, takiej samej fazie, polaryzacji i kierunku rozchodzenia się.



Rys. 1. Schemat energetyczny układu dwupoziomowego.

Ilość atomów przechodzących do stanu niższego wskutek emisji wymuszonej zależy od ilości atomów w stanie wyższym, prawdopodobieństwa emisji wymuszonej i gęstości fotonów wymuszających.

Zmianę w czasie obsadzenia (populacji) stanu niższego można zatem opisać równaniem:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = A_{21}(\nu)n_2(t) + [n_2(t)B_{21}(\nu) - n_1(t)B_{12}(\nu)]\rho(\nu) \quad (1)$$

gdzie:  $B_{12}(\nu)\rho(\nu)$  i  $B_{21}(\nu)\rho(\nu)$  są odpowiednio prawdopodobieństwami absorpcji i emisji wymuszonej liczonymi na jednostkę czasu,  $A_{21}(\nu)$  jest prawdopodobieństwem emisji spontanicznej.  $A$  i  $B$  nazywamy *współczynnikami Einsteina*,  $r(n)$  jest gęstością promieniowania. Współczynniki Einsteina na emisję wymuszoną i absorpcję związane są zależnością:

$$g_1 B_{12}(\nu) = g_2 B_{21}(\nu) \quad (2)$$

gdzie  $g_1$  i  $g_2$  są stopniami degeneracji poziomów. Często  $g_1 = g_2$  i wówczas  $B_{12}(\nu) = B_{21}(\nu)$ . Używa się też pojęcia *przekrojów czynnych* (o wymiarze  $\text{cm}^2$ ) na odpowiednie procesy:

a) przekrój czynny na absorpcję:

$$\sigma_{12}(\nu) = \frac{h\nu}{c} B_{12} g(\nu, \nu_0), \quad (3)$$

b) przekrój czynny na emisję wymuszoną:

$$\sigma_{21} = \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} A_{21} g(\nu, \nu_0), \quad (4)$$

gdzie  $g(n, n_0)$  jest unormowaną do jedności funkcją kształtu linii,  $n$  jest częstością przejścia, a  $n_0$  jest częstością środkową linii.

### ***Inwersja obsadzeń i wzmocnienie***

Ze wzoru (1) wynika, że jeżeli gęstość promieniowania będzie mała, wtedy główną rolę odgrywa emisja spontaniczna. Przy dużych gęstościach energii i dużym obsadzeniu stanu wzbudzonego procesy wymuszone są znacznie ważniejsze niż procesy spontaniczne, które nie zależą od gęstości fotonów. Jeżeli:

$$B_{21}(n_2 - \frac{g_2}{g_1}n_1) < 0, \quad (5)$$

to emisja wymuszona jest mniejsza niż absorpcja. Jeśli na układ o takich własnościach pada światło, to jest ono absorbowane. Dopiero, gdy wyrażenie w nawiasie **jest większe od zera** (nazywane jest ono wówczas *inwersją obsadzeń*) następuje wzmocnienie promieniowania. Przy dużej inwersji obsadzeń i dużych gęstościach pola emisję spontaniczną można pominąć w bilansie gęstości fotonów.

Równanie (1) opisuje zmianę w czasie obsadzenia stanu podstawowego, czyli wzrost albo zmniejszenie ilości atomów w tym stanie. Zaniedbując przejścia bezpromieniste, każda

zmiana obsadzenia wiąże się z emisją, bądź absorpcją fotonu, czyli zmianą gęstości fotonów, a zatem:

$$\frac{d\rho}{dt} = h\nu \frac{dn_1}{dt} . \quad (6)$$

Założmy, że układ oddziałuje z promieniowaniem o niewielkiej gęstości, tzn. takim, że zachodzą przejścia wymuszone, ale nie zmieniają one istotnie obsadzeń stanów. Wtedy inwersja obsadzeń nie zależy od natężenia promieniowania (natomiast przy dużych natężeniach obserwuje się efekty nasyceniowe). Przy tych założeniach zmiana obsadzenia stanu  $n_1$  opisana jest wzorem:

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{1}{h\nu} \frac{d\rho(\nu)}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{d\rho(\nu)}{dz} \frac{c}{h\nu} . \quad (7)$$

Zaniedbując emisję spontaniczną otrzymuje się:

$$\frac{d\rho(\nu)}{dz} = \frac{h\nu}{c} B_{21} \Delta N \rho(\nu) , \quad (8)$$

gdzie  $\Delta N$  jest inwersją obsadzeń. Ponieważ natężenie światła  $I(\nu) = c \cdot \rho(\nu)$ , wzór ten można zapisać w innej formie:

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = \gamma(\nu) I(\nu) . \quad (9)$$

Wielkość:

$$\gamma(\nu) = \frac{h\nu}{c} B_{21} \Delta N \quad (10)$$

nosi nazwę *współczynnika wzmocnienia*. Mamy też:  $\alpha(\nu) = -\gamma(\nu)$ , gdzie  $\alpha$  nazywa się *współczynnikiem absorpcji* (patrz Zad. I)

Jeżeli na ośrodek z inwersją obsadzeń pada wiązka światła o energii fotonów odpowiadającej energii przejścia między poziomami, wtedy nastąpi wzmocnienie promieniowania. Oznacza to, że ilość aktów emisji wymuszonej przewyższa ilość aktów absorpcji i  $\gamma(\nu) > 0$ . Zatem na wyjściu z ośrodka zaobserwuje się promieniowanie o większym natężeniu niż na wejściu i będzie ono rosło eksponencjalnie z drogą przebytą w ośrodku wzmacniającym - uzyskamy *wzmacniacz fotonów*.

Przy bardzo dużych natężeniach zaczynają odgrywać rolę procesy nasyceniowe, które redukują wielkość współczynnika wzmocnienia zgodnie ze wzorem:

$$\gamma(\nu, I) = \frac{\gamma_0(\nu)}{1 + I/I_s} \quad (11)$$

gdzie  $I_s$  jest charakterystycznym natężeniem nasycenia.

