

BADANIE WŁASNOŚCI FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Uwaga! Jest to tylko zarys teorii wymaganej w celu przeprowadzenia ćwiczenia.

Materiał teoretyczny można odnaleźć w przytoczonej bibliografii.

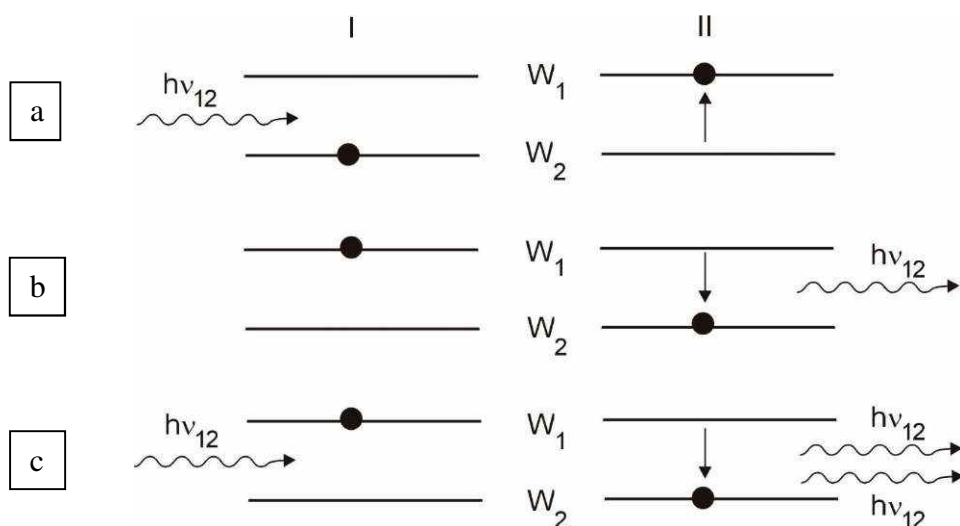
Podstawy budowy i działania laserów

LASER jest generatorem koherentnego (spójnego) promieniowania elektromagnetycznego powstającego w danym ośrodku materialnym w wyniku wzmocnienia promieniowania przez emisję promieniowania wymuszonego. Z działaniem lasera związane są następujące trzy procesy fizyczne: absorpcja (rys. 1a), promieniowanie spontaniczne (rys. 1b) oraz promieniowanie wymuszone (rys. 1c). Jeśli istnieją np. dwa poziomy energetyczne W_1 i W_2 , z których W_1 jest poziomem podstawowym, wyższy zaś W_2 poziomem wzbudzenia atomu, wówczas dowolne przejście pomiędzy tymi dwoma poziomami powoduje, zgodnie z prawem Plancka, emisję lub absorpcję fotonu o energii $h\nu_{12} = W_2 - W_1$, gdzie h - stała Plancka, ν_{12} - częstotliwość. W normalnych temperaturach większość atomów znajduje się w stanie podstawowym. Stan podstawowy zostaje naruszony wówczas, gdy atom zaabsorbuje foton o energii równej $h\nu_{12}$. Przechodzi on wtedy do stanu wzbudzenia o energii W_2 (rys. 1a). Stan wzbudzenia jest stanem nietrwałym i po chwili wzbudzony atom bez jakiegokolwiek zewnętrznego działania stymulującego przechodzi do stanu podstawowego W_1 wypromieniowując foton o energii $h\nu_{12}$. Proces ten nazywamy emisją spontaniczną (rys. b).

Jeżeli foton o energii $h\nu_{12}$ oddziałuje na atom znajdujący się w stanie wzbudzenia, wówczas pod wpływem tego stymulującego fotonu atom przechodzi do stanu podstawowego wypromieniowując foton o energii $h\nu_{12}$ (rys. 1c). Jest to zjawisko emisji wymuszonej. To wymuszone promieniowanie jest zgodne w fazie z promieniowaniem wymuszającym, co ma istotne znaczenie dla akcji laserowej. Istnieje na ogół bardzo wielka różnica pomiędzy prawdopodobieństwem przejść spontanicznych P_A i wymuszonych P_B . Na podstawie kwantowej teorii promieniowania (A. Einstein, 1916-1917) wzajemny stosunek tych prawdopodobieństw, czyli stosunek liczby obu rodzajów aktów emisji opisuje relacja:

