



wykład 7

Lasery w medycynie

Prof. Dr Halina Abramczyk

Technical University of Lodz, Faculty of Chemistry

Institute of Applied Radiation Chemistry

Poland, 93-590 Lodz, Wroblewskiego 15

Phone:(+ 48 42) 631-31-88; fax:(+ 48 42) 684 00 43

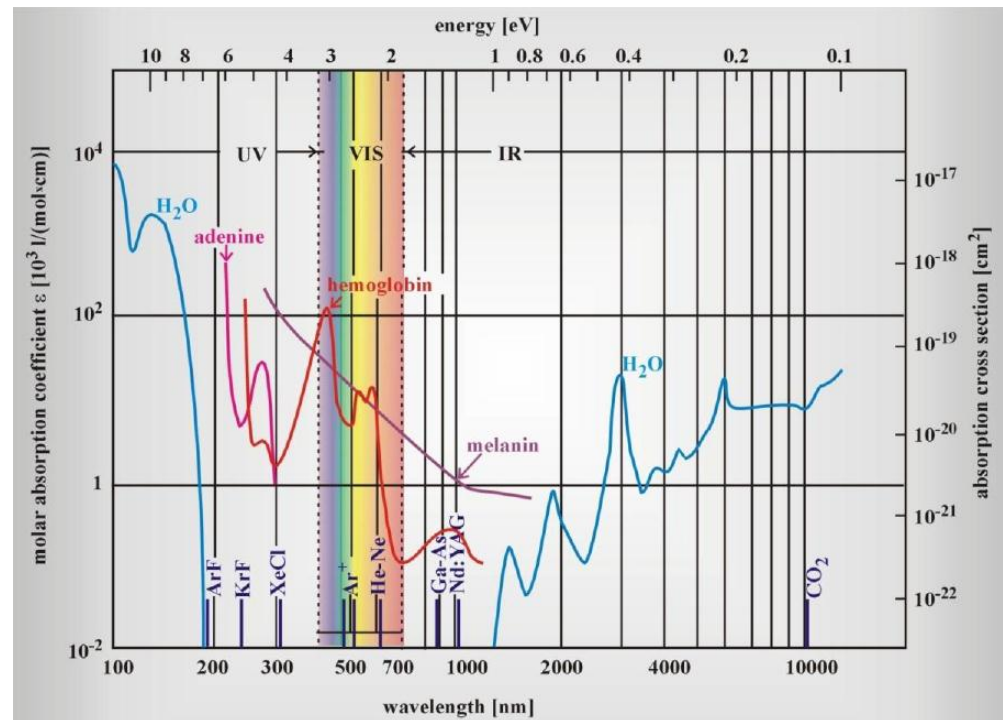
[E-mail:abramczy@mitr.p.lodz.pl](mailto:abramczy@mitr.p.lodz.pl) <http://mitr.p.lodz.pl/evu>

<http://mitr.p.lodz.pl/raman>

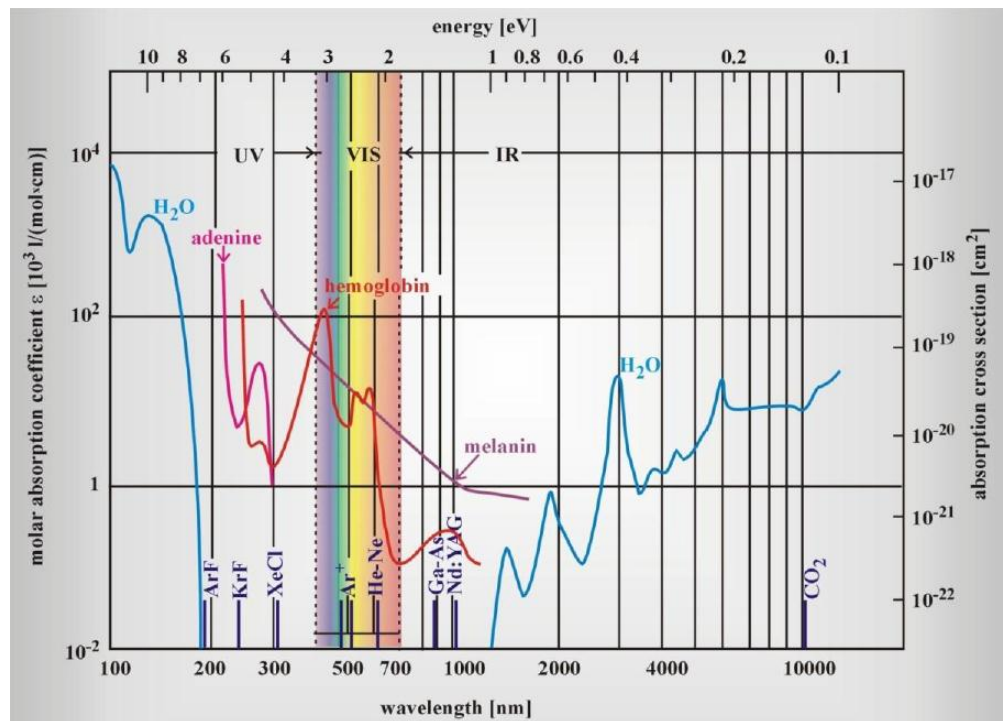
Oddziaływanie promieniowania laserowego z tkanką biologiczną

O oddziaływaniu promieniowania laserowego z tkanką decyduje głównie natężenie promieniowania [W/cm^2], które zależy od energii i czasu trwania impulsu oraz zakresu widmowego światła laserowego. Interakcje zależą również od właściwości termicznych tkanek, takich jak przewodnictwo cieplne, pojemność cieplna i współczynniki odbicia, rozpraszania i pochłaniania.

Oddziaływanie promieniowania laserowego z tkanką biologiczną



Zestawienie widm absorpcyjnych głównych składników tkanek : melanina, hemoglobina, woda i białka.



Rysunek przedstawia widma absorpcyjne głównych absorbentów tkankowych. Obszar IR (2000-10000nm) pochodzi od wody, która jest głównym składnikiem tkanki. Białka absorbują w obszarze UV (200-300nm), a w obszarze VIS absorbują pigmenty: hemoglobina we krwi, melanina - podstawowy chromofor skóry.

Właściwości absorpcyjne głównych biologicznych absorberów decydują o głębokości penetracji wiązki laserowej.

Porównanie głębokości penetracji tkanki miękkiej dla kilku typów laserów.

Typ lasera	Długość fali [μm]	Głębokość penetracji [mm]
CO ₂	10.60	ok. 0.10
Nd:YAG	1.06	ok. 6.00
Ar ⁺	0.4880, 0.5145	ok. 2.00
ekscymerowe	0.193 – 0.351	ok. 0.01

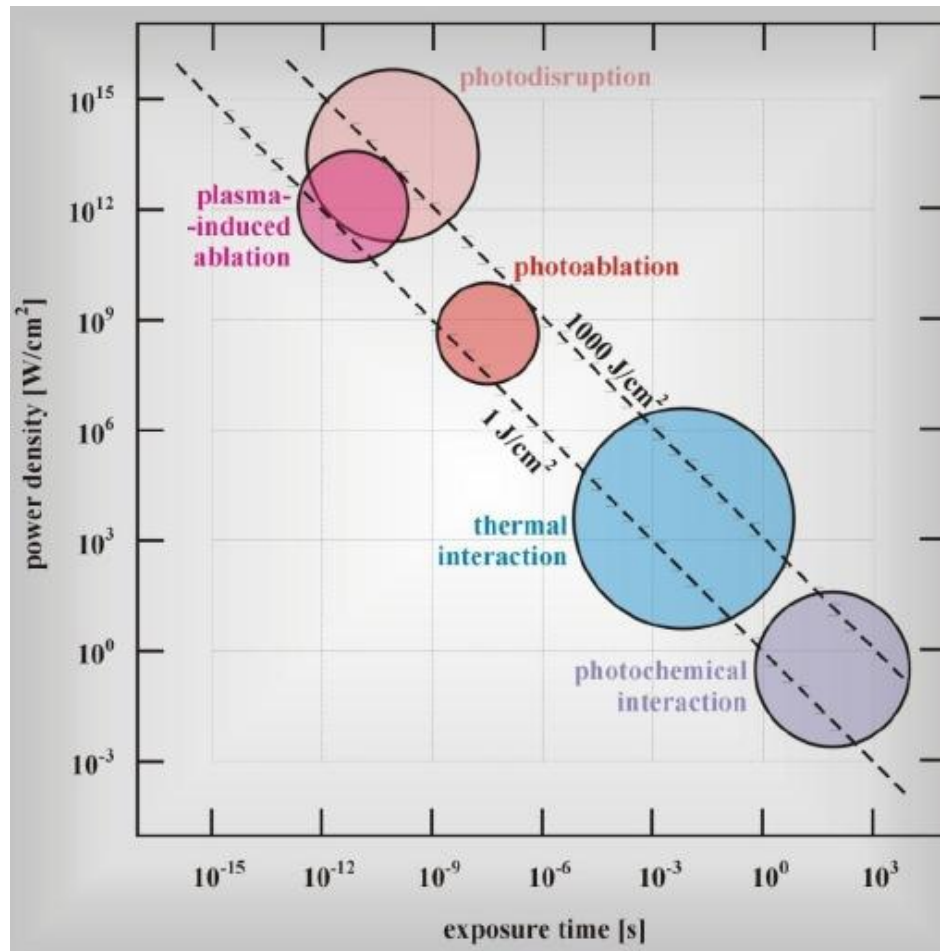
Penetracja lasera CO₂ (10.6 μm) w wodzie jest mniejsza niż lasera Nd:YAG (1064nm) ponieważ, światło lasera Nd:YAG ma niższą absorpcję przez wodę, pigmenty czy białka i właśnie ta właściwość decyduje o medycznych zastosowaniach laserów.