Dodatnie sprzężenie zwrotne może zamienić wzmacniacz w generator fotonów (LASER) .

***Rezonator i oscylacje laserowe.***

Elementem, który ma gwarantować istnienie dodatniego sprzężenia zwrotnego jest rezonator. W najprostszej wersji składa się on z dwóch równoległych zwierciadeł. Jedno jest całkowicie odbijające, a drugie ma mniejszy współczynnik odbicia (w zależności od rodzaju lasera - od 99% do kilku procent). Promieniowanie, które znajdzie się wewnątrz rezonatora i będzie rozchodziło się wzdłuż jego osi, będzie ulegało kolejnym odbiciom od zwierciadeł poruszając się w jedną i drugą stronę. Promieniowanie, którego długość fali spełnia warunek (12) utworzy stabilną konfigurację pola elektromagnetycznego (mod). Zatem, wewnątrz mogą istnieć tylko fale o długości:

$$\lambda_m = \frac{2L}{m}, \quad (12)$$

gdzie  $m$  jest liczbą całkowitą. Łatwo obliczyć, że różnica częstotliwości pomiędzy dozwolonymi modami wynosi:

$$\Delta\nu = \nu_m - \nu_{m-1} = \frac{c}{2L} \quad (13)$$

Fale stojące w rezonatorach noszą nazwę *modów podłużnych*. Dla każdego modu podłużnego mogą jeszcze występować różne konfiguracje pola elektromagnetycznego i one stanowią *mody poprzeczne*.

Wyobraźmy sobie, że mamy ośrodek (układ atomowy) umieszczony wewnątrz rezonatora. W chwili  $t=0$  zostaje wytworzona inwersja obsadzeń - ośrodek zostaje wzbudzony. Atomy zaczynają izotropowo emitować fotony emisji spontanicznej. Część fotonów porusza się jednakże wzdłuż osi rezonatora i przechodząc przez ośrodek wymusza przejścia ulegając wzmocnieniu. Następnie ta wzmocniona wiązka pada na zwierciadło i wraca do ośrodka ulegając dalszemu wzmocnieniu. Obliczenia pokazały, że na wytworzenie stabilnej konfiguracji pola elektromagnetycznego wymagane jest (w zależności od rezonatora) kilkadziesiąt przejść rezonatora. Część energii wychodzi na zewnątrz przez lustro częściowo przepuszczalne, torząc wiązkę lasera.

Te procesy będą zachodziły tak długo, jak długo będzie istnieć inwersja obsadzeń i jak długo wzmocnienie przewyższa straty związane np. z emisją promieniowania z jednego lustra, z dyfrakcją, z absorpcją, rozpraszaniem, itd.

Na to by wystąpiła akcja laserowa musi być spełniony *warunek progowy* tzn. wzmocnienie musi być co najmniej równe stratom.

Nazwa LASER jest akronimem nazwy **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation.

### ***Pompowanie lasera***

Proces prowadzący do uzyskania inwersji obsadzeń nazywa się ogólnie *pompowaniem układu*. Pierwszy laser pompowany był lampą błyskową, której intensywne światło wzbudzało ośrodek tak, że inwersja została osiągnięta. Ten sposób jest używany do tej pory, zwłaszcza w laserach wielkiej mocy. W laserach gazowych zwykle stosuje się wyładowanie elektryczne. Elektrony prądu płynącego przez gaz umieszczony w rurze zderzając się z atomami wzbudzają je dzięki różnym procesom.

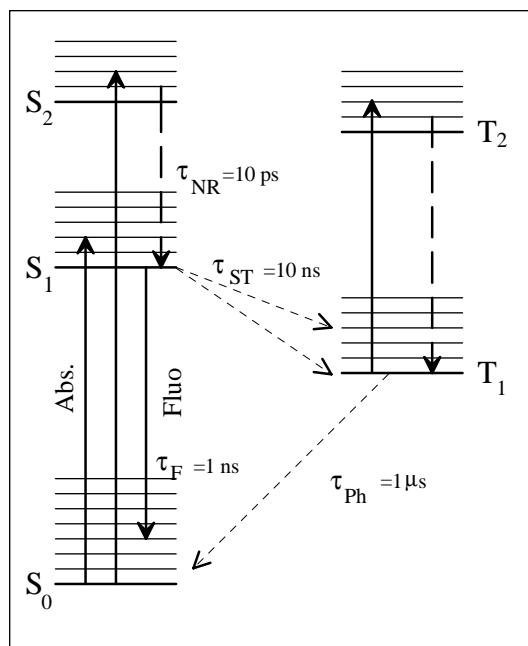
Wymieńmy jeszcze kilka innych sposobów pompowania: wzbudzanie innym laserem, za pomocą reakcji chemicznych, wiązkami elektronów czy nawet wybuchami atomowymi jak w przypadku laserów przeznaczonych do "wojen gwiazdnych".

Zadaniem pompowania jest zawsze to samo: wzbudzić ośrodek aktywny szybko, by procesy spontaniczne nie zdążyły zmniejszyć inwersji obsadzeń oraz silnie, by uzyskać tak dużą inwersję, aby wzmożenie przewyższyło straty.

### Laser barwnikowy.

#### 1. Ośrodek aktywny.

Ośrodkiem czynnym lasera barwnikowego jest roztwór barwnika organicznego (w naszym przypadku jest to rodamina 6G - barwnik ksantenowy). Jeżeli barwnik wzbudzi się promieniowaniem o pewnej długości fali, wówczas wysyła on promieniowanie o większej długości, zwane *fluorescencją*. Cechuje się ono tym, iż ustaje natychmiast (dokładniej po czasie rzędu ns) po zaprzestaniu oświetlania barwnika.



Rys. 2. Schemat poziomów Jabłońskiego cząsteczki barwnika.

