

*Systemy optoelektroniczne w medycynie,
laparoscopia, fiberoskopia*



Lasery

Zastosowania laserów w medycynie stają się coraz bardziej powszechne. Specyficzne właściwości promieniowania laserowego, mające szczególne znaczenie w zastosowaniach medycznych, to jego **duża intensywność, monochromatyczność oraz mała rozbieżność wiązki**. Dzięki tym właściwościom lasery stworzyły nowe możliwości operacyjne, zwłaszcza w zabiegach endoskopowych i laparoskopowych. Lasery umożliwiły również rozwój wielu nowych technik diagnostycznych.

Ze względu na zastosowania wynikające z charakteru oddziaływania na tkankę, **lasery** stosowane w urządzeniach medycznych dzieli się umownie na **wysokoenergetyczne** (chirurgiczne) i **niskoenergetyczne** (biostymulacyjne). Lasery wysokoenergetyczne są stosowane w systemach przeznaczonych do destrukcji lub usuwania tkanki (cięcie, odparowanie i koagulacja).

Koagulacja to proces polegający na **łączeniu się cząstek fazy rozproszonej koloidu w większe agregaty tworzące fazę ciągłą o nieregularnej strukturze**. Istnieje koagulacja odwracalna i nieodwracalna, a także spontaniczna i wymuszona. W wyniku koagulacji może następować zjawisko **żelowania**, tworzenia się past i materiałów stałych, **sedymentacji** (proces opadania zawiesiny ciała stałego w cieczy w wyniku działania siły grawitacji lub sił bezwładności) lub pokrywania powierzchni mieszaniny warstwą fazy rozproszonej.

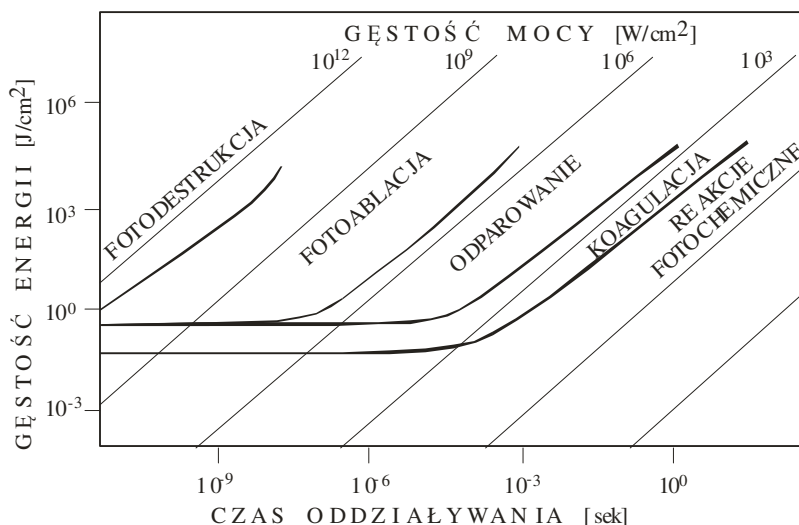
Typowe struktury koagulacyjne to dyspersje polimerów, niektóre rodzaje farb, tworzywa sztuczne, oraz produkty koagulacji białek, takie jak np: jogurt. Koagulacja białka występuje na skutek zniszczenia jego trzeciorzędowej struktury, prowadzącej do łączenia się rozpuszczalnych w wodzie białek w nierozpuszczalne strzępki i całkowitej utraty ich aktywności biologicznej. Koagulacja białek może następować pod wpływem temperatury lub czynników chemicznych.

Lasery niskoenergetyczne znalazły zastosowanie w terapii bólu, medycynie sportowej, dermatologii, reumatologii i stomatologii. Są również stosowane w diagnostyce i terapii nowotworów metodą fotodynamiczną.

Oddziaływanie promieniowania laserowego na tkankę biologiczną zależy w dużej mierze od właściwości (głównie absorpcyjnych) **tkanki biologicznej oraz od charakterystyk promieniowania laserowego, w tym od długości fali generowanego promieniowania, rodzaju pracy lasera** (ciągła, impulsowa), **wartości jego parametrów wyjściowych, takich jak gęstość mocy i energii, wartość mocy** (średniej mocy) **i energii, czas ekspozycji** (długość impulsu, częstotliwość jego powtarzania). W zależności od mocy promieniowania i czasu działania promieniowania laserowego na tkankę, rozróżnia się następujące mechanizmy oddziaływania:

- 1) fotochemiczne (fotostymulacja, metoda fotodynamiczna),

- 2) termiczne (koagulacja, odparowanie),
- 3) fotoablacyjne (nietermiczne usuwanie tkanki),
- 4) elektromechaniczne (fotodestrukcja).



Oddziaływania fotochemiczne

Reakcje fotochemiczne są obserwowane przy bardzo małych wartościach gęstości mocy promieniowania laserowego, poniżej 10 mW/cm². Oddziaływania fotochemiczne (fotowzbudzenie, fotorezonans, fotoaktywacja) = absorpcja światła przez chromofory, które oddają energię wzbudzenia poprzez fluorescencję lub reagują wzbudzone. Są one odpowiedzialne za fotoablację – zimne usuwanie tkanki (rozerwanie wiązań chemicznych tkanki bez podgrzewania). Ten rodzaj oddziaływania promieniowania laserowego na tkankę biologiczną wykorzystuje się również w biostymulacji i w metodzie fotodynamicznej.

W procesie biostymulacji laserowej zastosowanie znajdują lasery ciągłego działania He-Ne (632,8 nm) i półprzewodnikowe (670 nm, 830 nm) oraz impulsowe lasery półprzewodnikowe (904 nm).

Oddziaływanie ablacyjne

Efekty ablacyjne występują w przypadku oddziaływania krótkich impulsów o wartości gęstości mocy powyżej 1 MW/cm² na tkankę charakteryzującą się dużą wartością współczynnika absorpcji. W wyniku oddziaływania lasera, w tkance na bardzo małej głębokości wnikania (kilka

mm) zachodzą procesy dysocjacji molekuł, następuje gwałtowne rozerwanie struktur komórkowych i ich wyrzucenie. Pozostała część tkanki nie jest podgrzana.