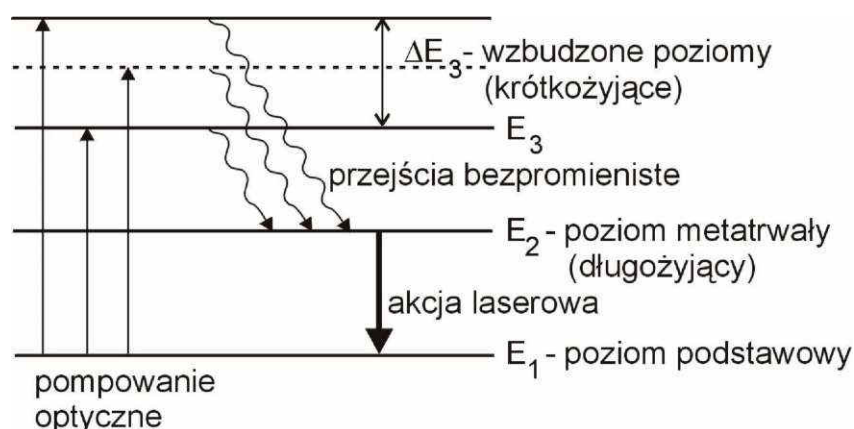
$$\frac{P_A}{P_B} = \exp\left\{\frac{h\nu}{kT}\right\} - 1$$

Z powyższej relacji wynika, że dla krótkofalowego promieniowania, gdy $h\nu \gg kT$, to P_A/P_B dąży do nieskończoności, czyli $P_A \gg P_B$. Natomiast dla promieniowania długofalowego $P_A \ll P_B$. W tym przypadku promieniowanie wymuszone odgrywa decydującą rolę.



Rys. 1. Przejście atomu ze stanu początkowego (I) do stanu końcowego (II). Czarny punkt symbolizuje stan energetyczny w jakim znajduje się atom. Dalsze objaśnienia w tekście.

Gdy w danym ośrodku więcej atomów znajduje się w stanie wzbudzonym (tzw. rozkład antyboltzmanowski), mówimy o *inwersji obsadzeń* (osiąga się ją poprzez wzbudzanie atomów zwane *pompowaniem optycznym*). Jeśli w ośrodku, w którym istnieje inwersja obsadzeń pojawi się wymuszający foton o energii $h\nu_{12}$, wówczas występuje emisja wymuszona. W tej sytuacji dany ośrodek wypromieniowuje znacznie większą ilość fotonów niż ich absorbuje. Zjawisko to nazywa się wzmocnieniem kwantowym i stanowi podstawę działania lasera. Powyższy opis jest skrótowy; niżej podany zostanie precyzyjniejszy opis mechanizmu powstawania akcji laserowej. Najważniejszym warunkiem pojawienia się akcji laserowej jest istnienie, oprócz poziomu podstawowego, przynajmniej dwóch poziomów wzbudzonych wyższych, z których jeden jest poziomem „meta trwałym” tzn. dłużej żyjącym (ok. 10^{-4} s), natomiast drugi powinien być poziomem krótko żyjącym (ok. 10^{-7} s). Wówczas światło lampy błyskowej wzbudza atomy chromu (jak ma to miejsce w przypadku np. lasera rubinowego) lub atomy cynku (w laserze półprzewodnikowym GaAs) do wysokiego i stosunkowo szerokiego pasma poziomów ΔE_3 (rys. 2). Są to poziomy krótko żyjące, więc jony „spadają” niezwłocznie do niższego, meta trwałego (długożyjącego) poziomu E_2 . Na tym poziomie gromadzą się, aż jakiś przypadkowy (spontaniczny) foton (z pędem równoległym do osi podłużnej warstwy aktywnej) nie wymusi emisji całej lawiny fotonów.



