

## PODSTAWY FIZYCZNE MEDYCZNYCH ZASTOSOWAŃ LASERÓW

\* Instytut Elektroniki Kwantowej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie

\*\* Katedra i Klinika Urologii Akademii Medycznej w Warszawie

### 1. Zasada działania laserów

Zasada działania lasera wynika wprost z rozwinięcia skrótu **LASER** - **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation - wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania. Fenomen lasera nie jest zawarty w sposobie działania czy konstrukcji, lecz w rodzaju światła jakie urządzenie to emituje. Jest to bardzo skupiona wiązka światła monochromatycznego, czyli o jednej, ściśle określonej barwie (długości fali). Cechy te dają laserowi niezwykłą przewagę nad innymi źródłami światła.

W laserze wykorzystuje się efekty wzajemnego oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią - tzw. **ośrodkiem aktywnym**, którym może być ciało stałe, ciecz lub gaz. W wyniku tego oddziaływania zachodzą zjawiska prowadzące do **wzmocnienia i generacji promieniowania**. Praca generatora promieniowania (lasera) polega na wykorzystaniu przejść kwantowych między dyskretnymi poziomami atomów, jonów lub cząstek materiału, spełniającego warunki wzmocnienia. Rysunek 1a przedstawia tzw. boltzmannowski rozkład obsadzenia poziomów energetycznych. Gdy **układ kwantowy**, np. zbiór atomów, znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej w temperaturze  $T$ , obsadzenie poszczególnych jego poziomów energetycznych wyznacza zależność:

$$N_i = C \times \exp(-E_i/kT)$$

gdzie:  $N$  - ilość atomów posiadających energię  $E$ ,

$k$  - stała Boltzmanna,

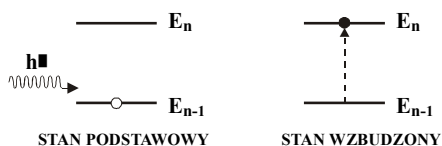
$C$  - stała charakterystyczna dla danego układu kwantowego.

Na osi poziomej rysunku 1a i 1b przedstawiono liczbę atomów  $N_i$ , na osi pionowej - najbardziej prawdopodobną energię  $E_i$  jaką mają te atomy; przy czym  $E_3 > E_2 > E_1$ . Oznacza to, że najliczniej obsadzone są poziomy energetyczne o najniższej energii.

W wyniku pobudzenia ośrodka aktywnego (np. lampą wyładowczą, silnym polem elektrycznym, innym laserem) dochodzi do wzbudzenia atomów tego ośrodka do wyższego poziomu energetycznego. Więcej atomów znajduje się w stanie wzbudzonym  $E_2$  niż w podstawowym  $E_1$  (przed pobudzeniem), co z kolei daje efekt tzw. **inwersji obsadzeń**. Zjawisko to jest niestabilne. Wzbudzony ośrodek aktywny może powrócić do stanu podstawowego w wyniku przejścia promienistego (z emisją fotonu) lub przejścia bezpromienistego (zderzenia między atomami).

Emisja fotonu może odbywać się w sposób spontaniczny lub wymuszony (stymulowany), działaniem promieniowania elektromagnetycznego. Jeżeli na ośrodek aktywny znajdujący się w stanie inwersji obsadzeń będzie oddziaływać dalej promieniowanie o częstotliwości

**Ryc. 1.** Poziomy energetyczny układ kwantowy w stanie nie wzbudzonym (a) oraz w stanie wzbudzonym (b).



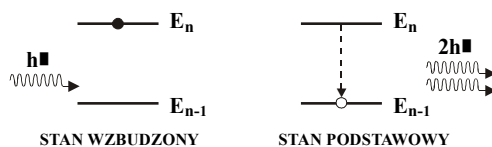
Układ kwantowy w wyniku pochłonięcia porcji energii o wartości  $E=h\nu$  przechodzi ze stanu podstawowego  $E_{n-1}$  do stanu wzbudzonego  $E_n$  ( $E_n - E_{n-1} = h\nu$ )