Różnica energii fotonów absorpcji i fluorescencji zostaje zużyta na przejścia bezpromieniste. Drobiną barwnika posiada dwa rodzaje poziomów elektronowych: singletowe ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ) i trypletowe ( $T_1$ ,  $T_2$ ), dla których całkowity spin elektronów drobinny wynosi odpowiednio 0 i 1. Każdy z tych poziomów składa się z pewnej liczby podpoziomów oscylacyjno-rotacyjnych. Z reguły wyboru wynika, że optyczne przejścia kwantowe singlet - tryplet i tryplet-singlet są wzbronione, zatem prawdopodobieństwo ich zajścia jest małe.

Wskutek absorpcji fotonów drobinny przechodzą ze stanu podstawowego  $S_0$  do stanów wzbudzonych  $S_1$  lub  $S_2$ . Procesy wewnątrzdrobinowe powodują szybkie bezpromieniste przejścia drobinny na niższe poziomy stan  $S_1$ . Promieniowanie fluorescencji odpowiada przejściom pomiędzy dolnymi poziomami stanu  $S_1$  a poziomami oscylacyjno-rotacyjnymi stanu  $S_0$ . Ponieważ stany te składają się z wielu podpoziomów, zatem widmo fluorescencji składa się z dużej liczby linii, które zlewając się dają widmo ciągłe.

W roztworach barwników przejście laserowe jest przejściem między dwoma elektronowymi stanami singletowymi. Stany trypletowe  $T_1$  i  $T_2$  nie biorą bezpośredniego udziału w generacji promieniowania laserowego, wpływają jednak na nią silnie w sposób pośredni.

Istnieje prawdopodobieństwo przejścia ze stanu  $S_1$  do stanu  $T_1$  (*przejście międzysystemowe*). Ponieważ przejście z  $T_1$  do  $S_0$  (w pewnych warunkach może to być przejście promieniste - *fosforescencja*) jest również wzbronione, drobiny będą gromadzić się w stanie  $T_1$ . Przejścia między stanami trypletowymi są dozwolone a pasmo częstości przejścia pokrywa się z pasmem częstości roboczych lasera. Zatem, gdy w wyniku przejść międzysystemowych znaczna liczba drobin znajdzie się w stanie  $T_1$ , absorpcja tryplet - tryplet zmniejsza współczynnik wzmocnienia układu, co może doprowadzić nawet do uniemożliwienia generacji lub zerwania akcji laserowej.

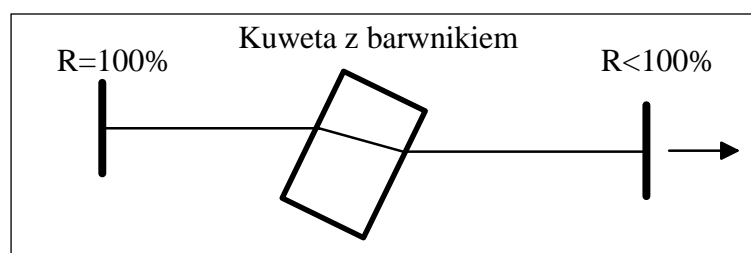
Stosowanie różnych barwników, jako laserowych ośrodków czynnych, pozwoliło na płynną zmianę długości fali generowanego promieniowania w całym zakresie widma optycznego. Koncentracja drobin barwnika w różnych rozpuszczalnikach ma zwykle wartość od  $10^{-3}$  do  $10^{-5}$  M. Szczególnie ważnym barwnikiem jest rodamina 6G, stosowana w wielu układach laserów barwnikowych emitujących w zakresie 540 - 650 nm. Alkoholowy roztwór tego barwnika posiada dużą wydajność kwantową i szeroki zakres widmowy przestrajania.

## 2. Rezonator i pompa.

Wszystkie lasery barwnikowe pompowane są lampami błyskowymi lub innymi laserami. Źródło pompujące dobiera się tak, aby promieniowało ono w obszarze bliskim maksimum pasma absorpcji barwnika. Dość rozpowszechnionym i najprostszym sposobem pompowania barwników jest użycie lamp błyskowych. Korzystne jest stosowanie lamp koaksjalnych, które charakteryzują się krótkim błyskiem światła (rzędu kilkuset ns), o małym czasie narastania (rzędu kilkudziesięciu ns) i dużą efektywnością pompowania. Stosując do pompowania barwnika lampy halogenowe o działaniu ciągłym, można otrzymać ciągłą generację o mocy rzędu nawet kilku W (są to rozwiązania laboratoryjne). Drugim sposobem pompowania laserów barwnikowych jest użycie lasera pracującego w sposób ciągły (argonowego, ekscymerowego) lub też impulsowy (azotowego).

## 3. Budowa lasera.

Klasyczny laser złożony z kuwety z roztworem barwnika i dwu szerokopasmowych zwierciadeł (Rys. 3) emituje promieniowanie w szerokim zakresie spektralnym (typowo ok. 50nm).



Rys. 3. Laser barwnikowy o swobodnej generacji.

Rolę zwierciadeł mogą też pełnić równoległe ścianki kuwety (współczynnik odbicia ok. 4%) z uwagi na zwykle bardzo duże wzmocnienie roztworu. Jeżeli jednak pożądane jest zastosowanie zewnętrznego rezonatora, to należy unikać prostopadłego ustawienia kuwety względem wzbudzającego promieniowania. Najlepiej wówczas umieścić kwertę pod kątem Brewstera - dla zminimalizowania strat na odbicia od jej ścianek.

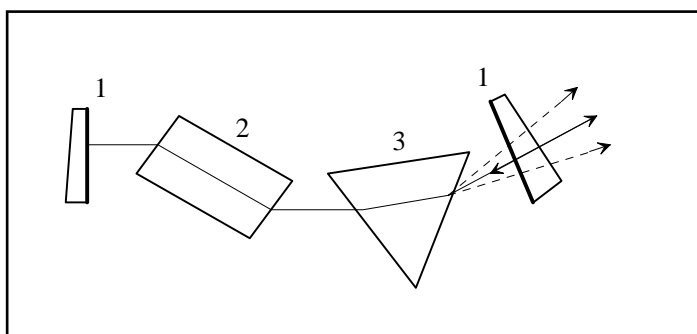
Szerokie pasmo generacji, po wprowadzeniu do rezonatora selektywnych strat, pozwala na uzyskanie akcji laserowej na wybranej długości fali. Jest to najważniejsza laserów barwnikowych.