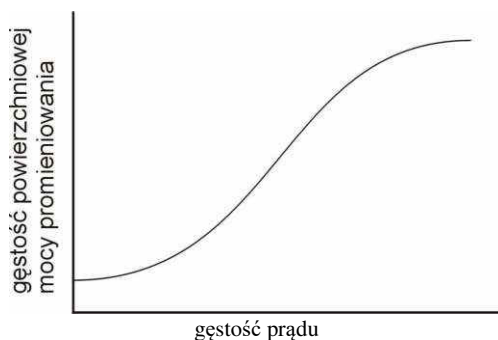
Rys. 2. Schemat poziomów energetycznych atomu i mechanizm powstawania akcji laserowej.

Używany w naszej pracowni laser półprzewodnikowy stanowi dioda półprzewodnikowa z arsenku galu (GaAs), sporządzona z półprzewodnika typu n, do którego wprowadzono drogą dyfuzji domieszkowe atomy cynku lub kadmu (akceptory), uzyskując w ten sposób warstwę n-p. Na warstwę n-p napylone są z obu stron cienkie warstwy srebra, stanowiące elektrody. Całość jest osadzona na połączanej płytce

molibdenowej: zapewnia ona dobre odprowadzenie energii cieplnej. Najmniejsze powierzchnie diody (sam laser ma wymiary $0.1 \times 0.3 \times 1.0$ mm), po wyszlifowaniu stanowią swoistą wnękę rezonansową, w której powstaje fala stojąca o następujących częstotliwościach rezonansowych: $\nu_n = nc/2d$, gdzie n - liczba naturalna, c - prędkość światła, $d = 1.0$ mm. W przypadku wykorzystywanego w tym ćwiczeniu lasera długość fali emitowanego promieniowania laserowego wynosi 650 nm.

Najważniejszymi charakterystykami lasera półprzewodnikowego są:

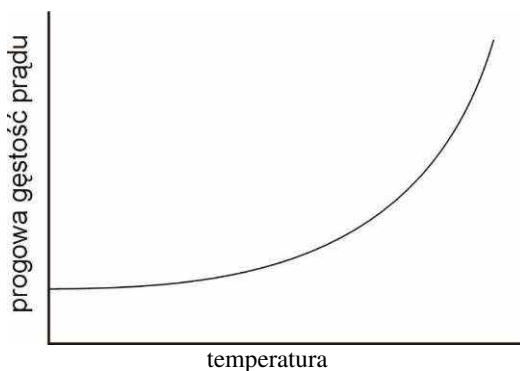
- a) zależność gęstości powierzchniowej mocy promieniowania lasera od gęstości prądu przepływającego przez diodę (rys. 3).



Rys. 3. Zależność gęstości powierzchniowej mocy promieniowania od gęstości prądu płynącego przez diodę.

Prezentowany wykres odpowiada ustalonej temperaturze (w tym przypadku 4.2 K dla lasera GaAs). W punkcie wykresu, w którym tangens nachylenia stycznej do wykresu osiąga wartość maksymalną, progowa wartość prądu dla lasera GaAs osiąga wartość 10^3 A/cm² i intensywność promieniowania rośnie najszybciej wraz ze wzrostem gęstości prądu. Taki wzrost informuje o istnieniu akcji laserowej. Wraz ze wzrostem temperatury krzywe charakterystyki przesuwają się w prawo ale ich kształt pozostaje podobny do przedstawionego na rys. 3. Dla przykładowej temperatury 77K progowa wartość prądu wynosi 10^4 A/cm².

- b) zależność progowej gęstości prądu (tzn. takiej przy której rozpoczyna się akcja laserowa) od temperatury (rys. 4).

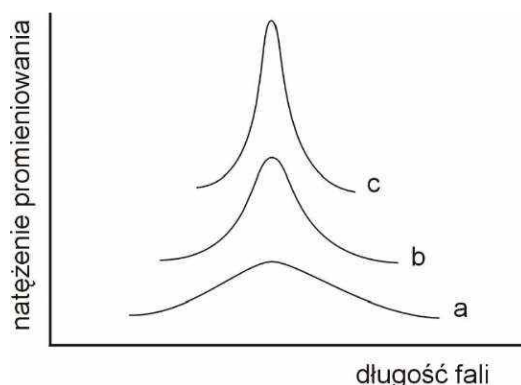


Rys. 4. Zależność progowej gęstości prądu od temperatury.