- *Nd:YAG penetruje głębiej, bezkrwawemu cięciu towarzyszy koagulacja.*
- *Laser CO₂ jest lepszy jako „skalpel” do precyzyjnego cięcia tkanki, towarzyszy wyparowanie wzdłuż wąsko zogniskowanej drodze optycznej promieniowania.*

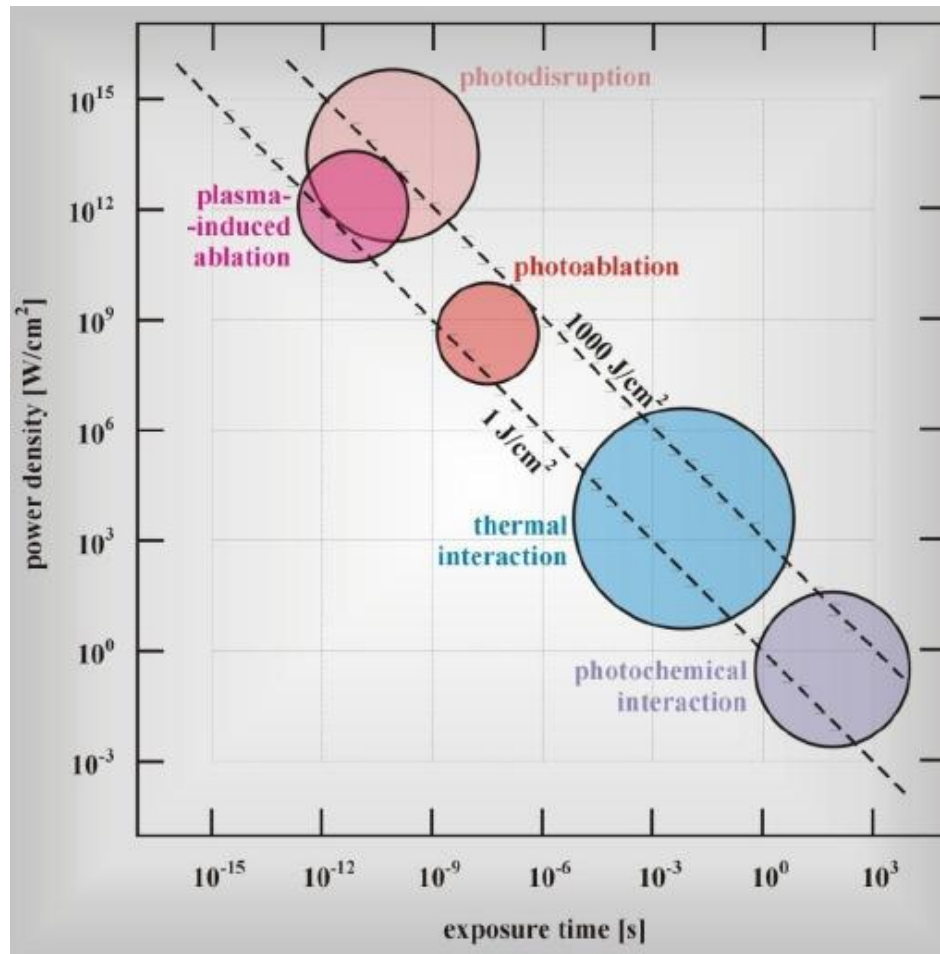
Mechanizmy oddziaływań promieniowania laserowego z tkanką biologiczną

- ***efekty fotochemiczne***
- ***efekty termiczne***
- ***fotoablacja***
- ***ablacja generowana plazmą***
- ***„photodisruption”***

Rodzaje oddziaływań promieniowania laserowego z tkanką



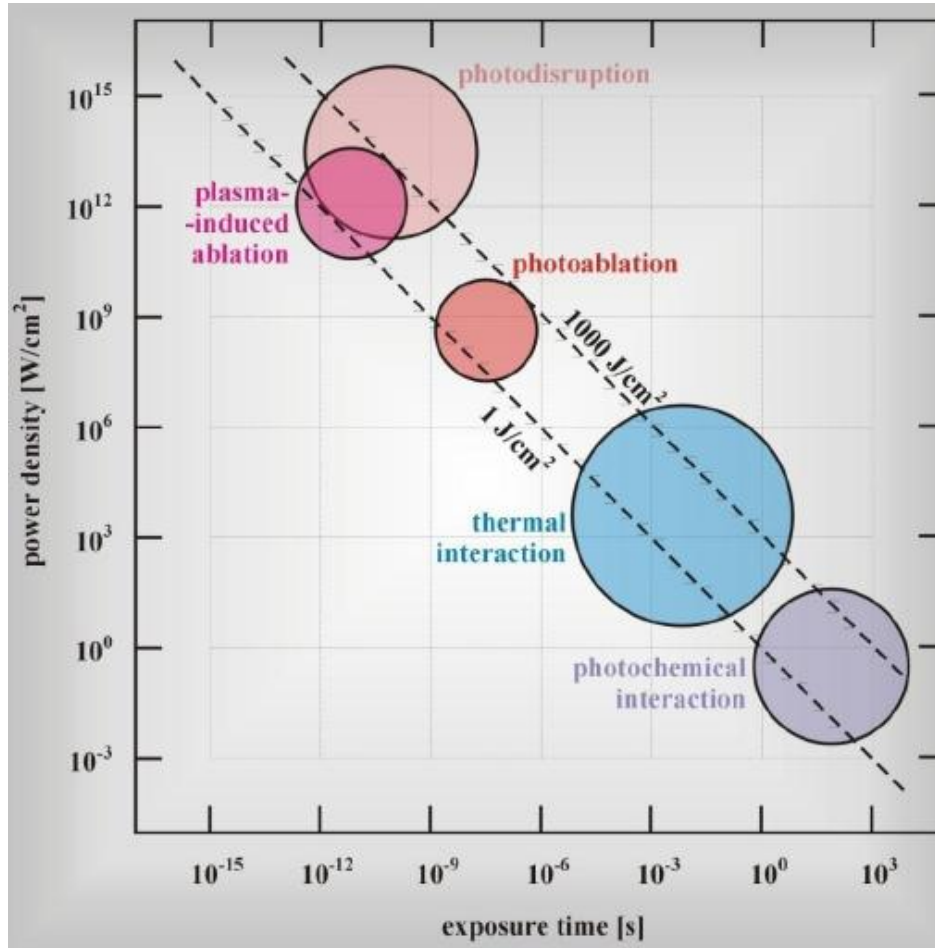
Podwójnie logarytmiczny wykres gęstości mocy promieniowania w funkcji czasu oddziaływania. Okręgi pokazują parametry laserów przypisane poszczególnym typom oddziaływań lasera z tkanką



Rysunek przedstawia główne typy oddziaływania promieniowania laserowego z tkanką biologiczną. Wszystkie typy oddziaływań są położone pomiędzy dwoma prostymi opisującymi przepływ energii, między $1 \text{ J}/\text{cm}^2$ a $1000 \text{ J}/\text{cm}^2$. Jest to przedział przepływu energii wykorzystywany przez lasery medyczne. Przepływ energii kontrolowany jest jednocześnie przez wartość energii (czas ekspozycji) i stopień zogniskowania wiązki lasera na tkance.