#### 4. Strojenie laserów barwnikowych

Straty zależne od długości fali można uzyskać na wiele sposobów:

##### a. element dyspersyjny w rezonatorze lasera (pryzmat)

Najskuteczniejszą metodą zmiany długości fali jest wprowadzenie elementów dyspersyjnych do rezonatora lasera działających w ten sposób, iż dobroć rezonatora jest duża tylko dla promieniowania o ściśle określonej długości fali. Elementem dyspersyjnym może więc być pryzmat.

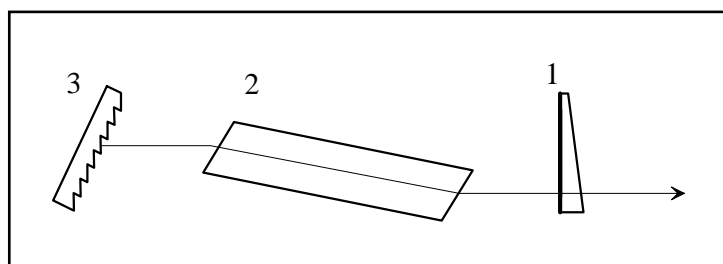


Rys. 4. Laser z pryzmatem we wnętrzu rezonansowej. 1 - zwierciadła, 2 - ośrodek aktywny, 3 - pryzmat.

Tylko promieniowanie, które po przejściu przez pryzmat pada prostopadłe na zwierciadło odbijające wraca do rezonatora. W ten sposób dodatkowo sprzężenie zwrotne zależy od długości fali. Generowaną długość fali można zmieniać przez obrót pryzmatu wokół osi równoległej do jego krawędzi łamiącej. Dla zwiększenia dyspersji wykorzystuje się czasem układ z kilku pryzmatów umieszczonych, tak że promieniowanie pada na nie pod kątem Brewstera, co zmniejsza straty spowodowane wprowadzeniem do rezonatora dodatkowych elementów optycznych.

##### b. Siatka dyfrakcyjna

Najstarszą, ale ciągle stosowaną metodą strojenia laserów jest użycie siatki dyfrakcyjnej (Rys. 5).



Rys. 5. Strojenie laserów za pomocą siatki dyfrakcyjnej. 1 - zwierciadła,



2 - ośrodek aktywny, 3 - siatka dyfrakcyjna.

W celu zwiększenia zdolności rozdzielczej układu łączy się siatkę dyfrakcyjną z teleskopem (Rys.13). Konfiguracja lasera stosowana w zadaniu, zawiera siatkę dyfrakcyjną i układ teleskopowy. W pierwszym przybliżeniu szerokość linii jest określona przez dyspersję siatki i rozbieżność wiązki wynosi:

$$\Delta\lambda = \Delta\Theta \left( \frac{\partial\Theta}{\partial\lambda} \right)^{-1} = 2.44 \frac{\lambda d \cos(\alpha)}{mD} \quad (14)$$

gdzie  $\Delta\Theta$  jest rozbieżnością kątową wiązki w rezonatorze,  $d$  - stałą siatki,  $\alpha$  - kątem dyfrakcji,  $D$  - średnicą wiązki. Tak więc użycie teleskopu zmniejsza szerokość linii, bo dyspersja siatki dyfrakcyjnej jest proporcjonalna do całkowitej liczby rys siatki w obrębie wiązki laserowej.

W rezonatorze lasera barwnikowego umieszcza się też inne elementy dyspersyjne np. wąskopasmowy filtr interferencyjny łącznie z siatką dyfrakcyjną. Uzupełnienie układu interferometrem Fabry - Perota zmniejsza co prawda moc wyjściową, ale znacznie zwęża szerokość emitowanego pasma. Są doniesienia o tym, że otrzymano szerokość widmową wiązki równą  $0,001\text{cm}^{-1}$  (300MHz).

Dostępność różnorodnych barwników pozwala uzyskać promieniowanie od UV do bliskiej podczerwieni (Rys. 8).

#### c. Zmiana położenie pasma luminescencji

Zmieniając rozpuszczalnik, dzięki efektom solwatochromowym, można zmienić położenie pasma luminescencji barwnik, a w konsekwencji długość fali generowanego przez laser promieniowania.

#### d. Zmiana stężenia barwnika

Nakładanie się pasm absorpcji i fluorescencji barwnika powoduje, że ze wzrostem stężenia rośnie absorpcja w krótkofalowej części widma emisji i akcja laserowa przesuwa się ku czerwieni.

### 5. Wzmocniona emisja spontaniczna.

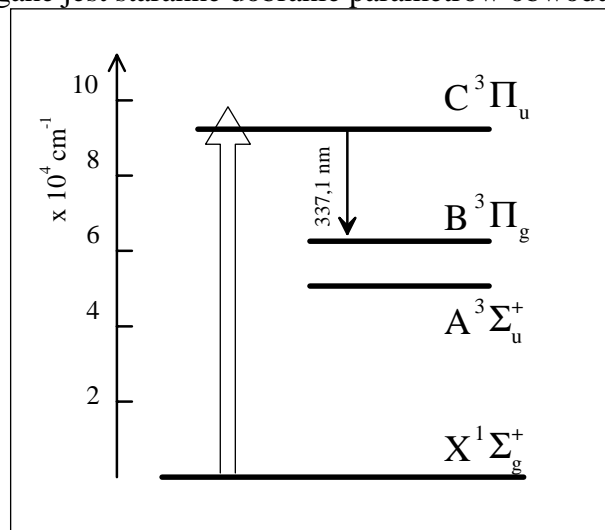
Zastosowanie silnego pompowania, np. laserem azotowym, powoduje wystąpienie dużej inwersji obsadzeń. Wzbudzone drobin oczywiście emitują fotony emisji spontanicznej. Mogą one stanowić fotony wymuszające dla drobin będących w stanie wzbudzonym. Fotony spontaniczne rozchodzą się w całym kącie bryłowym, ale część z nich niewątpliwie będzie poruszała się wzdłuż ośrodka z inwersją obsadzeń, ulegając wzmocnieniu. To promieniowanie jest już ukierunkowane i stanowi *wzmocnioną emisję spontaniczną (ASE)*. Dla akcji laserowej jest to promieniowanie szkodliwe. ASE stanowi szum wzmacniacza i lasera. Z wielkości ASE możemy wyznaczyć wzmocnienie ośrodka aktywnego.