Zmieniając temperaturę można wyznaczyć zależność progowej gęstości prądu i wykreślić charakterystykę pokazaną na rys. 4. Obszar zawarty pod wykresem jest obszarem akcji laserowej. Jak wynika z tego wykresu dla lasera GaAs w temperaturze pokojowej akcja laserowa rozpoczyna się przy gęstości prądu ok. 10^5 A/cm².

Jedną z najważniejszych właściwości lasera jest jego duża wydajność przy zamianie energii elektrycznej na świetlną. Jest to tzw. wydajność zewnętrzna definiowana jako stosunek ilości fotonów emitowanych z lasera do ilości nośników wstrzykniętych do półprzewodnika. Tuż przed wartością progową wydajność zewnętrzna wynosi 4-11%. Powyżej wartości progowej wydajność zewnętrzna gwałtownie wzrasta, i dla lasera GaAs osiąga ok. 70% w temperaturze 77K.

c) zależność natężenia promieniowania od długości fali przy różnych gęstościach prądu przepływającego przez diodę (rys.5).



Rys. 5. Zależność natężenia promieniowania od długości fali przy różnych gęstościach progowych prądu przepływającego przez diodę, gdzie a - dla gęstości prądu mniejszej od gęstości progowej, b i c - odpowiednio rosnące gęstości większe od gęstości progowej.

Na rys. 5 daje się zauważyć wyraźne zmniejszenie szerokości połówkowej linii widmowej wraz ze wzrostem gęstości prądu. Z uwagi na to, że odstęp między najprostszymi rodzajami drgań wewnątrz w półprzewodnikach nie są równe, szerokości połówkowe linii emisyjnych w półprzewodnikach są większe od tych otrzymywanych w gazach (np. w laserze He-Ne).

Inwersję obsadzeń w półprzewodniku można najłatwiej zrealizować przez wstrzykiwanie elektronów i dziur do obszarów n i p złącza n-p (silnie domieszkowanego). W wyniku rekombinacji nośników ładunku wstrzykiwanych do obszarów n i p wytwarzane są kwanty promieniowania przypadkowe w czasie i co do kierunku. Ich energia jest rozłożona w szerokim zakresie widma i zależy od między innymi od temperatury złącza, koncentracji domieszek oraz od poziomu iniekcji nośników. Promieniowane to ma charakter emisji spontanicznej. Wśród fotonów wypromieniowywanych w różnych kierunkach z aktywnego obszaru złącza są również i takie, które poruszają się niemal dokładnie w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny warstwy zaporowej złącza, dzięki czemu pozostają one przez znaczny okres czasu w obszarze inwersji obsadzeń. Fotony te zderzając się z pobudzonymi elektronami wywołują proces emisji wymuszonej, którego intensywność nasila się ze wzrostem poziomu iniekcji. Najbardziej efektywne w rozwijaniu emisji wymuszonej są kwanty o energii odpowiadającej częstotliwości, dla której występuje maksimum wzmocnienia. Dzięki temu promieniowanie o tej częstotliwości staje się dominujące w miarę wzrostu poziomu iniekcji (gęstości prądu) w złączu i obserwuje się charakterystyczne dla pracy lasera zwężenie widmowej charakterystyki promieniowania (rys. 5).

Promieniowanie emitowane przez lasery charakteryzuje się:

- spójnością tzn. uporządkowaniem fazowo-przestrzennym
- monochromatycznością wiązki - przejawiającą się w niewielkiej szerokości widmowej linii emisyjnej
- równoległością - wiąże się z tym ścisła kierunkowość wiązki i duża łatwość skupiania wiązki przez układy optyczne
- dużą gęstością powierzchniową mocy (od 10^6 do 10^8 W/cm²).