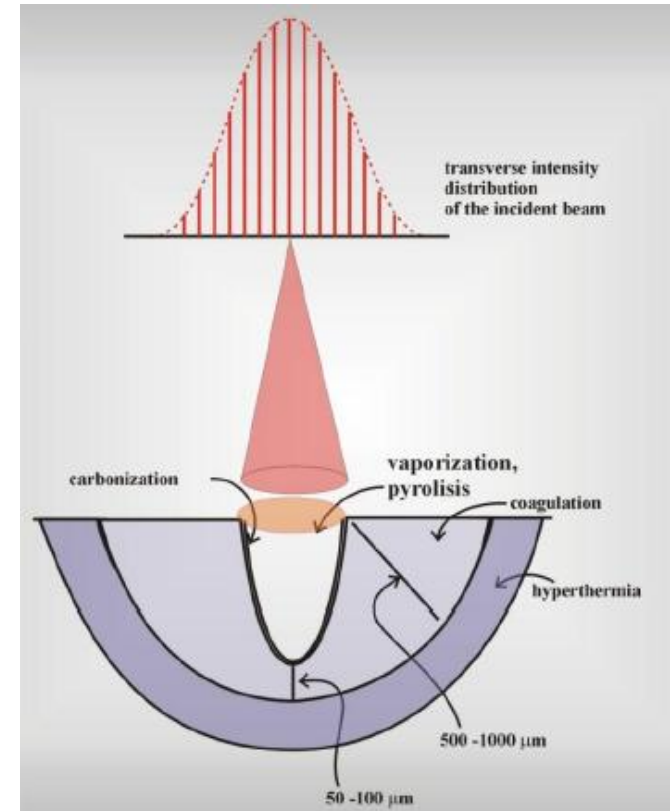
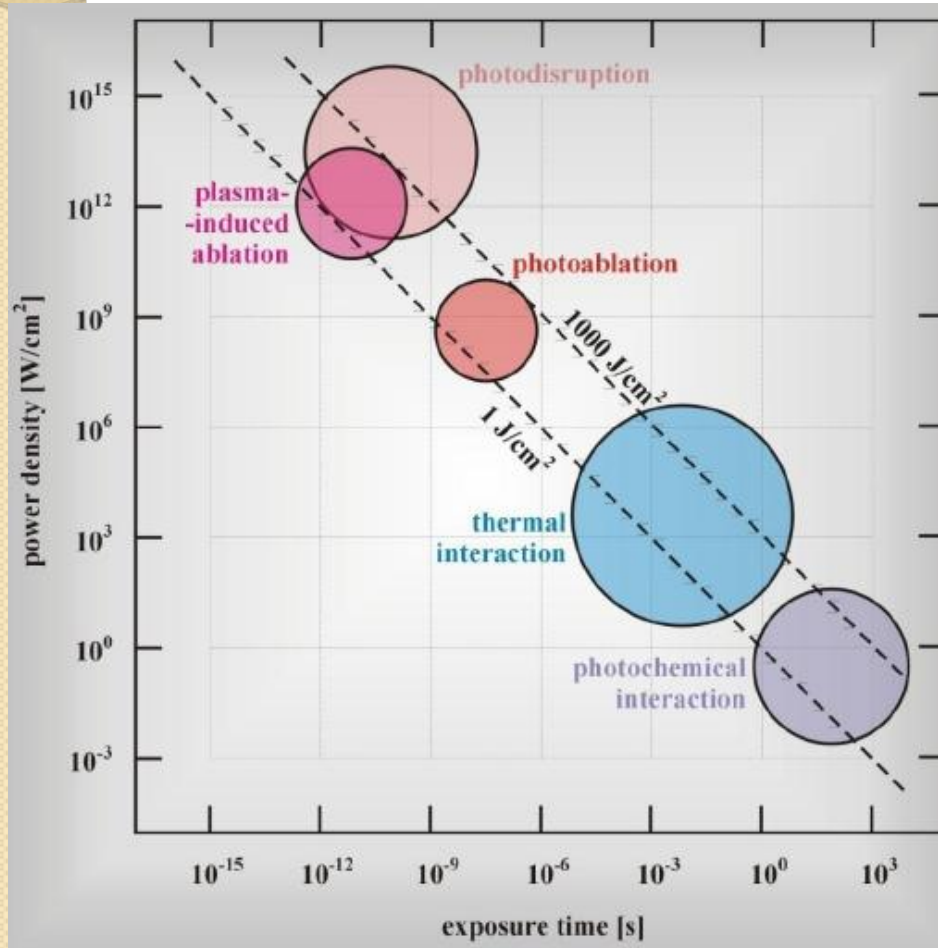
Efekt fotochemiczny

Efekt fotochemiczny wywołują lasery pracujące w reżimie ciągłym (cw) lub lasery z czasem ekspozycji $> 1s$. Moc laserów nie przekracza kilku mW.



Efekty termiczne

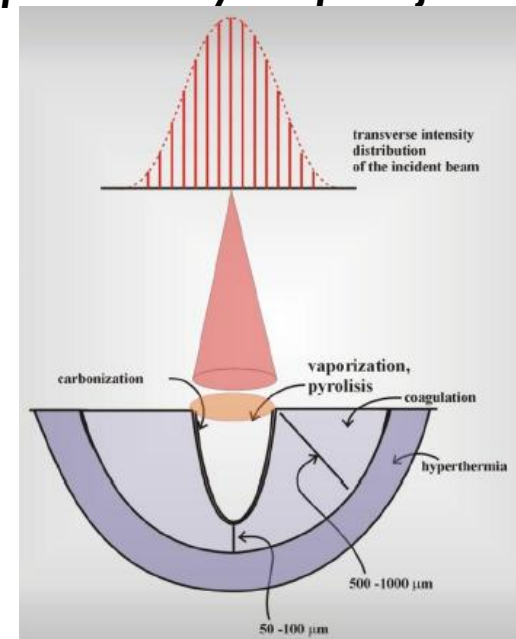
Dla efektów termicznych wykorzystywane są krótkie czasy ekspozycji (1 min-1 ms) i wysokie energie. Efekty te wywołane są zarówno przez lasery cw jak i lasery pulsacyjne o mocy 15-25W.



Efekty termiczne

Efekty termiczne indukowane są w tkance nas skutek lokalnego wzrostu temperatury w miejscu działania wiązki promieniowania. W porównaniu do efektów fotochemicznych, efekty termiczne mogą występować bez indukowania specjalnych mechanizmów reakcji i są wysoce nieselektywne i niespecyficzne. Efekty termiczne można sklasyfikować na podstawie osiągalnej wartości temperatury:

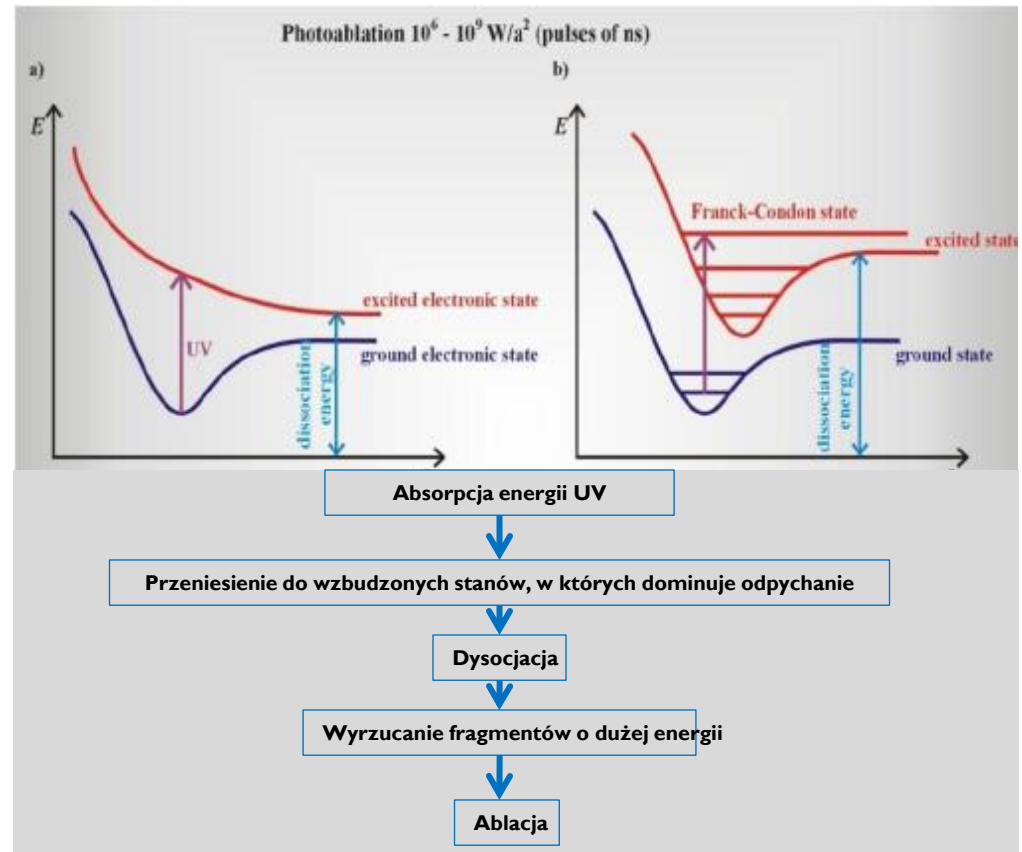
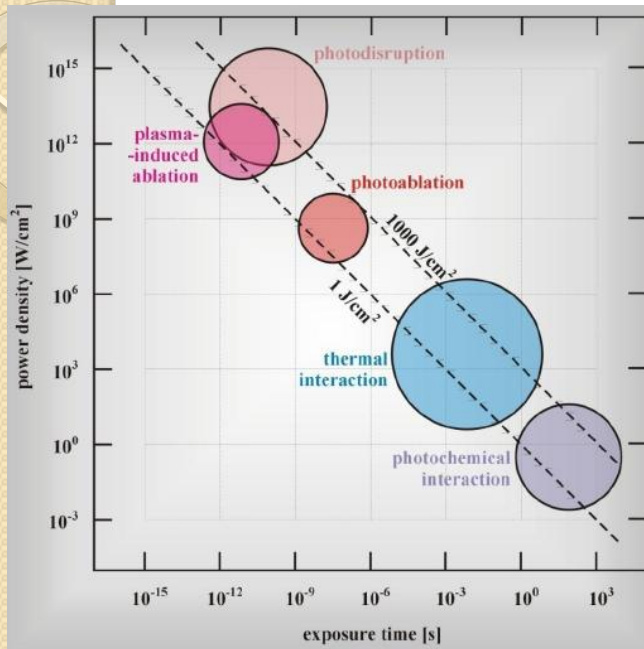
- **odwracalna hipertermia ($T > 31^{\circ}\text{C}$)** – część funkcji tkanki zostaje zaburzona odwracalnie
- **nieodwracalna hipertermia ($T > 42^{\circ}\text{C}$)** – część podstawowych funkcji tkanki zostaje zniszczona nieodwracalnie
- **koagulacja ($T > 60^{\circ}\text{C}$)** – tkanki ulegają nekrozie
- **wyparowanie ($T \geq 100^{\circ}\text{C}$)**
- **zwęglanie ($T > 150^{\circ}\text{C}$)**
- **piroliza ($T > 300^{\circ}\text{C}$)**