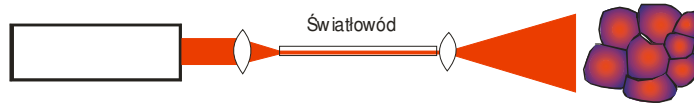
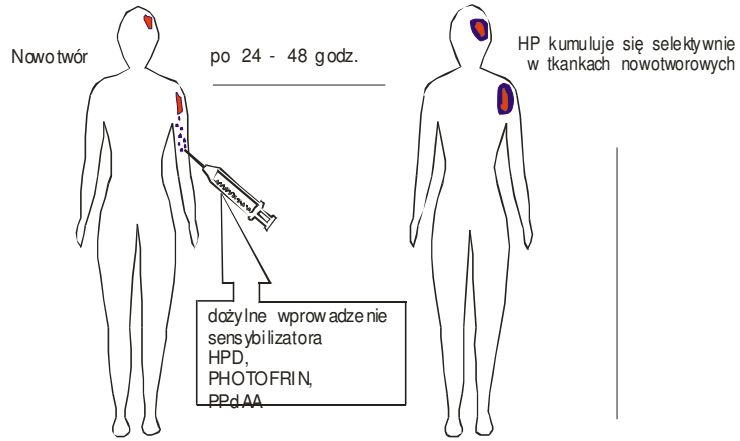
Metodą ablacji odparowuje się tkankę nowotworową, przeprowadza rekanalizację naczyń krwionośnych, usuwa skrzepy naczyniowe, a także wykonuje niektóre zabiegi w oftalmologii (schorzenia oczu). Wykorzystuje się tu lasery TEA-CO₂, Er:YAG (2,9 μm), Ho:YAG (2,1 μm) oraz Nd:YAG (1,06 μm), a także lasery z zakresu 450-500 nm (barwnikowe), 308 nm (ekscymerowy XeCl) i ok. 200 nm (193 nm - ekscymerowy ArF oraz 213 nm - piąta harmoniczna Nd:YAG).

Oddziaływanie w procesie terapii fotodynamicznej

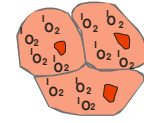
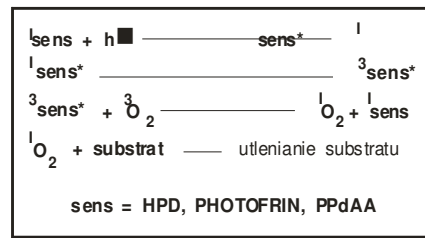
Metoda terapii fotodynamicznej (PDT) polega na selektywnym utlenieniu materiału biologicznego tkanki nowotworowej przez tlen singletowy lub formy rodnikowe. Czynniki te generowane są przez rozpuszczony w komórkach tlen molekularny, wprowadzony egzogenicznie barwnik (fotosensybilizator, fotouczulacz), lepiej akumulujący się w chorych niż w zdrowych tkankach, oraz światło o odpowiedniej mocy i długości fali dopasowanej do pasm absorpcji barwnika. Pozwala to na wybiórcze niszczenie tkanek nowotworowych, chroniąc jednocześnie tkanki zdrowe. Metoda stosowana jest do leczenia nowotworów skóry, dróg moczowo-płciowych, płuc, przetyku, języka, gardła, żołądka, jelit, pęcherza moczowego. Metoda PDT w porównaniu z tradycyjnymi metodami leczenia nowotworów (chirurgia, naświetlanie, chemioterapia) jest bardziej selektywna, ogólnie dobrze tolerowana, daje dobre efekty kosmetyczne, może być wielokrotnie powtarzana i ponadto łączy się z diagnostyką.

Wiele ośrodków badawczych wykorzystuje metodę laserowo indukowanej fluorescencji (LIF) do analizowania stanu tkanek biologicznych w diagnostyce miażdżycy, kamicy nerkowej i moczowej, a przede wszystkim wczesnych faz nowotworów. Optyczne metody spektralne (metody optycznej biopsji) w przeciwieństwie do badań histopatologicznych są nieinwazyjne, nie wymagają pobierania materiału poprzez biopsję cienkoigłową, ilość analizowanego materiału jest nielimitowana, promieniowanie doprowadzane i odbierane jest światłowodami, sygnały są mierzone w czasie rzeczywistym, te same obszary można analizować wielokrotnie. Detekcja nowotworów metodą LIF polega na rejestracji obszarów o różnej fluorescencji pod wpływem padającego promieniowania pobudzającego odpowiednie barwniki fluoryzujące (fluorofory) zawarte w materiale biologicznym.

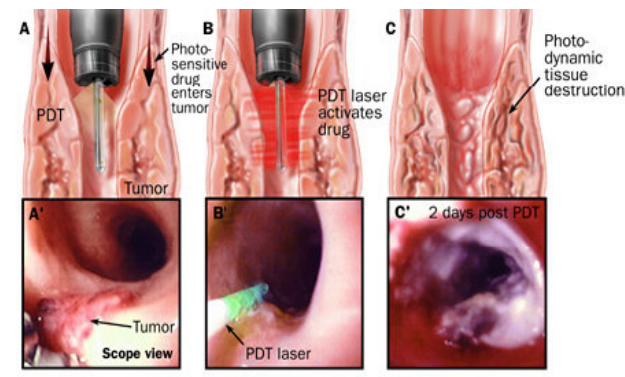
FOTODYNAMICZNA METODA TERAPII I DIAGNOSTYKI NOWOTWORÓW



źródło światła 670-700 nm
(Laser,
lampa halogenowa
lub ksenonowa)

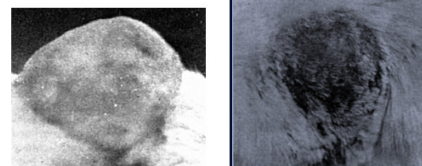


Cytotoksyczne działanie $^1\text{O}_2$



tumor 2.5 x 2.5 x 2.5 cm

4 dni po drugim zabiegu z HPD i naświetlaniu (1 h, 15 mW/cm², 620-640 nm)