Zastosowanie laserów w medycynie i stomatologii

Promieniowanie laserowe charakteryzuje wysoki poziom spójności i monochromatyczności: można je wytwarzać w postaci silnie skolimowanych (skupionych) wiązek o średnicy nawet rzędu długości fali tego promieniowania. Ta druga cecha pozwala na ogromne zwiększenie gęstości mocy wiązki, co z kolei daje możliwość skupienia dużych ilości energii na minimalnym obszarze. Szczególne znaczenie mają w biomedycynie lasery molekularne ze względu na dużą wydajność, niski koszt wytwarzania i niewielkie rozmiary. Ponadto promieniowanie lasera molekularnego przypada na część podczerwoną widma, która jest silnie pochłaniana przez tkanki organizmów żywych. Tak jak w przypadku materii nieożywionej oddziaływaniu promieniowania laserowego na tkanki towarzyszy odbicie, rozproszenie, transmisja i częściowa lub całkowita absorpcja wiązki. Ważne znaczenie w terapii mają ostatnie dwa zjawiska, natomiast pozostałe można pominąć w rozważaniach tylko wtedy, gdy ich istnienie nie zmienia w istotny sposób struktury i funkcji fizjologicznych obszarów leżących w bezpośrednim sąsiedztwie pola zabiegu. Proces transmisji energii do określonych obszarów tkanki jest najbardziej efektywny wtedy, kiedy widmo absorpcyjne obszarów leżących ponad tkanką nie zawiera długości fali promieniowania użytego do zabiegu. Poprzedzone transmisją lub bezpośrednie zjawisko pochłaniania może wywołać w tkankach efekty fotobiochemiczne, fototermiczne oraz fotojonizacyjne. Występowanie tych efektów zależy od wielkości gęstości mocy promieniowania i energii wiązki (patrz rys. 6).

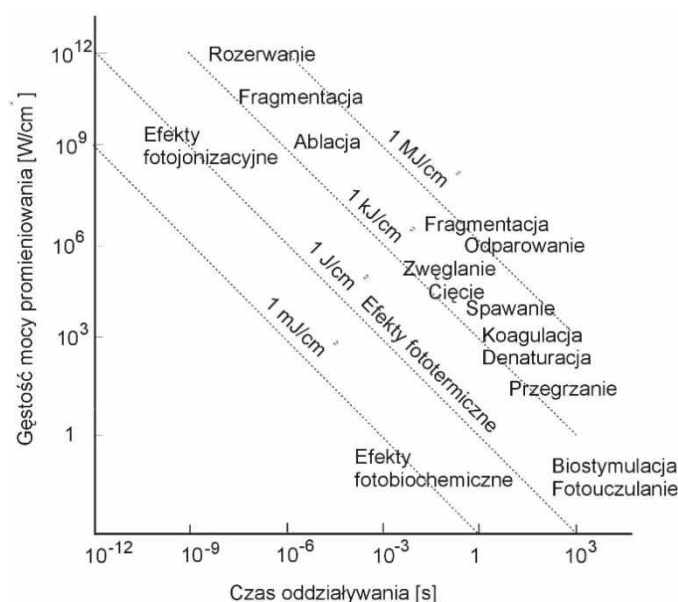
Na podstawie badań laboratoryjnych ustalono, że promieniowanie laserowe o długościach fal od 600 do 900nm i gęstościach mocy nie wyższych niż 50 mW/cm² wywołują następujące efekty fotobiochemiczne:

- wzrost szybkości wymiany elektrolitów między komórką, a jej otoczeniem
- działanie antymutagenne
- przyspieszenie mitozy
- zmiany struktury błon biologicznych
- wzrost aktywności enzymów
- zwiększenie syntezy ATP i DNA

Promieniowanie o podanych powyżej parametrach prowadzi, na poziomie komórki, do korzystnych efektów biostymulacyjnych takich jak:

- poprawa mikrokrążenia krwi
- pobudzenie angiogenezy
- działanie immunomodulacyjne
- wzrost amplitudy potencjałów czynnościowych włókien nerwowych
- zwiększenie stężenia hormonów, kinin i alkaloidów
- działanie hipokoagulacyjne

Najlepsze wyniki w obszarze fotobiochemicznym, biostymulacji oraz fotouczulania daje stosowanie lasera He-Ne (632,8 nm, ciągłego), laserów półprzewodnikowych (635 - 1500 nm, ciągłych lub impulsowych) oraz lasera barwnikowego (ciągłego lub impulsowego).