- **W chirurgii najczęściej wykorzystuje się tylko jeden dominujący efekt z wyżej wymienionych.**
 - **Wiązka lasera Nd:YAG pokonuje długą drogę w tkance powodując koagulację,**
 - **lasery CO₂ są bardziej odpowiednie do wyparowania.**

Fotoablacja

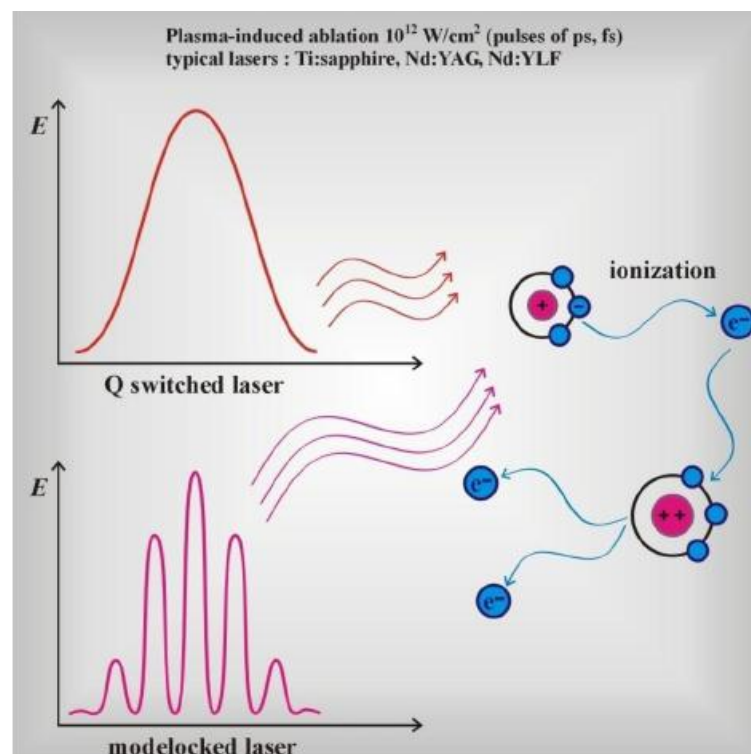
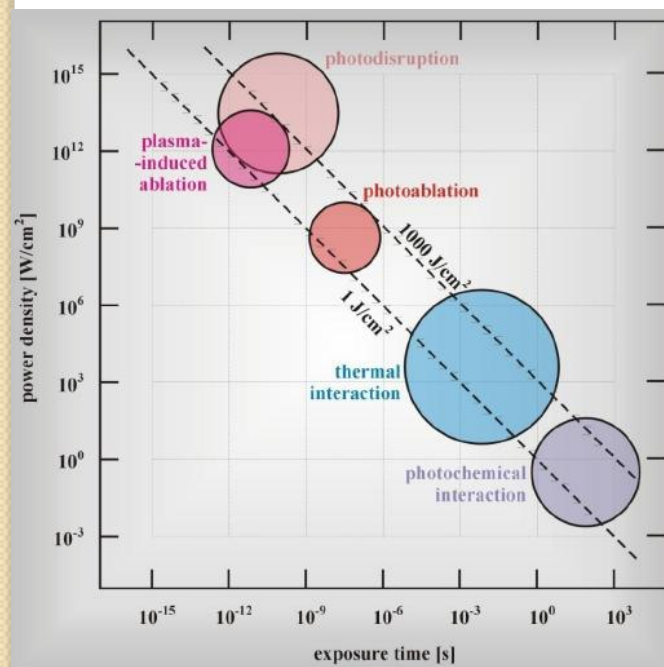
Fotoablacja występuje dla czasów ekspozycji w przedziale od 1ms do 1ns. W praktyce wykorzystuje się impulsy nanosekundowe ($10^6 - 10^9 \text{ W/cm}^2$).



Rysunek przedstawia mechanizm fotoablacji. Cząsteczka przechodzi na wyższy poziom wzbudzony (lub wibracyjny poziom wzbudzony (the Franck-Condon vibrationally hot state) ulegając dysocjacji. Wiązanie chemiczne ulega zerwaniu co prowadzi do zniszczenia tkanki. Przejścia elektronowe następują zazwyczaj w procesie fotoablacji UV i są ograniczone do laserów z zakresu UV. Oprócz laserów UV używane są również lasery ekscimerowe (ArF, KrF, XeCl, XeF) oraz lasery, które generują wyższe harmoniczne.

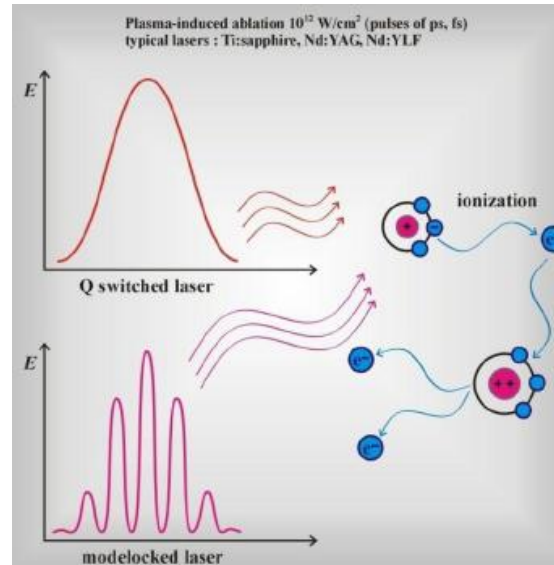
Ablacja plazmowa

Ablacja plazmowa i zniszczenie próbki (photodisruption) wykorzystują krótsze impulsy niż nanosekundowe. W praktyce używa się pico- i femtosekundowych impulsów o natężeniu 10^{12} W/cm². Obydwa zjawiska występują przy zbliżonym czasie ekspozycji na promieniowanie, różnią się gęstością promieniowania – niższą jest dla ablacji generowanej plazmą. Ablacja plazmowa jest oparta na jonizacji tkanki, a „photodisruption” podlega zaburzeniom mechanicznym.



Ablacja plazmowa

Typowymi laserami używanymi do generowania ablacji plazmowej są: Nd:YAG, Nd:YLF, tytanowo-szafirowy z impulsami piko- lub femtosekundowymi o natężeniach rzędu 10^{12} W/cm². Tak wysoka gęstość mocy prowadzi do pola 10^7 V/cm porównywalnego z energią elektronów w atomach. Dlatego też lasery Q-switched lub z synchronizacją modów mogą jonizować cząsteczki w tkance. Mechanizm ablacji plazmowej przedstawiony jest na rysunku.



Ultrakrótkie impulsy pochodzące z laserów Q-switched czy z laserów z synchronizacją modów jonizują tkankę i generują wysoką gęstość wolnych elektronów rzędu 10^{18} /cm³ w bardzo krótkim przedziale czasowym, której towarzyszy efekt lawinowy. Powstałe w wyniku jonizacji wolne elektrony przyspieszone do dużych energii zderzają się z innymi cząsteczkami powodując dalszą jonizację. Lekkie elektrony i ciężkie jony przemieszczają się z różnymi prędkościami prowadząc do podobnego efektu jak w fali akustycznej - obszar kompresji i rozszerzenia. Szczegóły mechanizmu zakłóceń dla ablacji generowanej plazmą opartej na podstawowych zależnościach elektrodynamiki i fizyki plazmy można znaleźć w wielu podręcznikach.