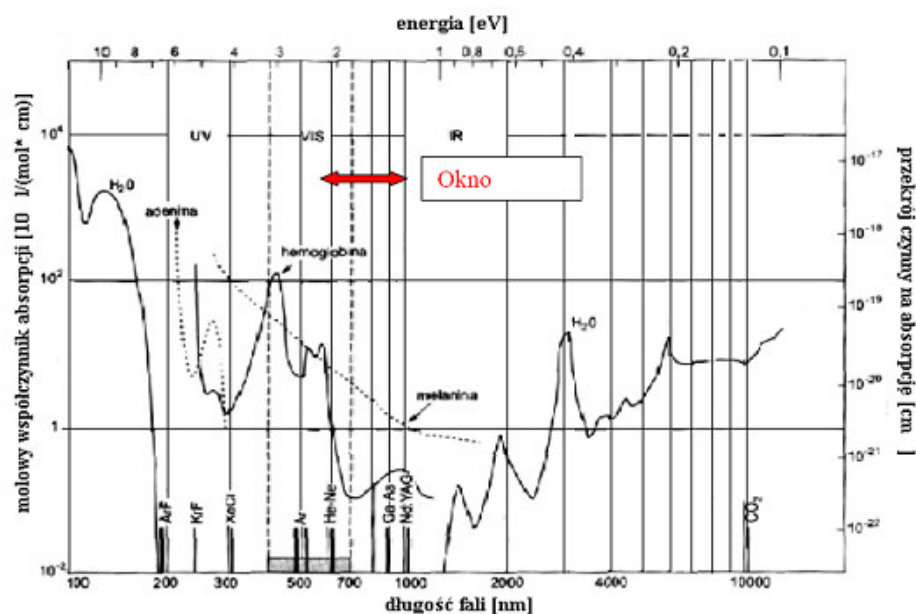
2 tyg. po drugim zabiegu

6 tyg. po zabiegu

Oddziaływanie fototermiczne

Oddziaływanie fototermiczne obserwuje się dla gęstości mocy o wartościach powyżej $1(10^6)$ W/cm². Efekty oddziaływania zależą od temperatury, jaką możemy wywołać w tkance, oświetlając ją laserem. Promieniowanie laserów niskoenergetycznych wywołuje podwyższenie temperatury tkanki nie więcej niż o 0,1-0,5 °C. W przypadku laserów wysokoenergetycznych (do 100 W) możliwe jest uzyskanie temperatury > 150°C.

Cząsteczki organiczne absorbują promieniowanie 100-300 nm. Obszar widzialny -melanina, ksantofil, hemoglobina. W podczerwieni – woda. Lancety chirurgiczne.



Absorpcja podstawowych fotoperceptorów. Skóra – 70%, aorta – 79%, chrzastka – 75%, kość – 10-30%, zębina – 13%, szkliwo – 2-3%

Typ zastosowanego lasera zależy od absorpcji tkanki. Spośród wielu wykorzystywanych tu laserów wymienić należy laser molekularny na dwutlenku węgla CO₂, laser argonowy Ar i laser na ciele stałym Nd:YAG. Laser argonowy koaguluje naczynia włoskowate, H = 25-570 J/cm², t = 0,5 s (mała głębokość penetracji 0,5-2,5 mm), zaś laser Nd:YAG naczynia o większych średnicach, H=600-2000 J/cm², t=2 s (głębokość penetracji 2-8 mm).

Efekty termiczne dzieli się na trzy fazy:

Faza 1

- w temp. 42-50 °C faza przegrzania (proces odwracalny)
- powyżej 50 °C rozkład makromolekuł i DNA oraz zmiany w strukturze enzymów
- przy 60-65 °C początek denaturacji białek i kolagenu (białko tkanki łącznej) oraz

koagulacja (agregacja i żelowanie) tkanki – bielenie tkanki

- powyżej 80 °C rośnie przepuszczalność membran – zakłócenie równowagi chemicznej w komórkach (stan martwicy, szare tkanki)

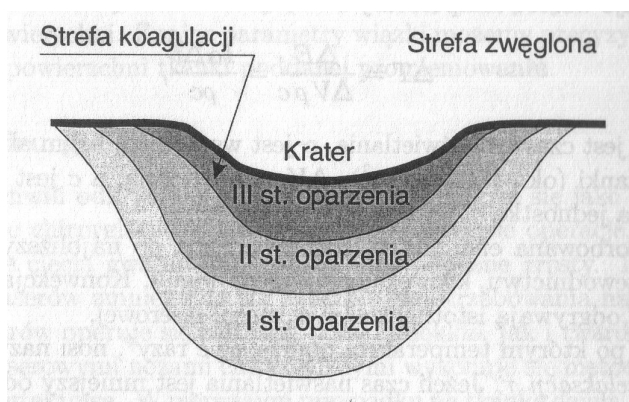
Faza 2

- 100 °C z tkanek wyparowuje woda, marszcząc tkankę, para tworzy pęcherzyki, które rozrywają tkankę

Faza 3

- po odparowaniu wody zwęglenie tkanki i powstaje krater

- powyżej 300 °C tkanka topi się



Strefy oparzeń tkanki

Oddziaływanie elektromechaniczne (fotojonizacyjne)

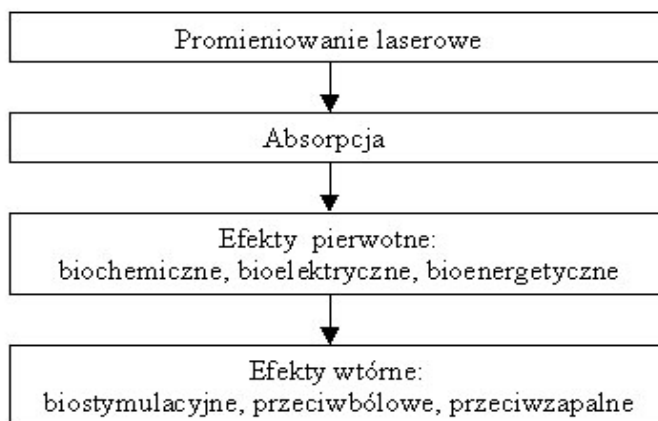
Oddziaływanie elektromechaniczne, nazywane również fotodestrukcją, występuje przy bardzo dużych wartościach gęstości mocy promieniowania laserowego, powyżej 100 MW/cm², i nie zależy od wartości współczynnika absorpcji tkanki. Wykorzystuje się je w przypadku tkanek o dużej wartości transmisji dla promieniowania laserowego.