#### EMISJA SPONTANICZNA



Układ kwantowy znajdujący się w stanie wzbudzonym o energii  $E_n$  przechodzi do stanu podstawowego  $E_{n-1}$  z emisją kwantu promieniowania o energii  $E=h\nu$

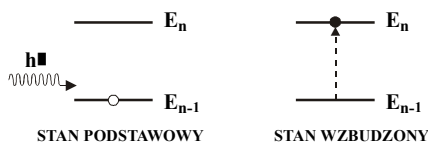
#### EMISJA WYMUSZONA



Układ kwantowy znajdujący się w stanie wzbudzonym o energii  $E_n$  po pochłonięciu porcji energii  $h\nu$ , przechodzi do stanu podstawowego  $E_{n-1}$  z emisją promieniowania o energii  $E=2h\nu$ .

Zamiast jednego kwantu wchodzącego do układu mamy na jego wyjściu dwa jednakowe kwanty energii, co oznacza wzmocnienie promieniowania.

#### ABSORPCJA



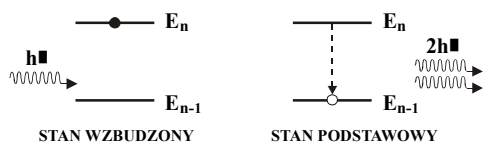
Układ kwantowy w wyniku pochłonięcia porcji energii o wartości  $E=h\nu$  przechodzi ze stanu podstawowego  $E_{n-1}$  do stanu wzbudzonego  $E_n$  ( $E_n - E_{n-1} = h\nu$ )

#### EMISJA SPONTANICZNA



Układ kwantowy znajdujący się w stanie wzbudzonym o energii  $E_n$  przechodzi do stanu podstawowego  $E_{n-1}$  z emisją kwantu promieniowania o energii  $E=h\nu$

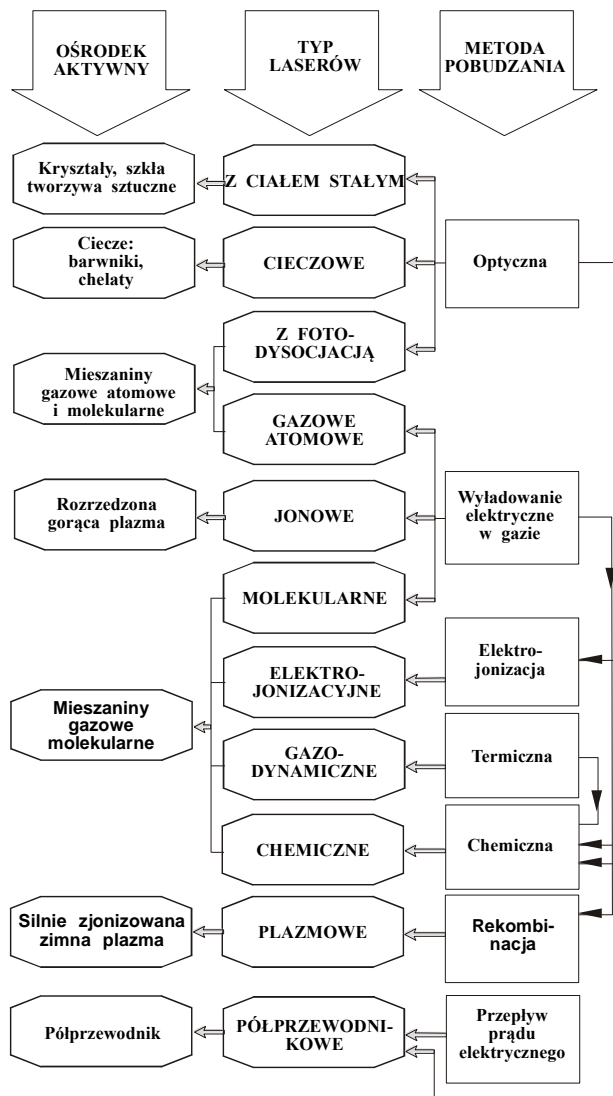
#### EMISJA WYMUSZONA



Układ kwantowy znajdujący się w stanie wzbudzonym o energii  $E_n$  po pochłonięciu porcji energii  $h\nu$ , przechodzi do stanu podstawowego  $E_{n-1}$  z emisją promieniowania o energii  $E=2h\nu$ .