Rys. 6. Efekty towarzyszące pochłanianiu promieniowania w zależności od czasu oddziaływania i mocy promieniowania.

Z kolei różne efekty fototermiczne do których należą między innymi fotohipertermia (w obszarze temperatur 37-43 °C nie dochodzi do nieodwracalnej zmiany struktury tkanki, natomiast w zakresie temperatur 43-60 °C dochodzi do uszkodzenia błon komórkowych i częściowej denaturacji enzymów - odwracalnej przy kilkuminutowym okresie nagrzewania), fotokoagulacja (w zakresie 60-80 °C pojawia się trwała denaturacja białek enzymatycznych, natomiast w przedziale 80-100 °C obserwuje się nieodwracalną denaturację DNA), wreszcie fotokarbonizacja (od 100 do 300 °C zachodzi wrzenie wody, osuszenie komórek i ich zwęglanie) pojawiają się przy gęstościach mocy od 1 do 10⁶ W/cm² i czasach oddziaływania od kilku sekund do tysięcznych części sekundy. Optymalne efekty fototermiczne daje stosowanie laserów: Nd:YAG (ośrodek aktywny w postaci granatu itrowo-glinowego domieszkowanego neodymem), argonowego, CO₂, kryptonowego 647.1 nm (poszczególne typy laserów wymienione są w kolejności rosnących używanych gęstości mocy).

Efekty fotojonizacyjne pojawiają się w przedziale gęstości energii 10⁶-10¹² W/cm² i przy czasach oddziaływania od nano- do pikosekund. Dochodzi tutaj (w miarę wzrostu gęstości mocy wiązki) do takich procesów jak fotoablacja (odklejanie, odwarstwienie), fotofragmentacja - spowodowana rozchodzącą się w cytoplazmie fala uderzeniową oraz fotorozrywanie (swoisty mikro wybuch przebiegający bardzo gwałtownie).

Wraz z rozwojem techniki laserowej rośnie obszar jej zastosowań zarówno w medycynie jak i w stomatologii, zarówno do celów terapeutycznych jak i diagnostycznych. Wypada tutaj wspomnieć o rosnącym zastosowaniu laserów w technikach badawczych biomedycyny. W chirurgii wiązka promieniowania laserowego pełni rolę narzędzia koagulacyjnego i tnącego.

Technika laserowa (w porównaniu do tradycyjnej) dostarcza dodatkowych korzyści, do których należą:

- możliwość penetracji wiązki do chorych obszarów z pominięciem warstw zewnętrznych (jeśli posiadają one odmienne pasma absorpcji)
- cięcie tkanek bez kontaktu noża laserowego z ich powierzchnią
- skrócenie czasu trwania zabiegu przez ograniczenie krwawienia (koagulacja osocza oraz ścian naczyniowych tętnic lub żył)
- możliwość operowania zainfekowanych tkanek (wysoka temperatura w miejscu napromieniowania działa wyjąławiająco)
- skrócenie czasu gojenia ran pooperacyjnych (idealnie gładkie powierzchnie)
- zmniejszenie liczby zakażeń (brak krwiaków i martwicy brzeżnej)

- możliwość zastosowania techniki endoskopowej (światłowody o średnicy kilku mikrometrów).

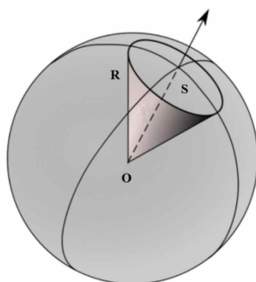
W onkologii coraz ważniejszą rolę odgrywa metoda fotodynamiczna (PDT) związana z bezinwazyjnym usuwaniem nowotworów. W okulistyce laser pomaga leczyć jaskrę poprzez obniżenie ciśnienia śród gałkowego w zabiegu irydektomii, polegającym na częściowym wycięciu tęczówki oraz pozwala przeprowadzić korekcję wad wzroku (poprzez nacięcie powierzchni rogówki, które koryguje kształt i zmienia wartość zdolności skupiającej oka). Światło emitowane przez laser rubinowy jest ogromnie przydatne w leczeniu odwarstwienia siatkówki. W dermatologii laserami dokonujemy destrukcji obszarów patologicznych skóry, usuwamy zmiany barwnikowe i tatuaże oraz wygładzamy skórę, której elastyczność zmienia się pod wpływem efektu termicznego uzyskiwanego w kolagenie.