Impuls laserowy o bardzo dużej mocy zostaje skupiony na małej powierzchni. W miejscu skupienia występuje bardzo silne pole elektryczne, rzędu 10⁹ V/cm, które powoduje jonizację tkanki. W wyniku fotojonizacji powstaje ekspandująca plazma, która jest źródłem fali uderzeniowej powodującej zniszczenie tkanki dzięki zjawiskom termicznym i mechanicznym. Opisany wyżej efekt mechanicznego działania wiązki laserowej w mikroobszarze wykorzystywany jest głównie w mikrochirurgii przedniego odcinka oka, do rozdrabniania kamieni nerkowych i żółciowych, do oczyszczania naczyń krwionośnych ze złogów cholesterolowych.

Biostymulacyjne oddziaływanie promieniowania laserowego

Efekty biostymulacyjne w tkance związane są z absorpcją promieniowania laserowego o małej gęstości mocy i energii oraz o stosunkowo długich czasach naświetlania. Za efekty biostymulacyjne uważa się takie, którym wskutek naświetlania promieniowaniem laserowym towarzyszy miejscowy wzrost temperatury w tkance nie większy niż $0,5-1^{\circ}\text{C}$ (obserwowane zmiany na poziomie komórki i tkanki nie mogą być zatem odpowiedzią na stres). W związku z tym zaleca się, aby w laseroterapii nie przekraczać mocy ciągłej lub średniej ok. 60 mW. Wraz ze wzrostem mocy promieniowania powyżej 60 mW następuje dalszy niewielki wzrost temperatury, a wraz z tym zjawisko biostymulacji termicznej.

Zaabsorbowane promieniowanie jest czynnikiem inicjującym w tkance pewne procesy, które nie powodują destrukcji tkanki, a polegające na wzmożeniu chemicznych i metabolicznych reakcji w komórkach tkanek. Schematycznie, łańcuch reakcji zachodzących w tkankach pod wpływem promieniowania laserowego można przedstawić następująco:



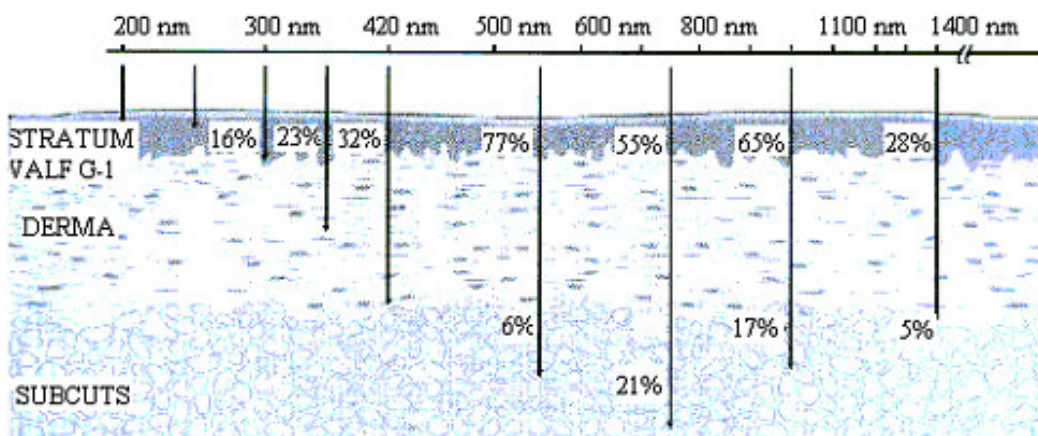
Należy zdawać sobie sprawę, że akt absorpcji zachodzi w niezwykle krótkim czasie rzędu 10^{-15} s, podczas gdy czasy reakcji biologicznych są rzędu sekund i godzin, a na zaobserwowanie rezultatów klinicznych potrzeba dni. Zatem między procesem absorpcji, a obserwowanymi pozytywnymi efektami klinicznymi zachodzi cała gama skomplikowanych procesów, które mają miejsce w pojedynczych cząsteczkach, na poziomie subkomórkowym, komórkowym i w tkankach. W wielu przypadkach mechanizm procesów, które prowadzą do określonych, obserwowanych efektów klinicznych nie jest jeszcze znany.

Oddziaływanie promieniowania laserowego na poziomie molekularnym

Cząsteczka, która absorbuje promieniowanie laserowe o określonej długości fali, ulega tzw. "wzbudzeniu elektronowemu" i przechodzi na wyższy poziom energetyczny. Stan taki jest krótkotrwały i cząsteczka traci uzyskany w wyniku absorpcji nadmiar energii. Może to uczynić na kilka sposobów:

- poprzez spontaniczną emisję fotonów w postaci fluorescencji lub fosforescencji,
- poprzez oddanie nadmiaru energii w postaci ciepła do otoczenia,
- poprzez bezpromienne przekazanie elektronowej energii wzbudzenia E^* do biologicznie ważnych struktur i zapoczątkowanie w nich reakcji fotochemicznych.

Z punktu widzenia laseroterapii niskoenergetycznej najistotniejszym i najbardziej pożądanym jest trzeci sposób. Badania wykazują, że w układach biologicznych energia wzbudzenia elektronowego przekazywana jest z bardzo dużą wydajnością (duża wartość stałej szybkości przenoszenia energii wzbudzenia elektronowego) w czasie rzędu 10^{-12} - 10^{-18} s.