Zamiast jednego kwantu wchodzącego do układu mamy na jego wyjściu dwa jednakowe kwanty energii, co oznacza wzmocnienie promieniowania.

$\nu = (E_2 - E_1)/h$ , gdzie  $h$  jest stałą Plancka ( $h\nu$  - energia kwantu promieniowania), to dochodzi do tzw. **emisji wymuszonej**, gdzie jeden kwant promieniowania o odpowiedniej energii wyzwala drugi kwant, nie tracąc przy tym swojej energii. Zamiast jednego kwantu wchodzącego do ośrodka aktywnego, na jego wyjściu mamy dwa jednakowe kwanty, co oznacza wzmocnienie promieniowania. Omówioną sytuację ilustruje rysunek 2. Promieniowanie lasera charakteryzuje się tym, że foton wygenerowany w wyniku emisji wymuszonej ma ten sam kierunek co foton wymuszający, taką samą częstotliwość i fazę. Są to jednocześnie podstawowe cechy promieniowania laserowego: kierunkowość, monochromatyczność, koherentność (spójność) i duża gęstość energii.



Ryc. 3. Podział laserów ze względu na ośrodek aktywny i sposób pobudzenia.

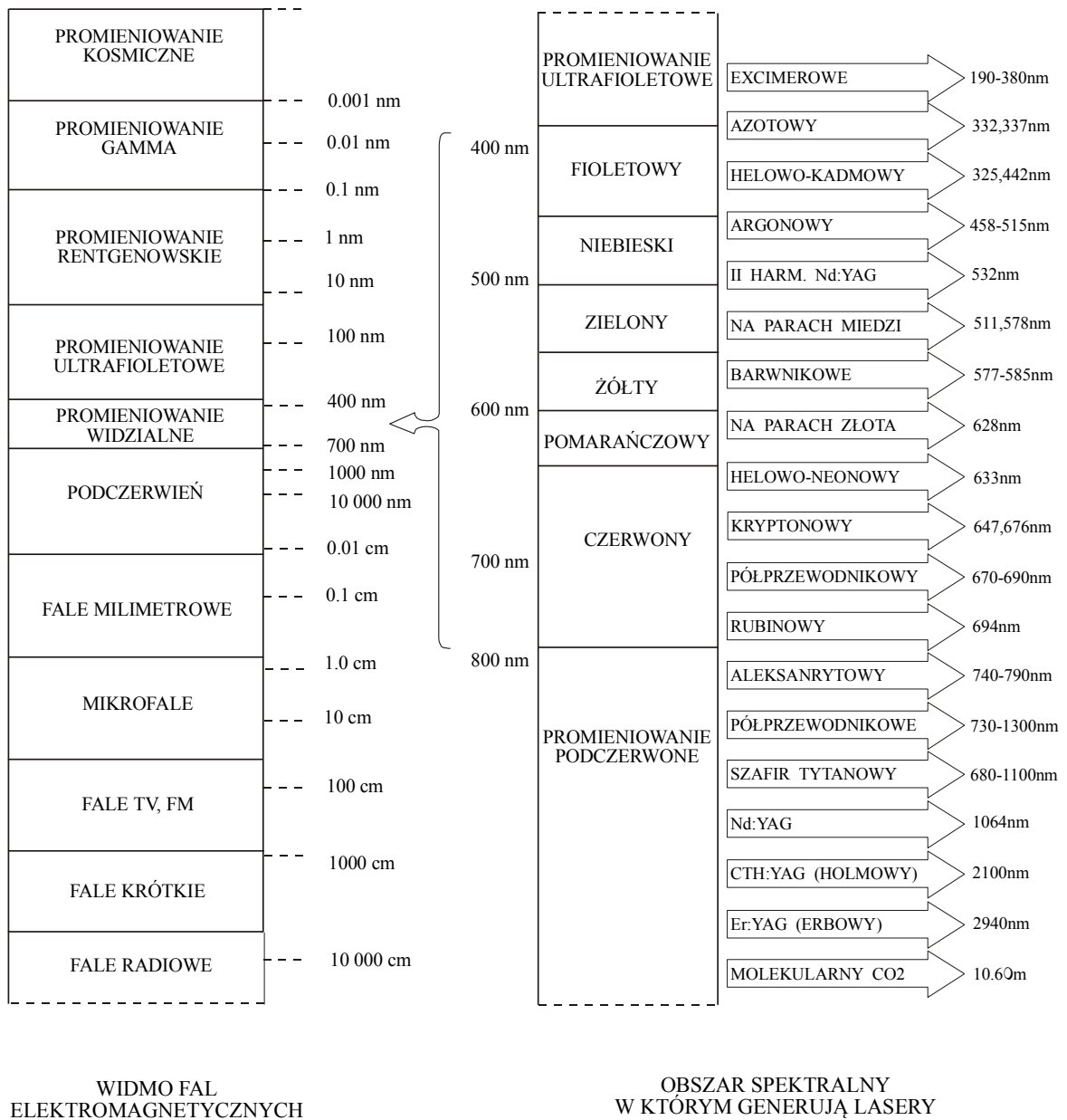
Z powyższego opisu działania lasera wynika, że musi on zawierać materiał aktywny