W stomatologii dzięki zastosowaniu laserów biostymulacyjnych nieinwazyjnie leczy się błonę śluzową, znieczula się pacjenta i zatrzymuje krwawienie. Należy także wspomnieć o wykorzystaniu laserów w leczeniu ubytków próchnicznych, w zabiegach ekstrakcji i resekcji, czy w leczeniu przewlekłych zapaleń tkanki około zębowej. W urologii lasery pomagają „rozbijać” kamienie w dolnych odcinkach dróg moczowych.

Ginekologia zawdzięcza między innymi laserom pomoc w leczeniu przerostów endometriotycznych oraz w innych schorzeniach kobiecych takich jak: nadżerki gruczołowe szyjki macicy i patologie ograniczające płodność.

W diagnostyce medycznej technika endoskopowa pozwala oświetlać narządy wewnętrzne, dzięki czemu można dokonywać szczegółowych obserwacji układu pokarmowego, moczowego i krwionośnego łącznie z sercem.

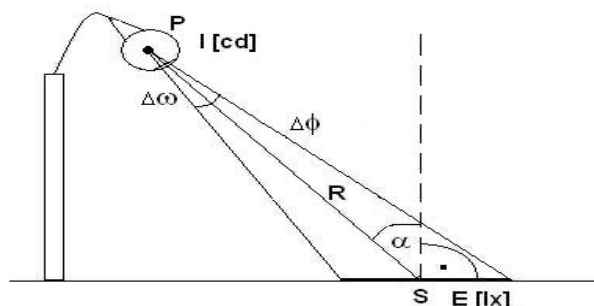
Podstawy fotometrii



Rys. 6.- Kąt bryłowy

O – wierzchołek stożka i środek kuli, S – powierzchnia kulista wycinana przez tworzącą stożka, R –promień kuli.

Kątem bryłowym nazywamy część przestrzeni wyciętą przez powierzchnię stożka. Kąt bryłowy ω mierzymy stosunkiem części powierzchni kulistej S, wyciętej przez powierzchnię stożka, do kwadratu promienia R (odległość między wierzchołkiem stożka O a wycinaną przez niego powierzchnią): $\omega = S/R^2$. Jeżeli pole wyciętej powierzchni równe jest R^2 , wówczas taki kąt bryłowy nazywamy jednostkowym albo steradianem (sr). Maksymalny kąt bryłowy (wyznaczony przez sferę) ma miarę 4π steradianów, gdyż z definicji $\omega = S/R^2 = 4\pi R^2/R^2 = 4\pi$, innymi słowy jest to stosunek powierzchni kuli ($4\pi R^2$) do kwadratu jej promienia – R.



Rys. 7 Schematyczne przedstawienie podstawowych wielkości fotometrycznych:

P – źródło światła, $\Delta\Phi$ - część strumienia światła zawarta w kącie bryłowym $\Delta\Omega$, R – oś strumienia świetlnego, I – natężenie światła, E – oświetlenie, α – kąt między normalną do oświetlanej powierzchni a kierunkiem strumienia, S – oświetlana powierzchnia.

Strumieniem świetlnym Φ nazywamy całkowitą ilość energii wysyłanej przez źródło, w zakresie promieniowania widzialnego, we wszystkich kierunkach w określonej jednostce czasu.

Źródło światła promieniujące we wszystkich kierunkach z jednakową mocą nosi nazwę źródła izotropowego.

Zanim zdefiniujemy jednostkę strumienia wprowadźmy wielkość zwaną natężeniem światła (I).

Przez **natężenie światła** rozumiemy wielkość:

$$I = \Delta\Phi / \Delta\Omega \quad (1)$$

gdy kąt $\Delta\Omega$ dąży do 0.