Transmisja światła przez skórę

Oddziaływanie promieniowania laserowego na komórkę i organelle komórkowe

Za absorpcję (pochłanianie) odpowiedzialne są cząsteczki zwane ogólnie chromoforami, które znajdują się w komórkach i mitochondriach (tzw. cytochromy). Najważniejsze z nich to: aminokwasy, kwasy nukleinowe, melanina, hemoglobina, bilirubina, związki sterydowe, porfiryny, ryboflawina, chinony, NAD, B-karoten, cytochromy i inne. Większość z nich pochłania promieniowanie ultrafioletowe, część widzialne (np. melanina, hemoglobina, cytochromy), a

niektóre np. flawoproteiny najsilniej absorbują promieniowanie podczerwone (ok. 900 nm). Cytochromy są składnikami łańcucha oddechowego, znajdującego się w mitochondriach. Uważa się, że podczas naświetlania promieniowaniem laserowym cytochromy w mitochondriach (np. oksydaza cytochromowa, NAD) bezpośrednio pochłaniają promieniowanie elektromagnetyczne, powodując aktywację łańcucha oddechowego oraz zapoczątkowując procesy biochemiczne powodujące wzrost produkcji ATP (adenozynotrifosforan, nukleotyd w komórce - magazyn energii dla komórki) i wzrost metabolizmu komórkowego. Bardzo ważnym efektem biostymulacji laserowej zachodzącej na poziomie molekularnym, a mającym ogromny wpływ na procesy zachodzące wewnątrz, jest fotoaktywacja enzymów. Oddziaływanie promieniowania na enzym może spowodować:

a) aktywację enzymu, b) inaktywację, c) reaktywację enzymów odwracalnie nieczynnych.

Najistotniejszy jest efekt powodujący bezpośrednią aktywację enzymu oraz pobudzenie syntezy enzymu. Udowodniono, że pobudzenie aktywności określonej grupy enzymów z tzw. układu dopełniacza powoduje m.in.: wzrost przepuszczalności naczyń (C4, kinina C2), uwalnianie histaminy z granulocytów i serotoniny z płytek krwi (C3a), ułatwienie fagocytozy przez granulocyty obojętnochłonne i monocyty. Bardzo czułymi na promieniowanie laserowe są enzymy sterujące syntezą i utylizacją ATP a więc enzymy odpowiedzialne za przemiany energetyczne zachodzące wewnątrz komórki. Przyniesione tu tylko niektóre skutki oddziaływania promieniowania laserowego na poziomie molekularnym nie są oczywiście obojętne dla funkcjonowania pojedynczej komórki.

■ Biostymulator LT-1000



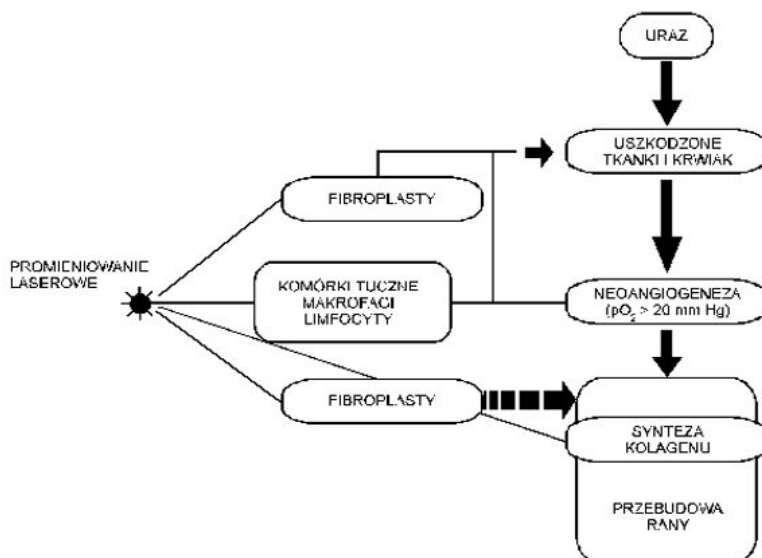
- regulacja mocy promieniowania od 1 mW do 100 mW (LT-1000) lub do 200 mW (LT 1002) z rozdzielczością 1 mW (kontrola mocy lasera poprzez ciągły jej pomiar za pomocą fotodiody referencyjnej zintegrowanej ze

źródłem promieniowania),

- długość fali lasera 980 nm,
- czas zabiegu regulowany od 1 sek do 100 min co 1 sekundę,
- częstotliwość pracy od 0 Hz (praca ciągła, bez modulacji) do 10kHz co 1 Hz,
- automatyczne obliczanie dawki promieniowania na zabieg (w [J] oraz, po podaniu wielkości naświetlanej powierzchni (w [cm²]), wyliczanie gęstości dawki (w [J/cm²]),
- automatyczne określanie czasu trwania zabiegu dla wybranej dawki [J]
- automatyczne wyliczanie czas trwania zabiegu po podaniu gęstości dawki (w [J/cm²]) oraz wielkości naświetlanej powierzchni (w [cm²]),
- monitorowanie wielkości wyemitowanej dawki promieniowania [J] podczas prowadzenia zabiegu,
- odmierzanie czasu trwania zabiegu,
- 10 pamięci dla wpisania wybranych nastaw parametrów,
- wbudowany układ testujący sprawność głowicy lasera,
- czas pracy głowicy 5000 h,
- wymiary 170 x 220 x 70 mm,
- waga urządzenia wraz z zasilaczem i głowicą 1,5 kg.