(ośrodek wzmacniający), źródło wzbudzenia (układ pompujący) i obszar umożliwiający wzmocnienie - rezonator.

## 2. Podział laserów

446

Lasery dzielą się ze względu na **materiał aktywny** i **sposób pobudzenia**. Stan skupienia ośrodków wzmacniających jest najbardziej ogólnym i najczęściej stosowanym kryterium podziału laserów. Materiał aktywny pozwala wyróżnić lasery: gazowe, cieczowe, na ciele stałym i półprzewodnikowe.



**Ryc. 4.** Widmo elektromagnetyczne z zaznaczeniem długości fal emitowanych przez typowe lasery stosowane w medycynie.

Ryc. 3 przedstawia podział laserów ze względu na ośrodek aktywny i sposób pobudzenia.

Rodzaj ośrodka aktywnego decyduje o generowanej długości fali (barwie) promieniowania. Znane dziś lasery generują promieniowanie od zakresu tzw. próżniowego ultrafioletowego (od 150nm) poprzez zakres widzialny (380-780nm) do dalekiej podczerwieni (300µm).

Ryc. 4 przedstawia widmo elektromagnetyczne z zaznaczeniem długości fal emitowanych przez typowe lasery stosowane w medycynie.

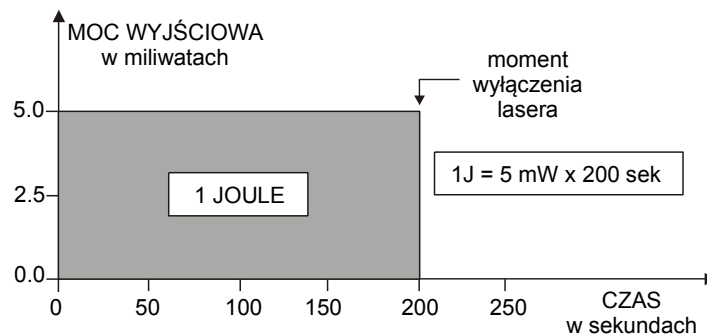
Do najczęściej stosowanych w medycynie laserów gazowych należą lasery na dwutlenku