#### *Laser azotowy.*

Schemat poziomów energetycznych molekularnego azotu przedstawiono na Rys. 6. Dla takich lekkich atomów jak azot, spełniony jest dobrze zakaz interkombinacji i stąd najniższy (trypletowy) poziom  $A^3\Sigma_u^+$  jest stanem metastabilnym o długim czasie życia. Dodatkowo również stan B ma dłuższy czas życia niż stan C. Pomimo tych niekorzystnych warunków obserwuje się silną linię o długości 337.1 nm będącą wynikiem przejścia  $C \rightarrow B$ .

W Tab.1 przedstawiono czasy życia stanów, które odgrywają znaczącą rolę w przebiegu akcji laserowej. A więc laser taki może pracować tylko impulsowo.

Depopulacja niższego stanu laserowego odbywa się drogą wymiany gazu w obszarze aktywnym wnęki i poprzez zderzenia ze ściankami rury laserowej. Wzbudzenie natomiast dokonuje się przez intensywne poprzeczne wyładowanie elektryczne. Stosowane napięcia wynoszą zwykle około 15kV. Ponieważ wzbudzenie musi zajść w czasie krótszym niż kilka nanosekund wymagane jest staranne dobranie parametrów obwodu elektrycznego.



Rys. 6. Schemat poziomów energetycznych molekularnego azotu.

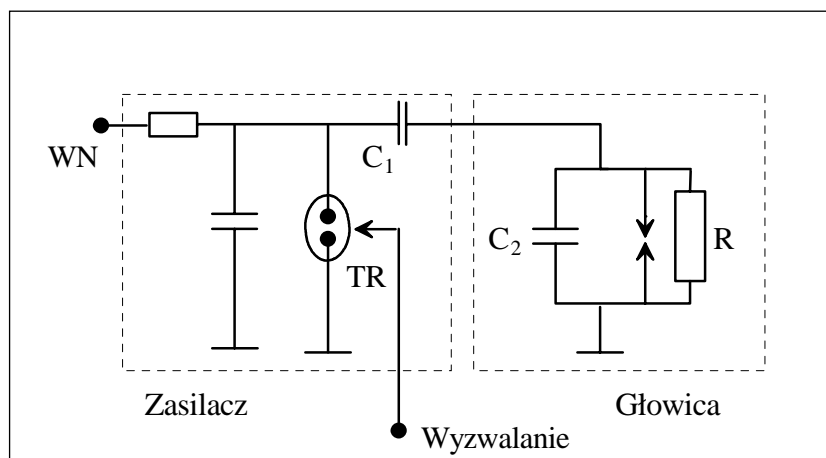
Akcja laserowa przeprowadza cząsteczkę do stanu metatrwałego o stosunkowo długim czasie życia. To powoduje szybkie zmniejszenie inwersji obsadzeń i akcja laserowa gaśnie. Dla uzyskania dużej mocy stosuje się duże ciśnienia i duże gęstości prądów. Osiągnięcie mocy 1MW nie przedstawia większych problemów technicznych.

Tabela 1. Czasy życia wybranych stanów cząsteczki  $N_2$

Stan	Czas życia
$X^1\Sigma_g^+$	$\infty$
$A^3\Sigma_u^+$	sekundy
$B^3\Pi_g$	10 $\mu$ s
$C^3\Pi_u$	40ns

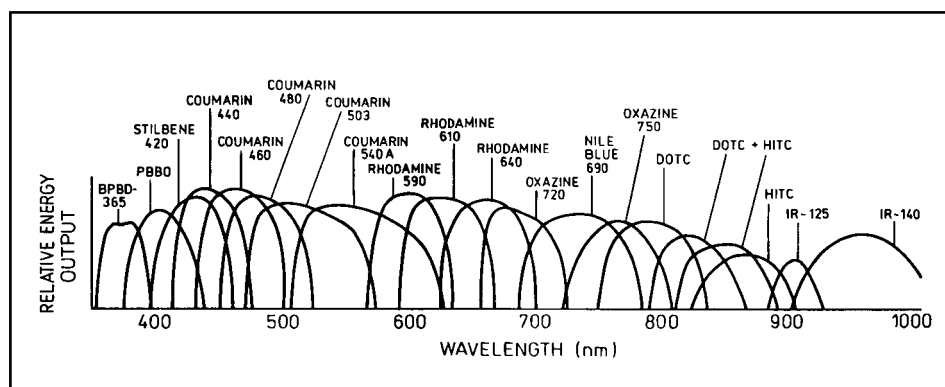
Schemat zasilania lasera przedstawiono na Rys.7 . Z zasilacza wysokiego napięcia ładowany jest kondensator  $C_1$ , który poprzez opór  $R$  połączony jest do ziemi. Opór ten łączy okładki kondensatorów spinających elektrody znajdujące się w kanale wyładowczym rury laserowej. Zatem w trakcie ładowania kondensatora  $C_1$  elektrody wyładowcze są na potencjale ziemi. W momencie wyzwolenia tyratronu TR dodatnia okładka kondensatora otrzymuje potencjał masy, a więc druga staje się ujemna. W konsekwencji górna okładka kondensatora  $C_2$  bardzo szybko ładuje się ujemnie. Opór  $R$  jest na tyle duży, że można go pominąć w analizie. Impuls napięciowy na elektrodach powoduje przebiecie gazu w rurze wyładowczej. Otrzymuje się dzięki temu bardzo krótkie wyładowanie, które wzbudza azot.