Zastosowanie laserów w medycynie

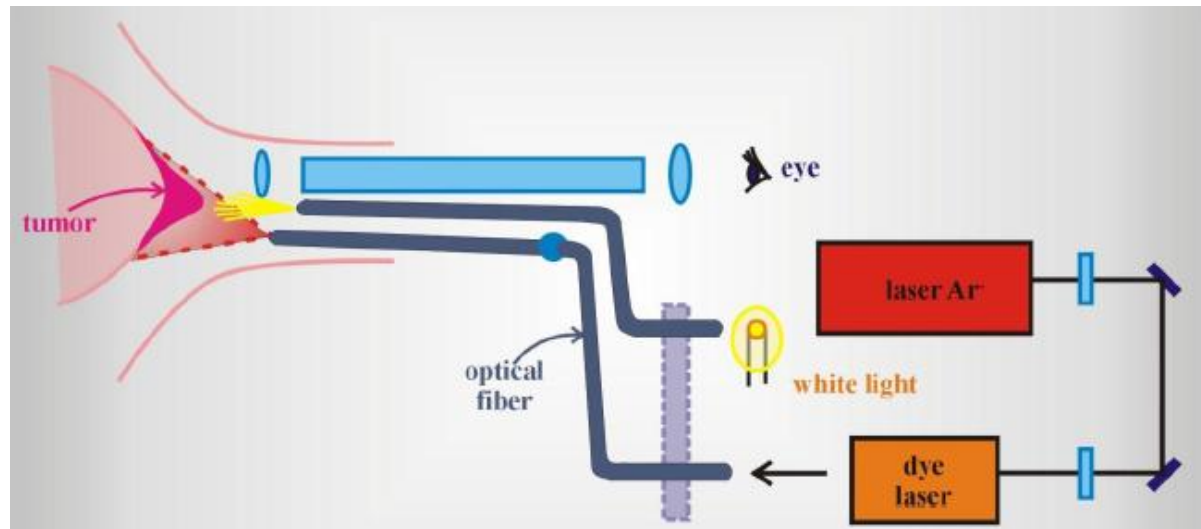
Lasery mają wiele ważnych zastosowań w:

- *stomatologii,*
- *leczeniu schorzeń sercowo-naczyniowych ,*
- *dermatologii,*
- *gastroenterologii (nauka o chorobach przewodu pokarmowego)*
- *ginekologii,*
- *neurochirurgii,*
- *okulistyce,*
- *laryngologii.*

Zastosowanie laserów w medycynie wymaga analizy zysków i strat.

Po pierwsze należy oszacować czy technika laserowa wniesie więcej zysku niż konwencjonalne techniki i która z nich może być tańsza.

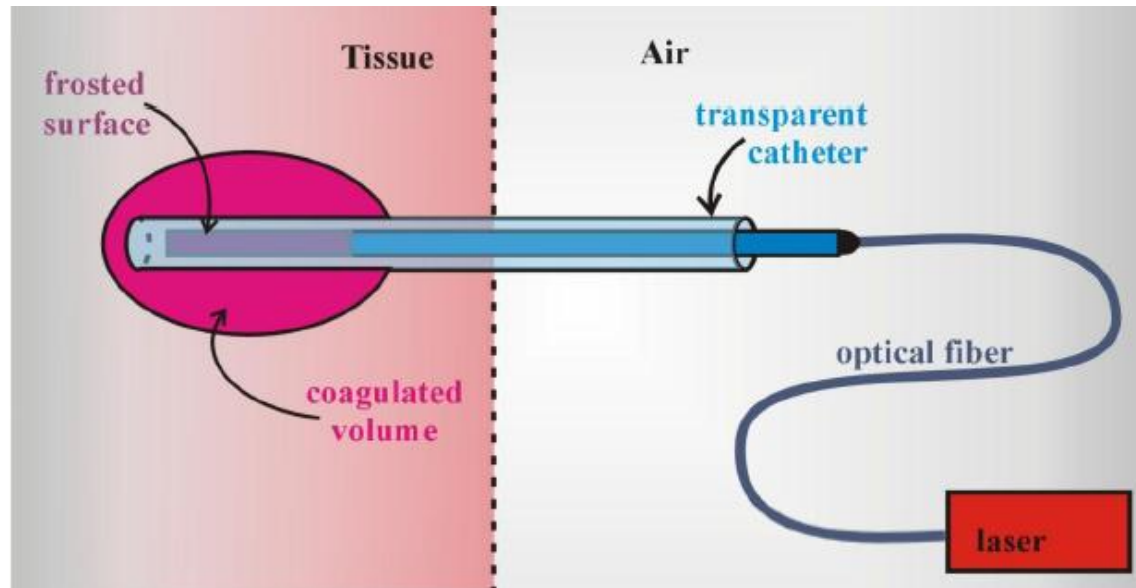
Po drugie, zastosowana technika powinna być oparta na zrozumieniu różnych parametrów, które mają wpływ na oddziaływanie laser – tkanka. W ostatnich latach zastosowanie laserów wzrosło i stało się bardziej atrakcyjne gdy zaczęto wykorzystywać światłowody. (Rysunek). W przeszłości lasery wykorzystywano tylko do badania powierzchni skóry.



Instalacja eksperymentalna dla termoterapii fotodynamicznej generowanej laserowo. Włókno umiejscowione w tkance z przezroczystym cewnikiem.

Zastosowanie lasera w chorobach naczyniowo - sercowych

Laser stosowany w chorobach naczyniowo- sercowych ma główne zastosowanie w angioplastyce do usuwania tworzących się skrzepów w naczyniach krwionośnych oraz w fotochemioterapii dzięki czemu możliwe jest ponowne unaczynienie. W leczeniu wykorzystuje się: reakcje termiczne, fotoablacje oraz wzajemne oddziaływania fotochemiczne. Laser stosowany w angioplastyce wykorzystuje efekt termiczny w celu odparowania materiału odkładającego się w świetle naczynia krwionośnego w przeciwieństwie do angioplastyki balonikowej, która powoduje zwiększenie średnicy naczynia krwionośnego. Na rysunku przedstawiona jest elastyczna cewka obrazująca zmianę chorobową, której wypełnienie musi być zredukowane. Angioplastyka termiczna wykorzystuje laser argonowy, Nd:NAG, oraz CO₂. Zmiany arteriosklerotyczne suwane są za pomocą fotoablacji, która powoduje minimalne uszkodzenia termiczne, które można osiągnąć za pomocą różnych laserów impulsowych UV, VIS oraz IR.



Instalacja eksperymentalna do indukowanej laserowo śródmiąższowo termoterapii. Włókno umiejscowione jest w tkance w przezroczystym cewniku.

Lasery w stomatologii

Jeśli lasery mogą ciąć metal lub inne twarde obiekty to czemu nie można ich użyć do borowania zębów??

Jednym z najbardziej oczywistych zastosowań laserów w stomatologii jest: usuwanie szkliwa, zębiny, kości, wypełnienia, zamiast uciążliwego dla pacjenta borowania. Głównym problemem w wykorzystaniu laserów dentystycznych (Er: YAG ($\lambda = 2,94 \mu\text{m}$), Er: YSGG ($\lambda = 2,79 \mu\text{m}$), holmowy, ekscimerowy, CO_2) do twardej tkanki : jest wzrost temperatury, który powoduje uszkodzenie miazgi zęba.

Najlepsze wyniki uzyskuje się przy jednoczesnym chłodzeniu tkanki strumieniem wody. FDA nie zatwierdziło procedur dotyczących tkanek twardych, tylko lasery do zastosowań dentystycznych miękkich: CO_2 , Nd YAG, Ho: lasery YAG i argonowy.

Lasery wykorzystuje się również do polimeryzacji świetlnej materiałów wypełnień. Istnieje wiele innych potencjalnych zastosowań laserów, w tym selektywne usuwanie tkanek nowotworowych za pomocą porfirynowych pochodnych i laserowych połączeń dentystycznych.

Lasery w dermatologii

Lasery stały się niezbędnym narzędziem w praktyce klinicznej dermatologii ze względu na liczne korzyści jakie oferują.