Zauważono m. in., że zmiana szybkości podziałów komórkowych zależy od dł. fali promieniowania, gęstości powierzchniowej energii, czasu ekspozycji, a także stanu czynnościowego komórek. Stwierdzono wzmożoną syntezę DNA w komórkach, czego konsekwencją jest zwiększona proliferacja (mnożenie się) komórek i wzmożona synteza białek. Komórki warstwy rozrodczej naskórka - keranocyty wykazują zwiększoną proliferację oraz wzrost ich ruchliwości, czym można tłumaczyć korzystny wpływ działania promieniowania laserowego na gojenie się ran (np. owrzodzenia podudzi). Podobnie fibroblasty, które odgrywają główną rolę w procesach gojenia, są wrażliwe na promieniowanie lasera He-Ne. Pod jego wpływem dochodzi do zwiększonej syntezy kolagenu w fibroblastach oraz ich modyfikacji, co może mieć istotny wpływ na kształtowanie się morfologii blizny, poprawienie jej wytrzymałości mechanicznej, zwłaszcza po zabiegach chirurgicznych. Ponadto obserwuje się przyspieszoną neoangiogenezę pod wpływem promieniowania o dł. fali 660 nm, który to proces ma podstawowe znaczenie w gojeniu tkanek.

Podwyższoną zdolność granulocytów do fagocytozy potwierdza, obserwowane pod wpływem promieniowania laserowego, szybkie tworzenie się ziarniny i naskórkowanie ran. Wpływ promieniowania laserowego na ważniejsze procesy gojenia się ran przedstawia schematycznie rysunek:



Należy wyraźnie podkreślić, że skuteczna stymulacja procesu gojenia się ran promieniowaniem laserowym zależy od odpowiedniego doboru dł. fali i gęstości energii do rodzaju rany i fazy procesu gojenia rany.

Promieniowanie laserowe ma również wpływ na skład i właściwości błony komórkowej. Struktura błony i jej potencjał elektryczny mają podstawowe znaczenie dla procesów transportu przez błonę i aktywność pompy sodowej. Pod wpływem promieniowania normalizuje się potencjał elektryczny błony komórkowej (dla zdrowej komórki wynosi ok. 60-90 mV), zmienia się przewodność elektryczna i przenikalność błony oraz jej właściwości adhezyjne. Sprowadza się to np. do mniejszej agregacji erytrocytów, lepszego przenoszenia tlenu, zmiany potencjału czynnościowego neuronów. Mitochondria, które pełnią bardzo ważną rolę w fizjologii komórki, również odpowiadają na promieniowanie lasera (He-Ne). Dochodzi do znacznych zmian w budowie mitochondriów, ich właściwości optycznych (zmian widm absorpcyjnych i emisyjnych), uaktywnienie aparatu genetycznego mitochondriów, co przejawia się w zwiększonej syntezie DNA i RNA, nasilonej syntezie białek, obserwuje się też wzrost produkcji ATP, co z kolei ma bezpośredni wpływ na metabolizm energetyczny komórki.

Przykładem oddziaływania stymulującego promieniowania na komórkę, którego nie można pominąć, jest jego wpływ na limfocyty krwi. Obserwuje się m. in. odwracalny, wzmożony napływ jonów wapnia do komórki, przebudowę ultrastruktury jąderka, wzrost liczby

mitochondriów.

Oddziaływanie promieniowania laserowego na poziomie tkanki

Obserwowane zmiany w różnych rodzajach tkanek, możemy określić, jako tzw. efekty wtórne działania promieniowania laserowego. Zaliczamy do nich: efekty biostymulacyjne, efekty przeciwbólowe, efekty przeciwzapalne.

Efekt przeciwbólowy wywołany promieniowaniem laserowym spowodowany jest:

- hyperpolaryzacją błon komórek nerwowych,
- wzmaganiem wydzielania endorfin,
- stymulowaniem regeneracji obwodowych aksonów po uszkodzeniu nerwów.

Efekt przeciwzapalny wywołany jest przez:

- rozszerzenie naczyń krwionośnych,
- ułatwienie wytworzenia krążenia obocznego,
- poprawę mikrokrążenia,
- przyspieszenie resorpcji obrzęków i wysięków,
- stymulowanie migracji makrofagów.

Efekt stymulujący wywołany jest poprawą krążenia, odżywiania i regeneracja komórek.

Powyższe efekty znalazły potwierdzenie w licznych badaniach *in vitro* i *in vivo*. Stwierdza się, że w napromieniowanych tkankach zwiększa się przepływ krwi, co umożliwia szybszą wymianę elektrolitów między komórkami, czemu sprzyja również obserwowana wzmoczona angiogenaza. Promieniowanie laserowe w zakresie podczerwieni powoduje poszerzenie naczyń limfatycznych. Tym samym powoduje większy przepływ chłonki i przyspiesza ich regenerację po przecięciu. Obserwuje się uaktywnienie szpiku kostnego i zwiększenie liczby erytrocytów. **Promieniowanie laserowe ma regulujący wpływ na układ odpornościowy.** W określonych schorzeniach zaobserwowano działanie immunosupresyjne (spadek aktywności limfocytów, mniejsza produkcja przeciwciał). Z drugiej strony w innych schorzeniach np. przy gojeniu się ran można zaobserwować wzmoczoną aktywność żerną monocytów i neutrofilii, a pod wpływem promieniowania lasera He-Ne dochodzi do wzmoczonej fagocytozy makrofagów. Obserwowane zmiany stężenia serotoniny i histaminy wiążą się ściśle z działaniem przeciwbólowym. **Skutkiem działania promieniowania laserowego jest też wzmoczenie zdolności regeneracyjnych głównie tkanki łącznej i nabłonka.** Promieniowanie małej mocy modyfikuje stan czynnościowy zarówno zdrowej jak i uszkodzonej tkanki nerwowej. Stwierdzono, że