447

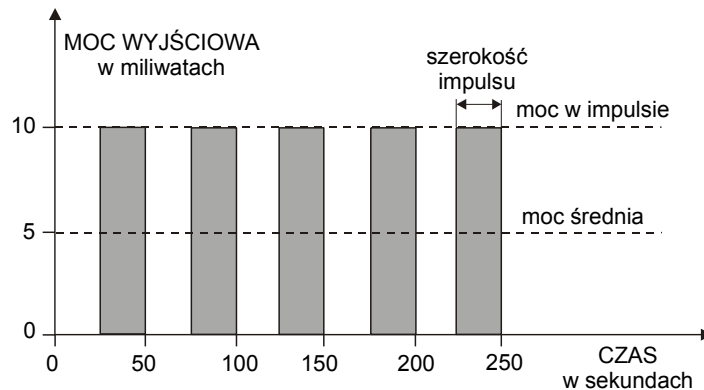
węgla CO<sub>2</sub>, helowo-neonowe He-Ne, lasery ekscymerowe, argonowe i kryptonowe.

Z laserów na ciele stałym najbardziej znane to lasery na kryształach granatu itrowo-aluminiowego (YAG) domieszkowanego neodymem Nd, erbem Er (laser erbowy) lub holmem Ho (laser holmowy). Laserów półprzewodnikowych wyróżnia się bardzo dużo, zależnie od materiałów wchodzących w skład danego półprzewodnika.

PRACA CIĄGŁA LASERA



PRACA IMPULSOWA LASERA



**Ryc. 5.** Schematyczne przedstawienie dwóch podstawowych sposobów zasilania i pracy lasera; a) praca ciągła, b) praca impulsowa.

**Sposób zasilania i generacji** dzieli lasery na ciągłego działania i impulsowe. Z wiązką ciągłą lasera mamy do czynienia wtedy, gdy moc lasera, mierzona w watach, pozostaje stała przez cały okres jego działania. Ryc. 5 ilustruje te dwa sposoby zasilania i jednocześnie pracy lasera. Z rysunku tego wynika również definicja dawki energetycznej promieniowania, która jest iloczynem mocy ciągłej i czasu działania lasera. W przypadku lasera impulsowego, aby określić jego dawkę energetyczną trzeba znać trzy parametry: moc w impulsie, szerokość impulsu, liczbę pojedynczych impulsów emitowanych w ciągu 1 sekundy. Mnożąc te trzy parametry przez siebie otrzymujemy tzw. średnią moc promieniowania.

Z punktu widzenia wartości **mocy promieniowania** lasery dzielimy na:

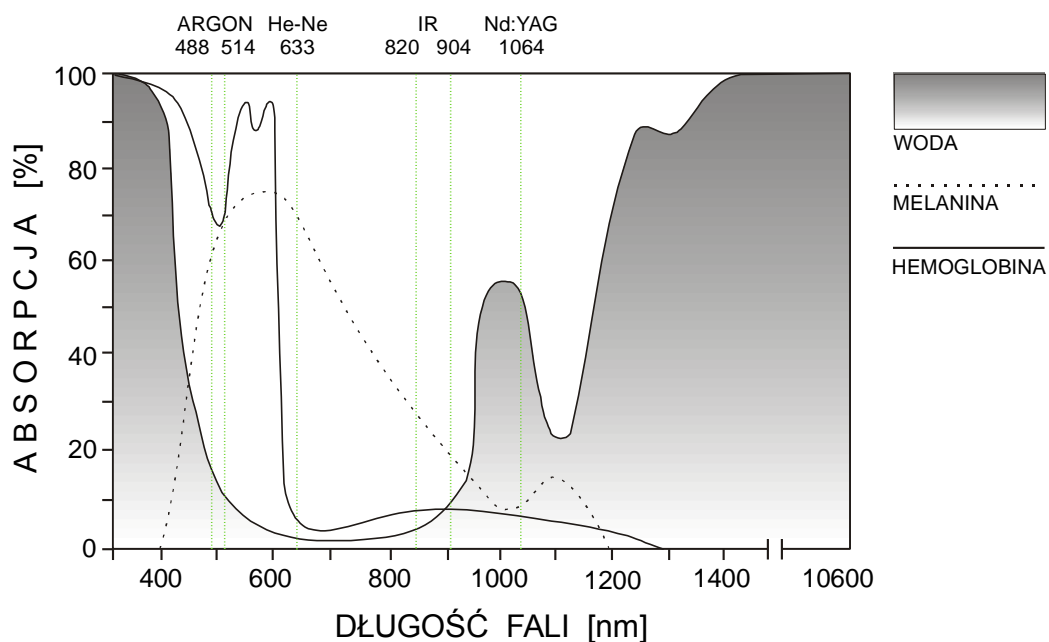
- małej mocy (od 4 do 5mW),
- średniej mocy (od 6 do 500mW),
- dużej mocy > 500mW.