➤ Laser na dwutlenku węgla (CO_2) jest powszechnie stosowany w ablacji lub odparowywaniu cienkich powierzchniowych warstw miękkich tkanek lub w wykonywaniu cięć chirurgicznych. Ablacja - zogniskowana wiązka o polu $0.1-0.2 \text{ mm}^2$, wysokiej mocy $15-25 \text{ W}$ co daje $50.000-100.000 \text{ W/cm}^2$. Te warunki pozwalają na wykonywanie bezkrwawego zabiegu większości tkanek miękkich. Naczynia krwionośne do 0.5 mm^2 są natychmiast zamykane przez laser [1]

*** Lasery CO_2 – ablacja, wykorzystywane są do usuwania guzów naczyniowych, chirurgii paznokci, niezależnych guzów podścieliska – czerniaka, chirurgii kosmetycznej, leczeniu: trądziku różanego, bliznowca, usuwaniu nadmiernego owłosienia**

*** Lasery CO_2 – wyparowanie ($200-600 \text{ W/cm}^2$, $1-4 \text{ W}$, $1-3 \text{ mm}^2$) [1,2] leczenie nowotworów w początkowym stadium, w kosmetologii (tatuaze, blizny po trądzikowe, znamiona naskórkowe), torbiele, zmiany naczyniowe, zmiany infekcyjne.**

*** Nd:YAG, często wykorzystywany przez lekarzy dermatologów. Pierwotnie wykorzystywany był do fotokoagulacji naczyń krwionośnych o dużej średnicy [3]. Obecnie w „hemangiomach i nodularnych port wine stains”. Głęboka penetracja i słaba absorpcja promieniowania w obszarze (1064 nm) prowadzi do szerokiej strefy termicznego zniszczenia, co ogranicza użycia Nd:YAG w leczeniu wielu dermatologicznych zaburzeń. [1]**

*** Laserami VIS (barwnikowe, argonowe, diodowe, rubinowe) usuwane są najczęstsze niedoskonałości skóry takie jak zmiany pigmentowe (port wine stains, hemangiomas, lentiginosy) i tatuaze.**

[1] Laser Surgery and Medicine. Principles and Practice, Carmen A. Puliafito ed., Wiley-Liss (1996) p.61

[2] J.L. Ratz, P.L. Bailin, The case for use the carbon dioxide laser in the treatment of port-wine stains, Arch. Dermatol. 123 (1987) 74-75

[3] M. Landthaler, D. Haina, R. Brunner, W. Waidelich, O. Braun-Falco, Neodymium-YAG laser therapy for vascular lesions, J. Am. Acad. Dermatol. 14 (1986) 107-17

- Asclepion USA Introduces the First **Fractional Q-Switch Laser**

-

PAINLESS

TATTOO REMOVAL

-

Asclepion USA is introducing the first Fractional Q-Switch Ruby Laser.

-

This exciting new technology enables you to treat tattoos and also pigmented lesions without topicals achieving incredible results.

If you are interested in learning more about the full line of Asclepion products, please email jim.kraushaar@asclepion.com or call 949-706-2118.

TattooStar Ruby Laser

Tattoo Removal

- Fractional Handpiece
- Pigmented Lesions

-

[LEARN MORE](#)

Lasery w gastroenterologii

Zastosowanie laserów w gastroenterologii:

- **tamowanie krwawień z odcinka przewodu pokarmowego na skutek pęknięcia wrzodów (Nd:YAG)[1,2],**
- **litotrypsji (kruszenia kamieni) – lasery przestrajalne barwnikowe, Q-switched Nd:NAG, pulsacyjne Nd:YAG [3, 4]**
- **i innych [5].**

[1] C.P. Swain, S.G. Bown, D.W. Storey, J.S. Kirkham, T.C. Northfield, P.R. Salmon, *Controlled trial of argon laser photocoagulation in bleeding peptic ulcers, Lancet 2 (1981) 1313-1316*

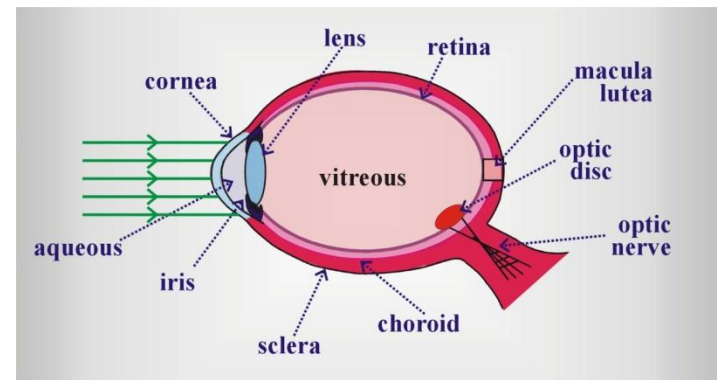
[2] C.P. Swain, J.S. Kirkham, P.R. Salmon, S.G. Bown, T.C. Northfield, *Controlled trial of Nd-YAG laser photocoagulation in bleeding peptic ulcers, Lancet 1 (1986) 1113-1117*

[3] N.S. Nishioka, P.C. Levins, S.C. Murray, J.A. Parrish, R.R. Anderson, *Fragmentation of biliarycalculi with tunable dye lasers, Gastroenterology 93 (1987) 250-255*

[4] C. Ell, G. Lux, J. Hochberger, D. Muller, L. Demling, *Laser-lithotripsy of common bile duct stones, Gut 29 (1988) 746-751*

[5] N.S. Nishioka, *Laser Surgery and Medicine. Principles and Practice, Carmen A. Puliafitoed., Wiley-Liss(1996) chapter 4, p. 83*

Lasery w okulistyce



Okuliści jako pierwsi zastosowali w medycynie technikę laserową zaraz po wynalezieniu lasera [1]. To tutaj fotokoagulacja znalazła zastosowanie jako pierwsza. Efekt termiczny wykorzystany jest w fotokoagulacji: plamki żółtej i siatkówki za pomocą lasera argonowego, diodowego, Nd:YAG, kryptonowego i barwnikowego. Inne lasery wykorzystuje się do iridektomii (częściowego wycięcia rogówki), termicznych lub ablacyjnych metod z pulsacyjnym Nd:YAG [4]. Obecnie większość stosowanych laserów w okulistyce służy do modyfikacji krzywizny rogówki. Lasery ekscimerowe są zatwierdzone przez FDA do korekcji krótkowzroczności i nadwzroczności.

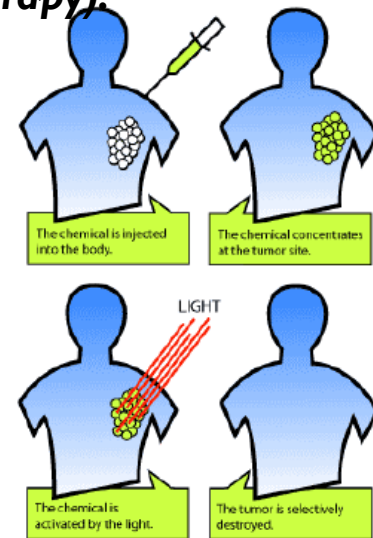
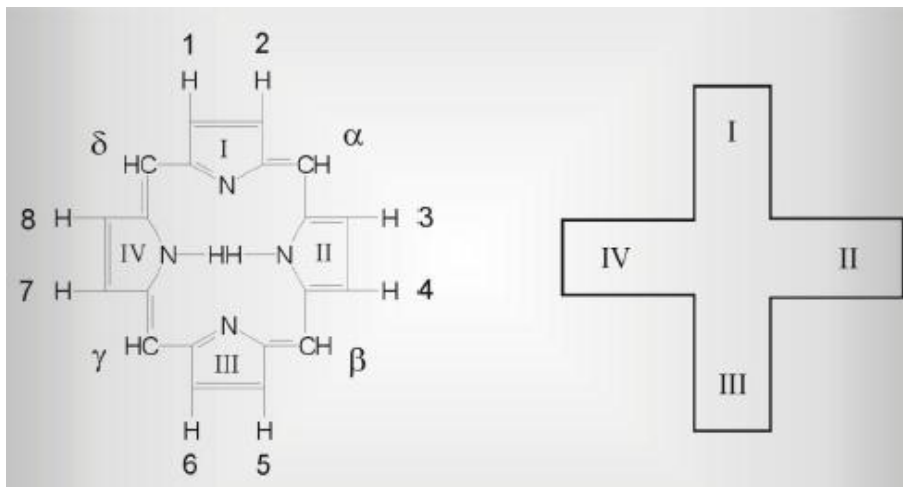
- **LASIK** (laser-assisted-in situ-keratomileusis) - typ refrakcyjnej operacji laserowej oczu przeprowadzanej przez okulistów dla korekcji krótkowzroczności, dalekowzroczności i astygmatyzmu.
- Mikrokeratom używany w celu wycięcia wąskich płatków w rogówce i zmiany jej kształtu (jest to tzw. keratomiloza) [4].