Jednostką natężenia światła jest kandela albo świeca międzynarodowa. Jest to natężenie z jakim świeci w określonym kierunku źródło emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości $540 \cdot 10^{12}$ Hz, i którego gęstość mocy w tym kierunku jest równa 0,001464 W/sr. Kandela jest jedną z podstawowych jednostek układu SI.

Jednostką strumienia świetlnego jest lumen [lm]. Lumen jest to strumień świetlny punkowego źródła światła o natężeniu 1 kandel w obrębie kąta bryłowego równego 1 steradianowi ($1 \text{ lm} = 1 \text{ cd/sr}$). Jeżeli źródło jest izotropowe, to całkowity strumień wynosi 4π lumenów.

Kolejną ważną wielkością jest **oświetlenie**. Oświetleniem powierzchni nazywamy wielkość:

$$E = \Delta\Phi / \Delta S \quad (2)$$

gdzie ΔS jest fragmentem powierzchni prostopadłym do strumienia świetlnego. Jednostką oświetlenia jest luks (lx); jest to oświetlenie jakie daje strumień 1 lumena padający prostopadle na powierzchnię 1 metra kwadratowego.

W ogólnym przypadku zależność między oświetleniem a natężeniem przybiera postać:

$$E = (I / r^2) \cos \alpha \quad (3)$$

gdzie α jest kątem między osią strumienia świetlnego a normalną do oświetlanej powierzchni, a r jest odległością oświetlanej powierzchni od źródła światła.

Wzór (3) przedstawia prawo Lamberta, inaczej zwane “prawem odwrotnych kwadratów”. Prawo to jest słuszne jedynie dla tzw. punktowych źródeł światła czyli źródeł o rozmiarach niewielkich w porównaniu z odległością źródła od obserwatora. Prawo Lamberta można stosować dla wszystkich źródeł, których średnica jest ponad 10-krotnie mniejsza od odległości źródła od oświetlanej powierzchni.

Gdy strumień pada prostopadłe do oświetlanej powierzchni (tak jak w tym ćwiczeniu) $\cos \alpha$ przybiera wartość 1. Wówczas zależność (1) sprowadza się do wzoru:

$$E = I/r^2 \quad (4)$$

W praktyce źródła światła są świecącymi powierzchniami. W takim przypadku podanie samego natężenia I nie wystarcza do określenia właściwości świetlnych źródła. Gdy mamy dwa źródła o jednakowym natężeniu i jeśli mają one różne rozmiary, to dla oka obserwatora “jaśniejsze” (bardziej jaskrawe) będzie wydawało się źródło o mniejszych wymiarach. Aby uwzględnić ten efekt, wprowadzono fotometryczną wielkość zwaną **luminancją** (inne stosowane nazwy to blask bądź jaskrawość). Jej wartość wyraża się stosunkiem natężenia I do powierzchni źródła σ .

$$B = I/\sigma \quad (5)$$

Jednostką luminancji jest 1 stilb [1 cd/m^2].

Wymagane wiadomości teoretyczne

1. Natura światła.
2. Powstawanie akcji laserowej:
pojęcia: inwersja obsadzeń, pompowanie optyczne.
3. Charakterystyka pracy lasera.
4. Cechy promieniowania laserowego: monochromatyzm, spójność (koherentność); równoległość (kolimacja)
5. Polaryzacja światła.
6. Prawo Malusa.
7. Prawo Lamberta.
8. Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia.
9. Zasada działania światłowodu.
10. Podstawowe wielkości i jednostki świetlne.

Literatura

1. M.A. Herman, A. Kalestyński, L. Widomski, „Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie i studentów”, PWN, Warszawa 1995.
2. F. Jaroszyk, „Biofizyka”, PZWL, Warszawa 2008, wyd. 2.
3. „Encyklopedia fizyki współczesnej”, PWN, Warszawa 1983.
4. „Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii”, pod redakcją A. Z. Hryniewicz i E. Rokity, PWN, Warszawa 2000.
5. „Fotodynamiczna metoda rozpoznawania i leczenia nowotworów”, pod redakcją A. Graczyk, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
6. T. Dryński, „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki”, PWN, Warszawa 1980.