Ze względu na krótki czas błysku nie stosuje się rezonatorów, a jedynie jedno lustro zawierające promieniowanie do okienka wyjściowego. Akcja laserowa oparta jest na wzmocnieniu emisji spontanicznej. Kształt wiązki odzwierciedla przekrój rury wyładowczej.



Rys. 7. Zasilanie lasera azotowego - układ stosowany w zadaniu.

Lasery azotowe są bardzo efektywnymi pompami laserów barwnikowych. Stosowane są powszechnie i są łatwo dostępne komercyjnie. Pracują z różnymi częstotliwościami do kilku kHz, a czas błysku wynosi od ułamka do kilku nanosekund. Zależy on głównie od układu elektronicznego i innych zabiegów technicznych, jak szybki przepływ azotu, stosowane domieszki czy wstępna jonizacja kanału wyładowczego.



Rys. 8. Barwniki pompowane laserem azotowym.

## Literatura

1. F. Kaczmarek "Wstęp do fizyki laserów",
2. F. Schafer "Dye lasers",
3. J.T. Verdeyen "Laser electronics",
4. R.K. Bauer, A. Balter, H. Cherek, A. Kowalczyk, "Laser azotowy z prejonizacją ARO - 6", Preprint nr. 340, IF UMK Toruń, 1977,
5. N.W. Karłow "Wykłady z fizyki laserów".

## Aparatura.

### *Laser azotowy.*

#### **1. Opis aparatu.**

Laser azotowy zasilany jest z zasilacza prądu stałego napięciem od 10kV do 15kV maksymalnie. Wyzwalany jest za pomocą generatora z tyratronem (Rys. 7). W warunkach optymalnej pracy, wiązka o długości fali 337,1nm osiąga moc 0,5 MW, a czas trwania impulsu wynosi około 5 ns. Eliminację azotu w stanie metastabilnym uzyskuje się dzięki ciągłemu przepływowi gazu przez rurę wyładowczą. Rura zakończona jest z jednej strony lustrem całkowicie odbijającym.

#### **2. Obsługa.**

W celu uruchomienia lasera azotowego należy:

1. Włączyć pompę rotacyjną i grzanie tyratronu wyłącznikiem stołu lasera barwnikowego na 15 min. przed planowanym użyciem lasera.
2. Otworzyć przepływ gazu zaworami na butli utrzymując ciśnienie około 80 -100 Tr.
3. Wciskając czerwony przycisk na panelu sterowania generatora uruchomić generator impulsów wyzwalających tyratron.
4. Skręcić pokrętkę wysokiego napięcia zasilacza w lewo do oporu (na "0").
5. Włączyć zasilanie zasilacza wysokiego napięcia.
6. Włączyć wysokie napięcie.
7. Pokrętkę zwiększać wolno napięcie. Przy około 10 kV laser powinien zacząć działać. Jeśli nie - nie zwiększać napięcia ponad 12kV i wezwać pomoc.
8. Zwiększyć napięcie do około 14kV i zoptymalizować moc wiązki dobierając ciśnienie gazu.

**Uwaga:** *Jeżeli wystąpią jakiegokolwiek zdarzenia wzbudzające podejrzenie o awarię, natychmiast poinformować prowadzących zajęcia. Zwłaszcza zwrócić uwagę na równą pracę pompy i generatora brak wyładowań iskrowych. Nie zmieniać częstości pracy lasera. Jeżeli wymagana jest natychmiastowa interwencja - wyłączyć główne zasilanie na tablicy lub wyłącznikiem stołu lasera barwnikowego.*

### *Elementy optyczne.*

#### **1. Opis.**

Zestaw elementów do samodzielnej budowy lasera barwnikowego i wzmacniacza stanowią:

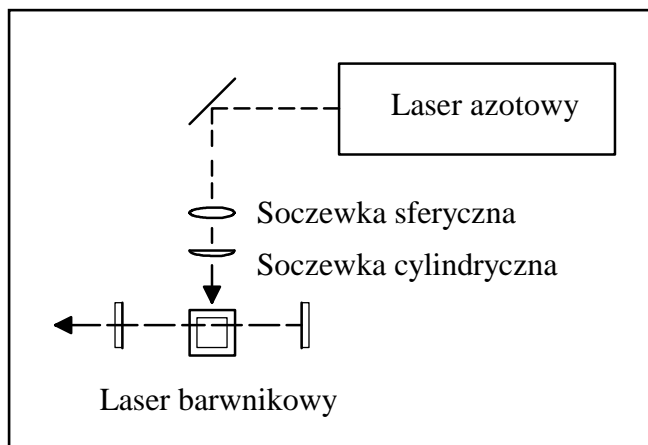
1. Dwa lustra laserowe płaskie.
2. Oprawy kuwet: lasera i wzmacniacza.
3. Soczewki do zestawienia teleskopu.
4. Odbiciowa siatka dyfrakcyjna.
5. Etalon Fabry -Perota.
6. Światłowody i inne elementy prowadzące światło.
7. Barwnik (rodamina 6G) i rozpuszczalnik.

## 2. Użytkowanie.

Elementy służące do zestawienia lasera barwnikowego są wysokiej jakości. Może zająć jednak konieczność oczyszczenia i można to wykonywać tylko pod nadzorem prowadzącego zajęcia. *Nie dotykać palcami powierzchni odbijających.*

### *Pomiary i opracowanie wyników.*

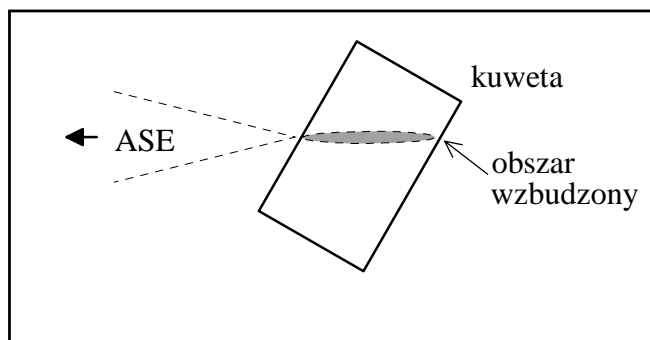
Układ pompowania lasera barwnikowego oraz wzmacniacza fotonów przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9. Układ pompownia lasera barwnikowego (widok z góry)