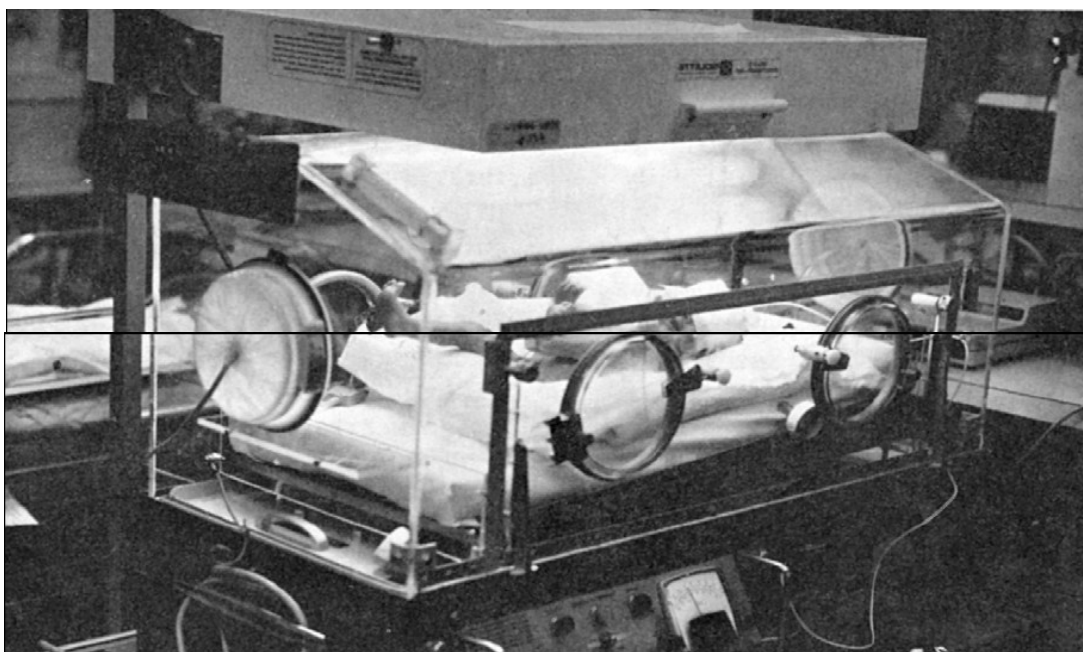
promieniowanie to podwyższa potencjał czynnościowy nieuszkodzonych nerwów obwodowych oraz nerwów zmiążdżonych, a także przyspiesza wzrost włókien nerwowych i ich melinizację w obrębie urazu.

Są to tylko nieliczne obserwowane zmiany zachodzące w układach biologicznych pod wpływem promieniowania laserowego. Nie mniej dowodzą, że taki wpływ istnieje i nie jest obojętny dla tego układu, chociaż jak wspomniano wcześniej, nie wszystkie obserwowane w praktyce skutki napromieniowania laserami małej mocy znalazły dotychczas naukowe wytłumaczenie.

Najlepsze efekty biostymulacyjne uzyskuje się dla promieniowania o gęstości mocy do 50 mW/cm^2 , efekty przeciwbólowe dla gęstości mocy $50\text{-}200 \text{ mW/cm}^2$, natomiast efekty przeciwzapalne dla $300\text{-}400 \text{ mW/cm}^2$.

Fotomedycyna

Terapia żółtaczki u noworodków (nie dojrzłość wątroby powoduje akumulację bilirubiny w organizmie i może powodować uszkodzenia mózgu). Absorpcja niebieskiego światła powoduje przegrupowanie (rozrywanie) wiązań wodorowych w cząsteczkach bilirubiny, dzięki czemu stają się one wystarczająco polarne by być usunięte przez wątrobę.



Leczenie łuszczycy za pomocą naświetlania



Zmiana naskórna u szczura



Fig. 2

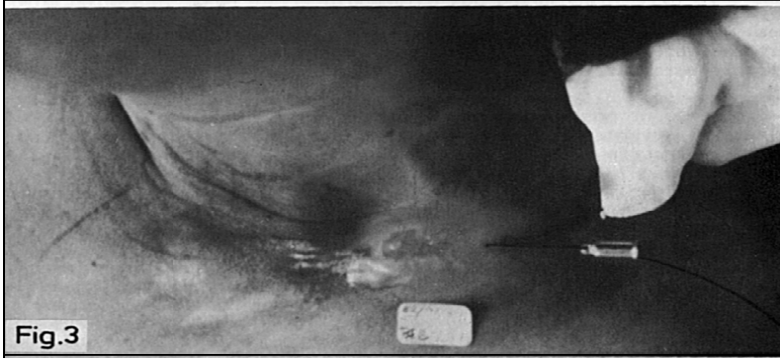


Fig. 3



Fig. 4

Zastosowania laserów w różnych działach medycyny

W **chirurgii ogólnej** stosowane są lasery CO₂ i Nd:YAG do cięcia tkanek oraz lasery Nd:YAG i argonowy do koagulacji. Cięcia laserowymi nożami chirurgicznymi wykonuje się metodą bezkontaktową i kontaktową. W pierwszym przypadku na tkankę bezpośrednio działa światło lasera. W drugim, poza światłem, dochodzi oddziaływanie termiczne z rozgrzanego przez promień laserowy szafirowego ostrza lancetu. Zastosowanie "noża" CO₂ jest szczególnie wskazane w przypadku wycinania nowotworów złośliwych i martwicy oparzeniowej, zaś Nd:YAG w laseroterapii brodawczaka ludzkiego, w przezskórnej angioplastyce zmian miażdżycowych tętnic z wykorzystaniem kontaktowej fotoablacji. Poza tym stosuje się lasery argonowy, erbowy, holmowy, półprzewodnikowe dużej mocy. Główne zalety noża CO₂ to minimalna utrata krwi, minimalne otwarcie naczyń krwionośnych z jednoczesną częściową koagulacją, "Suche" pole operacyjne, minimalizowanie urazów mechanicznych, brak tkanek martwiczych i zakażonego materiału, cięcie bez kontaktu z guzem, bez jego traumatyzacji, a także łatwość pokrycia powstałych ubytków, lepsze wygajanie przeszczepów skóry, większa szybkość.