Lasery małej i średniej mocy zaliczane są do laserów biostymulacyjnych.

448

### 3. Oddziaływanie promieniowania laserowego na tkankę biologiczną

Charakter tego oddziaływania zależy w dużej mierze od parametrów promieniowania laserowego i własności (głównie absorpcyjnych) tkanki biologicznej, a także od czasu ekspozycji. Promieniowanie padające na tkankę biologiczną ulega odbiciu od niej, rozproszeniu i pochłanianiu. W zależności od rodzaju tkanki, stanu jej powierzchni (np. kolor skóry), kąta padania, promieniowanie laserowe może zostać odbite (np. od skóry nawet w granicach 43-55%). Wartość współczynnika odbicia od tego samego rodzaju tkanki zależy jeszcze od wieku i płci osób poddanych naświetleniu. Współczynnik odbicia jest najmniejszy dla promieniowania laserowego padającego prostopadłe do powierzchni tkanki.



**Ryc. 6.** Widmo absorpcji wody i podstawowych barwników tkanek: melaniny i hemoglobiny.

Głębokość wnikania promieniowania laserowego w tkankę zależy przede wszystkim od

długości fali promieniowania laserowego. I tak np. maksimum transmisji (przepuszczalności) skóry przypada na pasmo 800-1200nm.

Zróznicowanie wartości współczynnika absorpcji dla różnych rodzajów tkanek ilustruje ryc. 6. W zależności od mocy promieniowania i czasu działania promieniowania laserowego na tkankę rozróżnia się następujące typy oddziaływania: fotochemiczne, ciepłe (koagulacja, odparowanie), fotoablacyjne, elektromechaniczne.

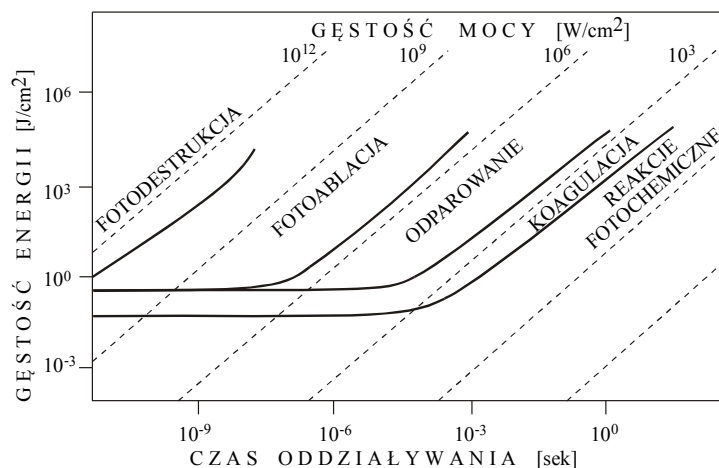
Zakres występowania tych różnych typów oddziaływań ilustruje ryc. 7, gdzie uwzględniono również inny ważny parametr wiązki laserowej jakim jest gęstość mocy promieniowania laserowego, czyli stosunek jego mocy do pola powierzchni na którą pada wiązka.

**Reakcje fotochemiczne** mają miejsce przy bardzo małych wartościach gęstości mocy promieniowania laserowego  $< 10\text{mW/cm}^2$ . Prowadzą one do wzrostu wymiany energii między komórkami biologicznymi w wyniku zmiany syntezy ATP, hiperpolaryzacji błony komórkowej, przyspieszenia mitozy itp. Ten rodzaj oddziaływania promieniowania laserowego na tkankę biologiczną wykorzystuje się w biostymulacji.