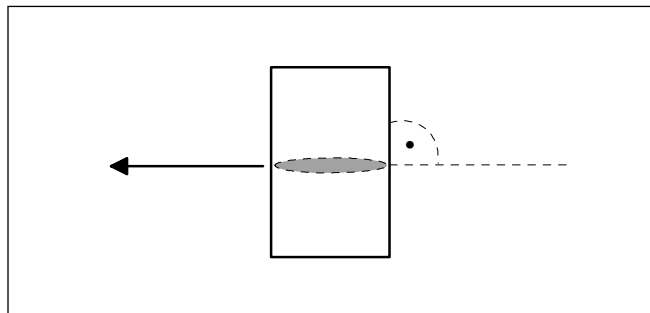
### **Zadanie polega na:**

1. Obserwacji i rejestracji widma ASE za pomocą spektrografu z kamera CCD Princeton Instruments.



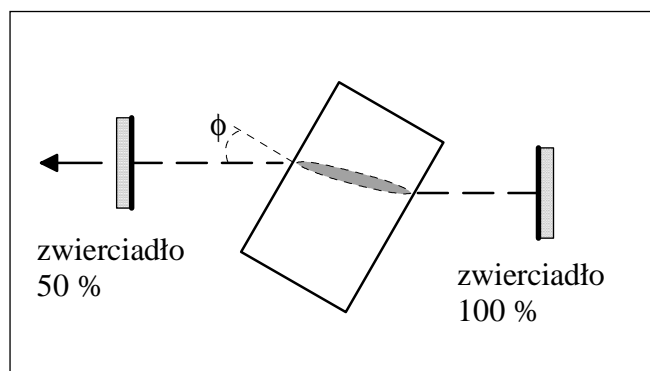
Rys. 10. Generacja ASE (widok z boku).

2. Obserwacji akcji laserowej na kuwecie ze ściankami prostopadłymi do osi optycznej i rejestracji widma za pomocą spektrografu CCD.



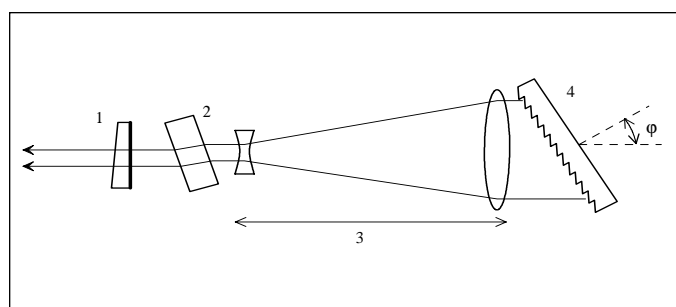
Rys. 11 Laser na kuwecie (widok z boku).

3. Zestawieniu lasera barwnikowego z nieselektywnym rezonatorem złożonym z dostarczonych zwierciadeł, optymalizacji pracy oraz rejestracji widma.



Rys. 12. Laser z rezonatorem nieselektywnym.  $\phi$  - kąt Brewstera.

4. Zestawieniu lasera barwnikowego strojonego odbiciową siatką dyfrakcyjną, oszacowaniu szerokości półkowej linii, wykonaniu krzywej cechowania siatki dyfrakcyjnej i rejestracji uzyskanych linii.



Rys. 13. Laser barwnikowy strojony siatką dyfrakcyjną przy użyciu teleskopu.  
1 - zwierciadło 50%, 2 - ośrodek aktywny, 3 - teleskop, 4 - siatka dyfrakcyjna.

## Uzupełnienie.

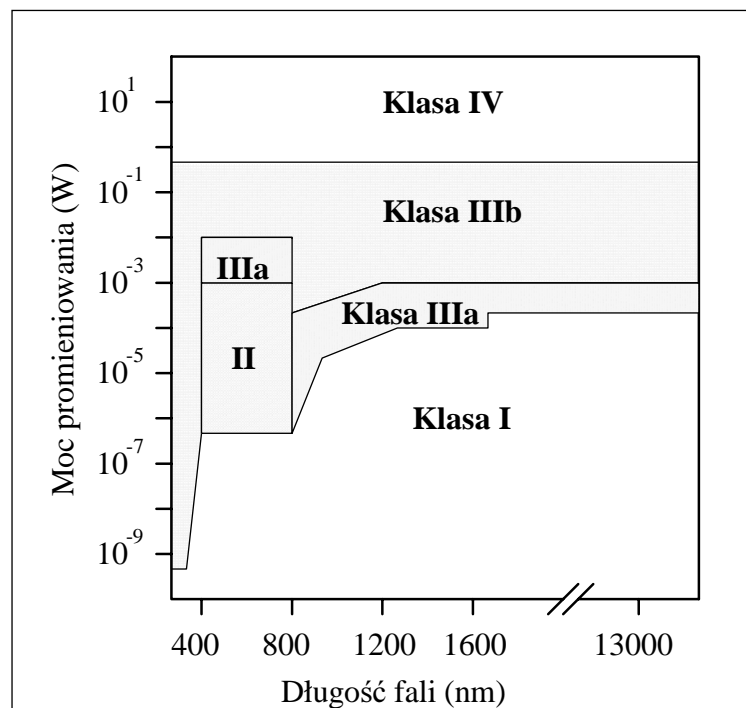
### Bezpieczeństwo pracy z laserami.

Promieniowanie laserowe może nie tylko pomóc w leczeniu, ale też może być bardzo szkodliwe (w zasadzie tylko dla skóry i oczu). Odpowiednie normy określają zgodny z wymogami prawa sposób postępowania z urządzeniami laserowymi. W Polsce, od marca 1992 obowiązuje norma bhp Nr. PN-91/T-06700 pt. "Bezpieczeństwo przy promieniowaniu emitowanym przez urządzenia laserowe".