[1] J.M. Krauss, C.A. Puliafito, *Laser Surgery and Medicine. Principles and Practice*, Carmen A. Puliafito ed., Wiley-Liss (1996) chapter 8, p. 249 [2] M.M. Rodrigues, B. Streeten, G.L. Spaeth, L.W. Schwartz, Argon laser iridotomy on primary angle closure or pupillary block glaucoma, *Arch Ophthalmol.* 96 (1978) 2222-2230 [3] L. Schwartz, Laser iridectomy, in *Laser therapy of the anterior segment: A practical approach*, L. Schwartz, G. Spaeth, G. Brown, eds., N.J. Thorofare, Charles B. Slack (1984) pp 29-58

[4] I.G. Pallkaris, M.E. Papatzanaki, E.Z. Stathi, O. Frenschok, A. Georgiadis, Laser in situ keratomileusis, *Lasers Surg. Med.* 10 (1990) 463-468

Terapia fotodynamiczna

Terapia fotodynamiczna wykorzystuje działanie światła na niektóre substancje chemiczne (jak np. niektóre porfiryny) w środowisku bogatym w tlen. Pod wpływem światła w wyniku sekwencji reakcji powstają toksyczne substancje, takie jak tlen w stanie singletowym oraz wolne rodniki. Substancje te są bardzo reaktywne i mogą uszkodzić białka, lipidy, kwasy nukleinowe oraz inne składniki komórki. Tak więc, podczas gdy chlorofil w roślinach (porfiryne Mg^{2+} w centrum) wykorzystuje światło do produkcji cukru, inne porfiryny wykorzystują światło do produkcji toksycznych składników. Pierwsze próby wykorzystywania tego zjawiska w terapii medycznej sięgają początków XX wieku, kiedy to Tappeiner i Jesionek w Niemczech zaproponowali zastosowanie reakcji indukowanych światłem w niektórych barwnikach. W roku 1942 Auler i Bauer zauważyli, że niektóre porfiryny akumulowane są w komórkach rakowych przez okres dłuższy niż w komórkach zdrowych. Gdyby więc te substancje przenieść w jakiś sposób do stanów toksycznych, np. za pomocą światła, komórki rakowe byłby niszczone przede wszystkim. Synteza pochodnej porfiryne (HPD), a następnie potwierdzenie jej lokalizacji w komórkach rakowych przez Schwartza w 1950 r. można uznać za początek nowoczesnej terapii fotodynamicznej (PDT – ang. photodynamic therapy).



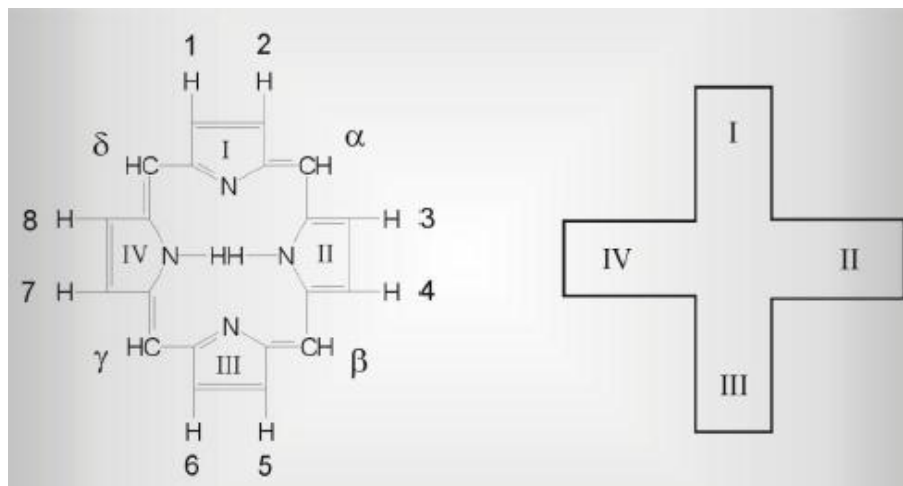
Porfiryny składają się z czterech słabo aromatycznych pierścieni pirolowych, połączonych mostkami metenowymi =C-. Porfiryny różnią się od porfiny tym, że w miejscu wodoru podstawione są:

- **A kwas octowy (-CH₂COOH)**
- **B kwas propionowy (-CH₂CH₂COOH)**
- **M grupa metylowa (-CH₃)**
- **V grupa winylowa (-CH=CH₂).**

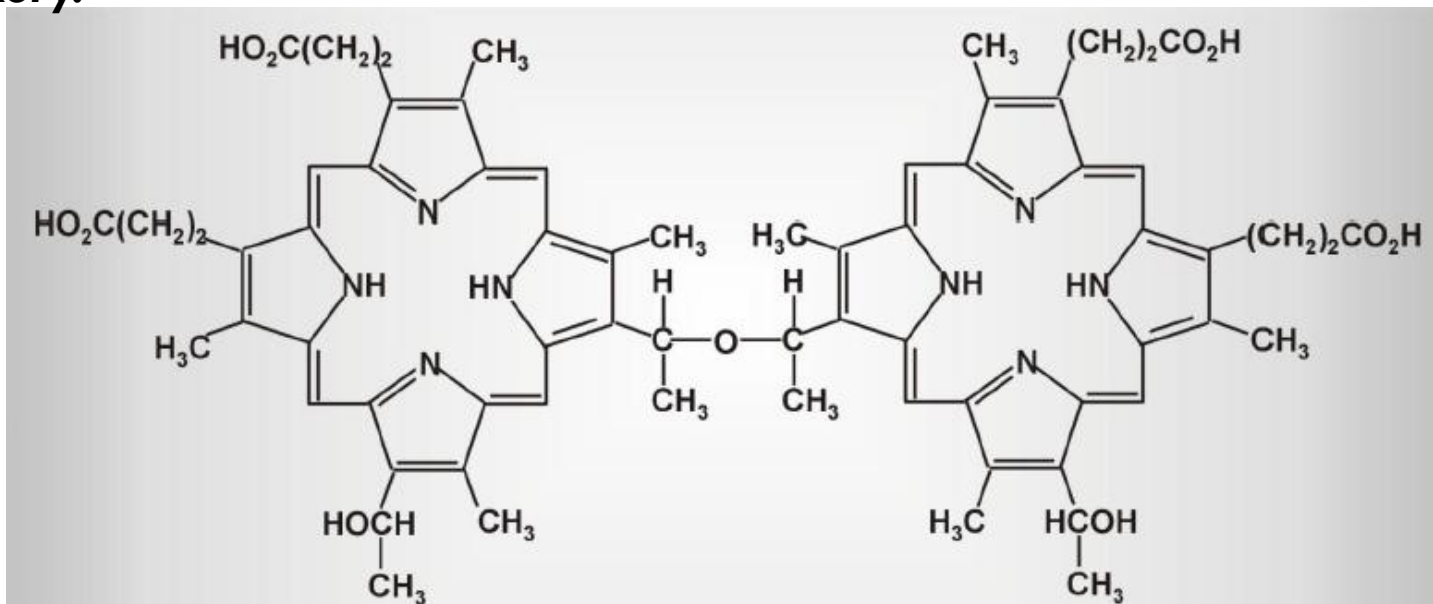
Porfiryny dzielą się na:

- **uroporfiryny (zawierają tylko A i P),**
- **koproporfiryny (zawierają tylko M i P),**
- **protoporfiryny (zawierają M, P i V).**

-Nazwy porfiryn składają się ze słowa i numeru, np. uroporfiryna I. Cyfra I oznacza regularne powtarzanie się podstawinka, np. AP AP AP AP, zaczynając od I pierścienia pirolowego. W serii III porządek w IV pierścieniu jest odwrócony: AP AP AP PA.



Niektóre porfiryny, jak DHE, znalazły zastosowanie w terapii fotodynamicznej, a ich stopień zaawansowania osiągnął II fazę badań klinicznych. HDP i DHE należą do sensybilizatorów I generacji. Efekt uboczny ich działania polega na około sześciotygodniowym uczuleniu skóry na światło. Dlatego badania rozwijają się w kierunku syntezowanych sensybilizatorów II generacji, które absorbują promieniowanie o większych długościach fali ($\lambda > 650\text{nm}$). Grupa ta zawiera pochodne porfiryny, purpuryny, benzoporfiryny, ftalocyjaniny, naftalocyjaniny. Ftalocyjanina absorbuje promieniowanie o długości fali 670nm, naftalocyjaniny zaś – o długości fali 770nm, znika więc efekt uboczny fotouczulenia. Sensybilizatory II generacji są obecnie wykorzystywane we wczesnym okresie badań klinicznych w zastosowaniu do leczenia zmian skórnych spowodowanych pierwotnym rakiem skóry i przerzutami nowotworowymi oraz przewlekłej stabilnej łuszczycy skóry.



Struktura chemiczna dihematoporfiryny złożona z dwóch pierścieni porfiryńowych.

Występują dwa główne mechanizmy fotochemicznych reakcji w sensybilizatorach – I i II typ fotoutleniania. W I typie fotoutleniania sensybilizator reaguje bezpośrednio z inną cząsteczką na drodze przeniesienia protonu lub przeniesienia elektronu prowadząc do powstania przejściowych rodników, które reagują z tlenem. W II typie fotoutleniania sensybilizator w stanie trypletowym oddziałuje z tlenem, najczęściej na drodze transferu energii produkując elektronowo wzbudzony stan singletowy tlenu, który może reagować następnie z cząsteczkami zdolnymi do utlenienia.