Oddziaływanie ciepłe ma miejsce dla gęstości mocy  $> 1\text{W/cm}^2$ . Do temperatury  $45^\circ\text{C}$  nie obserwuje się specjalnych zmian tkanki. W pobliżu  $45^\circ$  (hipertemperatura) obserwuje się zapadanie tkanki w wyniku rozrywania makromolekul oraz zmiany struktury błony komórkowej. W zakresie  $45 - 60^\circ\text{C}$  rozrywane zostają błony komórek, a proteiny wychodzące na zewnątrz

449

tworzą łańcuchy, występuje spiekanie tkanek. Przy temperaturze  $60^\circ\text{C}$  następuje nekroza tkanek w wyniku koagulacji, a przy  $100^\circ\text{C}$  ostra nekroza i pełne rozbitcie struktur tkanki. Przy  $150^\circ\text{C}$  tkanka szybko odparowuje. Tego typu oddziaływania wykorzystuje się przede wszystkim w chirurgii.



Ryc. 7. Zakresy występowania różnych typów oddziaływań promieniowania laserowego na tkankę biologiczną.

**Efekty ablacyjne** występują w przypadku oddziaływania krótkich impulsów o wartości gęstości mocy  $> 1\text{MW/cm}^2$  na tkankę charakteryzującą się dużą wartością współczynnika absorpcji. W wyniku oddziaływania lasera, w tkance na bardzo małej głębokości wnikania (kilka  $\mu\text{m}$ ), zachodzą procesy dysocjacji molekul, następuje gwałtowne rozerwanie struktur komórkowych i ich wyrzucenie. Pozostała część tkanki nie jest podgrzana. Oddziaływanie to wykorzystuje się dotąd głównie w okulistyce.

**Oddziaływanie elektromechaniczne** występuje przy bardzo dużych wartościach gęstości mocy  $> 100\text{MW/cm}^2$  i nie zależy od wartości współczynnika absorpcji tkanki. Wykorzystuje

się je w tkankach o dużej wartości transmisji dla promieniowania laserowego. Impuls laserowy o bardzo dużej mocy skupiony zostaje na małej powierzchni. W miejscu skupienia występuje bardzo silne pole elektryczne, rzędu  $10^9$  V/cm, które powoduje jonizację tkanki. Następuje efekt optycznego przebicia - powstaje mikroplazma. Plazma ta zaczyna się bardzo szybko rozszerzać (szybciej niż prędkość dźwięku) generując falę uderzeniową. Ta ostatnia wytwarza siły mechaniczne niszczące strukturę tkanki. Oddziaływanie elektromechaniczne wykorzystywane jest głównie w mikrochirurgii przedniego odcinka oka.

### **P i ś m i e n n i c t w o**

1. L.V. Tarasov, "Laser Physics", Mir Publishers, Moscow, 1983
2. F. Kaczmarek, "Wstęp do fizyki laserów", PWN, Warszawa 1986.
3. K. Shimoda, "Wstęp do fizyki laserów", PWN, Warszawa 1993.
4. Yu. Yakushenkov, "Electro-optical devices. Theory and Design", MIR Publishers, Moscow 1983.
5. R. Józwicki, "Optyka laserów", WNT, Warszawa 1981.
6. U. Brinkmann, "Laser find use in wide range of medical procedures", L.F.World European E-O summer 92, 15.
7. G.T. Abstern, S.N. Joffe, "Lasers in Medicine-an Introductory Guide", 2 end, Chapman and Hall, London, 1989, ISBN 0-412-30870-3.
8. E.Mester et al, "The Biomedical Effect of Laser Application in Surgery and Medicine", 31-39,1985.
9. J.A. Dixon, "Surgical Application of Lasers", Year Book Medical Pub., Chicago 1983.
10. L. Pokora, "Lasery w stomatologii", Laser Instruments, Warszawa 1992.
- 11."Zastosowanie laserów w medycynie", VII Szkoła Optoelektroniki, 10-15.V. Zegrze/k.Warszawy 1993.

Otrzymano: 1993.10.15