Urządzenia laserowe ze względu na ich szkodliwość podzielono na cztery grupy:

- ♦ Klasa I. Należą do niej lasery, których promieniowanie jest całkowicie bezpieczne. Nie stwarzają żadnego zagrożenia dla tkanki.
- ♦ Klasa II. Klasa dotyczy laserów emitujących promieniowanie z obszaru pasma widzialnego. Są bezpieczne dla wzroku pod warunkiem, że światło nie jest skierowane bezpośrednio na oko.
- ♦ Klasa IIIa. Urządzenia laserowe z tej grupy są warunkowo bezpieczne.
- ♦ Klasa IIIb. Obejmuje ona lasery emitujące promieniowanie niebezpieczne dla wzroku w każdych warunkach. Ostatnio (czerwiec 1992) połączono Klasę IIIa z IIIb pozostawiając zalecenia bezpieczeństwa i higieny pracy takie jak dla Klasy IIIb. Lasery należące do tej klasy mogą spowodować uszkodzenie wzroku już w czasie trwania ekspozycji 0,25s.
- ♦ Klasa IV. Promieniowanie urządzeń należących do tej klasy jest niebezpieczne dla oczu i skóry w każdych warunkach. Obejmuje lasery najwyższych mocy.

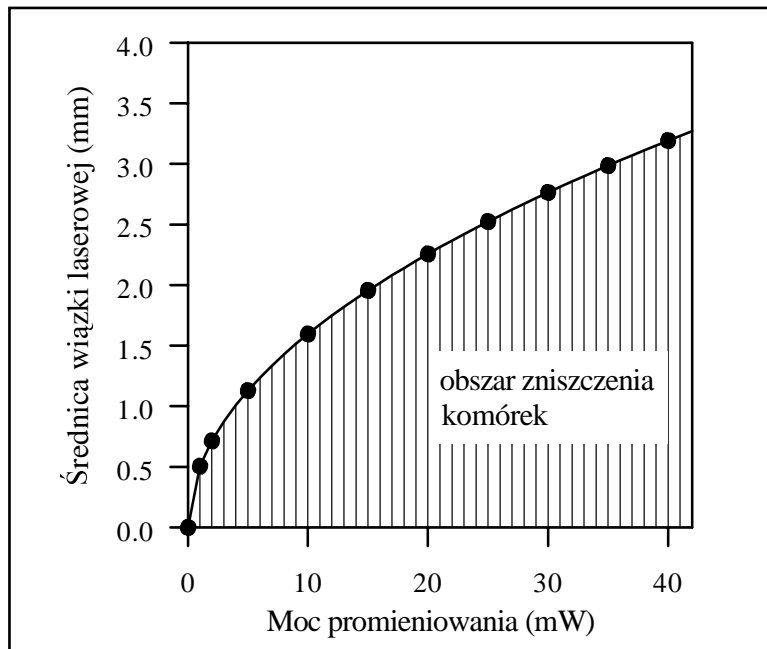
Podział na klasy przedstawiono na Rys.14.



Rys. 14. Podział na klasy urządzeń laserowych w funkcji mocy i długości fali promieniowania.

Lasery mogą pracować w sposób ciągły i impulsowy. W drugim przypadku istotnym dla bezpieczeństwa jest czas trwania impulsu i liczba impulsów.

Światło laserowe zazwyczaj jest ogniskowane, przez co zwiększa się gęstość mocy i jej wartość właśnie stanowi o tym, jak bardzo szkodliwe może być to promieniowanie.



Rys. 15. Zależność gęstości promieniowania laserowego od średnicy plamki.

Oddziaływanie termiczne promieniowania może spowodować uszkodzenie siatkówki, tęczówki i rogówki oka. Stwierdzono, że największe ryzyko niesie z sobą promieniowanie o gęstości  $>500\text{mW}/\text{cm}^2$ . Powoduje ono niszczenie tkanki biologicznej. Należy zauważyć, że taką gęstość można uzyskać dość łatwo jeśli skupi się promieniowanie za pomocą układu optycznego. Na Rys.15 przedstawiono zależność gęstości mocy od średnicy plamki promieniowania laserowego. O ile mechanizmy obronne organizmu mogą jakoś zadziałać w przypadku promieniowania widzialnego, o tyle promieniowanie niewidzialne może poczynić ogromne szkody. Należy pamiętać, że lasery półprzewodnikowe emitują promieniowanie o dużej mocy. Wzrok należy chronić okularami i bezwzględnie unikać bezpośredniego oświetlenia oka.



W Tabeli zawarte s<sup>1</sup> graniczne dopuszczalne ekspozycje dla oczu i skóry promieniowania laserowego o czasie trwania 1s.

Typ lasera	Długość fali [nm]	Dopuszczalne gęstości mocy promieniowania [mW/cm <sup>2</sup> ]	
		dla oczu	dla skóry
Argonowy	488-514	1.8	1,100
He-Ne	632.8	1.8	1,100
Półprzewodnikowy	670	1.8	1,100
Półprzewodnikowy	904	4.6	1,100
YAG : Nd	1,064	9	1,100
CO <sub>2</sub>	10,600	560	560

Przykładowo: zakładając, że średnica wiązki lasera He-Ne wynosi 1mm, otrzymujemy dopuszczalną moc wiązki dla oka - 0,015mW i dla skóry - 9mW. Oznacza to, że **wszystkie** lasery He-Ne dostępne w pracowni s<sup>1</sup> **bardzo niebezpieczne** dla oka, ale bezpieczne dla skóry. Zakładając dalej, że średnica wiązki lasera Ar<sup>+</sup> wynosi 2mm granica bezpieczeństwa dla skóry wynosi 33mW. Laser używany w pracowni emituje światło o mocy pojedynczych watów, zatem jest **bardzo niebezpieczny dla oczu i skóry**. W pracowni dostępne s<sup>1</sup> okulary ochronne, których należy używać.

### Literatura

1. L.Pokora "Lasery w stomatologii" wyd. Laser Instruments - Centrum Techniki Laserowej, Warszawa 1992,
2. W. Glinkowski, L. Pokora, "Lasery w terapii" wyd. Laser Instruments - Centrum Techniki Laserowej, Warszawa 1993.