Sensybilizator w stanie singletowym 1S pochłania kwant promieniowania $h\nu$ i przenosi się do wzbudzonego stanu singletowego $^1S^*$. Następnie oddaje energię w sposób promienisty lub bezpromienisty, wracając do stanu 1S , lub przenosi się do wzbudzonego stanu trypletowego $^3S^*$, naruszając reguły wyboru (zmiana spinu) w wyniku przejścia interkombinacyjnego. Powrót do singletowego stanu podstawowego następuje po wypromieniowaniu energii (fosforescencja).

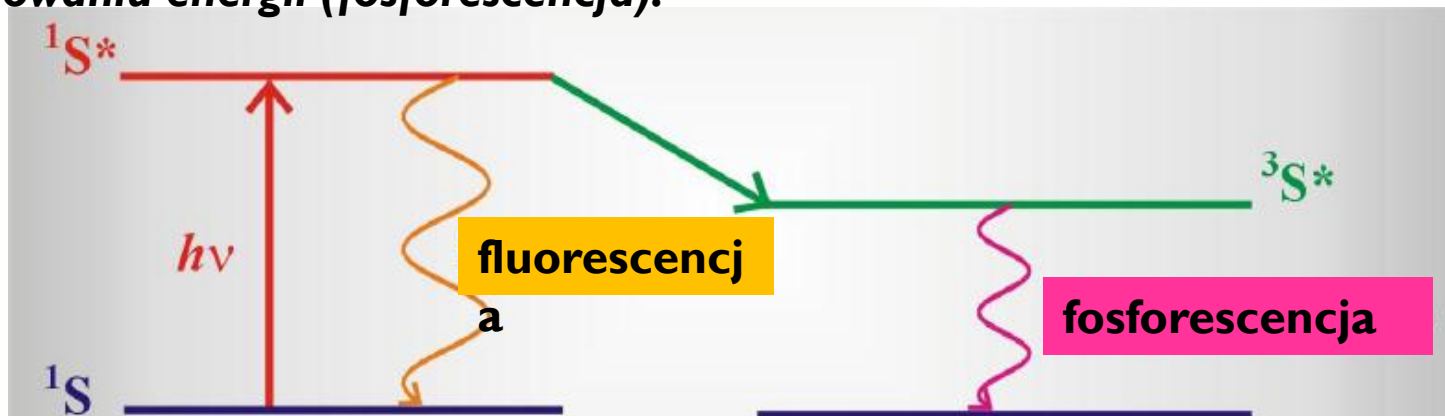
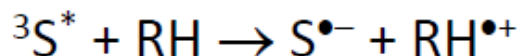
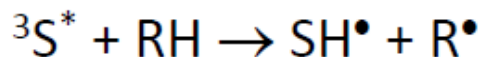


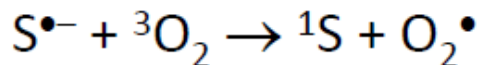
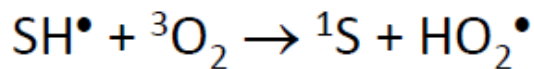
Diagram Jabłońskiego dla sensybilizatora S

Reakcja fotoutlenienia - typ I

Stan trypletowy $^3S^*$ może zanikać również w wyniku reakcji przeniesienia protonu lub przeniesienia elektronu między sensybilizatorem i substancjami, z których zbudowana jest komórka (RH):

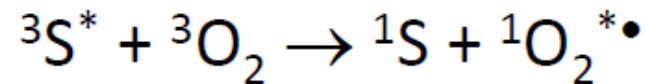


Reakcje te wywołują dalsze reakcje z tlenem w stanie trypletowym 3O_2 występującym w komórce:



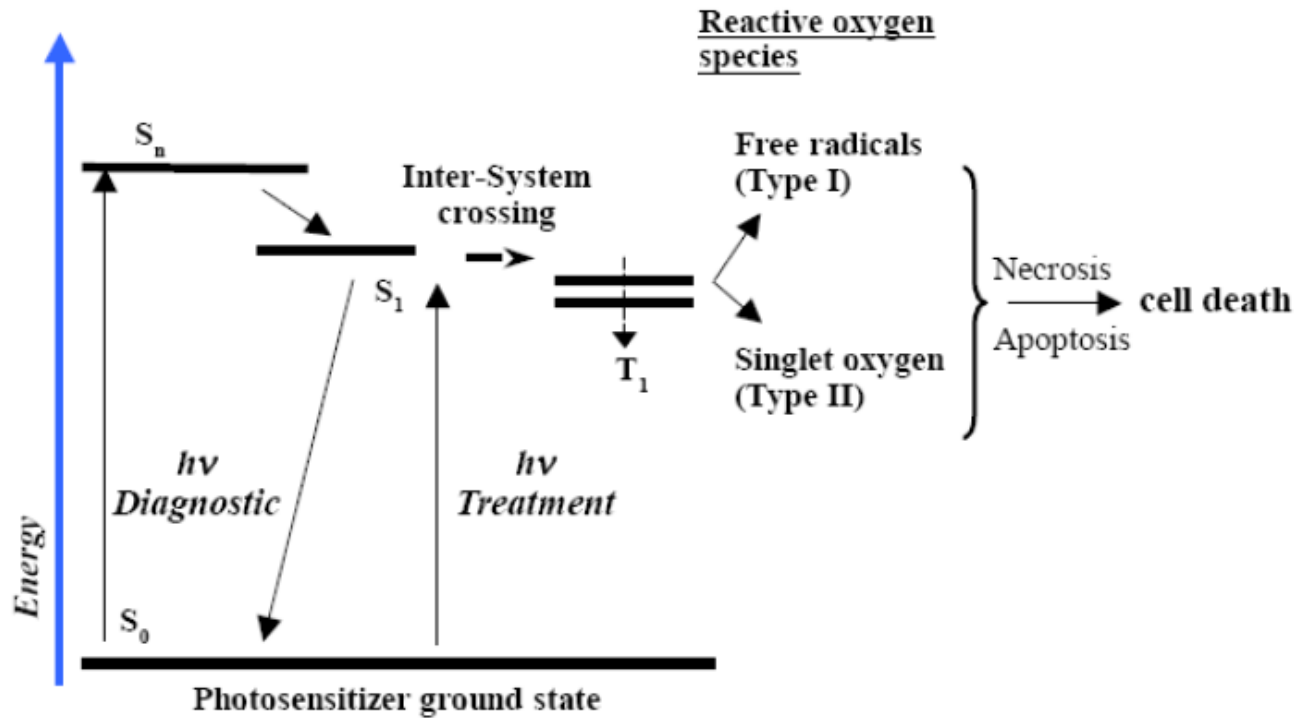
Reakcja fotoutlenienia - typ II

Innym typem dyssypacji energii ze stanu trypletowego $^3S^*$ sensybilizatora jest fotoutlenienie typu II. W II typie fotoutlenienia stan trypletowy $^3S^*$ sensybilizatora oddziałuje bezpośrednio z tlenem w stanie trypletowym 3O_2 , powodując powstanie tlenu we wzbudzonym stanie singletowym $^1O_2^*$.



Tlen we wzbudzonym stanie singletowym jest bardzo reaktywny. Prowadzi to do utlenienia substancji, z których zbudowana jest komórka (białka, lipidy, kwasy nukleinowe), i w efekcie do zniszczenia komórki.

Fotochemiczne mechanizmy w terapii fotodynamicznej



Lasery femtosekundowe w medycynie

Rozwój i komercjalizacja laserów femtosekundowych otworzyła nowe zastosowania w medycynie. W szczególności w chirurgii, lasery femtosekundowe pozwalają na większą precyzję cięcia niż lasery nanosekundowe. Ultrakrótkie impulsy laserowe otworzyły również ekscytujący obszar **optycznej tomografii**. Rozwój wiarygodnej **biopsji optycznej** nieosiągalny cel od kilku lat.

Naukowcy dostarczyli techniki dwuwymiarowego obrazowania tkanek wykorzystując elektroniczne ultraszybkie systemy obrazowania. To obrazowanie typowo wykorzystuje 120fs impulsy o repetycji 1kHz uzyskiwane z ultraszybkich wzmacniaczy laserowych. Największym osiągnięciem ultraszybkich laserów w zastosowaniach chirurgicznych jest **zredukowanie zniszczeń tkanki**. Impulsy oddziałują z tkankami dużo szybciej niż energia termiczna może dyfundować do otaczającej tkanki. W uproszczeniu oznacza to zmniejszenie spalania a co za tym idzie ograniczenie zniszczenia sąsiadującej tkanki. Ponad to, **mikronowy rozmiar cięcia** daje nowe rozwiązania aplikacyjne w **reperacji uszkodzeń nerwowych**.