Duży postęp w rozwoju chirurgii wystąpił w latach siedemdziesiątych dzięki wprowadzeniu do praktyki urządzeń światłowodowych umożliwiających dokonywanie **operacji laparoskopowych (sztywny endoskop) i endoskopowych**. Pozwoliło to na użycie giętkiego endoskopu (fibroskop), dzięki czemu możliwy stał się dostęp do organów wewnętrznych pacjenta bez rozcinania powłok skórnych. **Fibroskop**: wiązka światłowodów do przekazywania obrazu, światłowód oświetlający pole widzenia i światłowód przenoszący światło o dużej mocy oraz kanałów do wprowadzenia narzędzi chirurgicznych (mininożyczek, elektrod, kleszczy, termometrów, strzykawek), powietrza, ssawek, płynów, przystawek USG, młotków ultradźwiękowych itd. Badania fibroskopem obejmują przełyk, tchawicę, oskrzela, żołądek, dwunastnicę, jelito grube, nerki, pęcherz moczowy, drogi rodne, serce, stawy, kanał kręgowy, komory mózgu. Fibroskopy pozwalają wykonać zabiegi i operacje chirurgiczne (endoskopia w urologii – kruszenie złożeń)

W **okulistyce** stosowane są lasery ekscymerowe, argonowe, kryptonowe, CO₂, Er:YAG, i półprzewodnikowe głównie do punktowej koagulacji, nacinania oraz fotoablacji. Lasery stosowane są w leczeniu jaskry, zaćmy, cyst, zrostów, odwarstwień siatkówki, retinopatii cukrzycowej, szeregu schorzeń naczyniowych oraz w chirurgii refrakcyjnej oka itp.

W **dermatologii** stosowane są lasery Nd:YAG do koagulacji głębokich naczynek jamistych, znamion naczyniowych, nowotworów skóry oraz zmian skóry wywołanych brodawczakiem ludzkim; lasery argonowe do leczenia znamion naczyniowych płtykich oraz zmian

barwnikowych (w tym tatuaży). Szczególnie istotna w zastosowaniach laserów Nd:YAG jest głęboka penetracja tkanki w odróżnieniu do bardziej kosmetycznych zastosowań laserów argonowych.

W **laryngologii** stosowane są lasery CO₂ do zabiegów mikrochirurgicznych w tym głównie onkologicznych, Nd:YAG do zabiegów endoskopowych chirurgii nosa (usuwania polipów, przerostu małżowiny oraz zrostów błony śluzowej), Er:YAG dla perforacji tkanek w schorzeniach narządu słuchu. Szczególnie istotne jest ograniczenie wielkości urazu, natychmiastowa hemostaza (mechanizm zapobiegający wypływowi krwi z naczyń krwionośnych) w zakresie naczyń krwionośnych i limfatycznych o średnicy do 0.5 mm jałowość ran oraz szybkość działań chirurgicznych przez połączenie cięcia, odparowania i hemostazy.

W **pneumonologii** lasery Nd:YAG stosowane są do cięcia: chirurgicznej rekanalizacji dróg oddechowych, jatrogennych zwężeń tchawicy, usuwania ciał obcych oraz koagulacji: receptorów kaszlu czy źródeł krwawienia.

W **gastroenterologii** stosowane są lasery Nd:YAG dla metody endoskopowej ablacji przy udrażnianiu przełyku (w zastosowaniach onkologicznych), usuwaniu nowotworów żołądka, czy jelita grubego oraz dla endoskopowej koagulacji źródeł krwawienia (wrzodów trawiennych żołądka, dwunastnicy oraz żyłaków przełykowych). Do zalet leczenia należy: szybkie przywrócenie drożności zwężonego odcinka, wykonanie zabiegu przy znieczuleniu miejscowym w trybie ambulatoryjnym, powtarzalność zabiegu, relatywnie niskie koszty leczenia.

W **ginekologii** wykorzystywane są lasery CO₂ w procesie fotoablacji (wyparowania) zmian nowotworowych szyjki macicy, laparoskopii ginekologicznej w leczeniu niepłodności spowodowanej zrostami i niedrożnością jajowodów, zrostami i przegrodami wewnątrzmacicznymi, endometriozą miednicy małej oraz policystycznymi jajnikami. Lasery Nd:YAG stosowane są w histeroskopii laserowej (metoda dotykowa rozgrzaną końcówką światłowodu lasera) dla usuwania zrostów wewnątrzmacicznych, polipów oraz niszczenia nieprawidłowego endometrium w nawracających krwotokach macicznych; w laparoskopii w zastosowaniach do terapii ciąży jajowodowej, usuwania torbieli przydatków okołojajnikowych jak i mięśniaków. Dla ablacji plazmowej i koagulacji zwyrodniałych jajników stosuje się również z powodzeniem lasery KTP oraz argonowy.

W **urologii** do kruszenia złogów w moczowodzie stosowane są impulsowe lasery barwnikowe (najlepiej o długości fali 504 nm), aleksandrytowe oraz Nd:YAG. Te ostatnie stosowane również są dla przezcewkowej ablacji stercza, koagulacji guzów pęcherza moczowego oraz chirurgii nerki. W przypadku chirurgii nerki niezwykle istotną cechą jest głęboka koagulacja cechująca lasery Nd:YAG. W **neurochirurgii** stosowane są lasery Nd:YAG dla koagulacji

nowotworów (glejopochodnych, oponiaków, nerwiaków, przerzutów). Zastosowanie lasera Nd:YAG do usuwania (koagulacji) nowotworów pozwala na ograniczenie pola inwazji, zmniejszenie krwawienia oraz ułatwia oddzielenie guza od otaczającej tkanki.

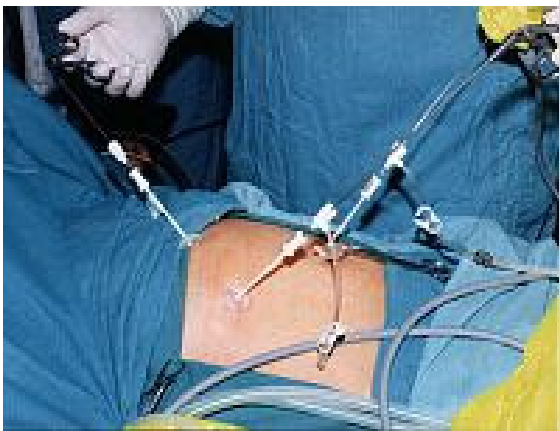
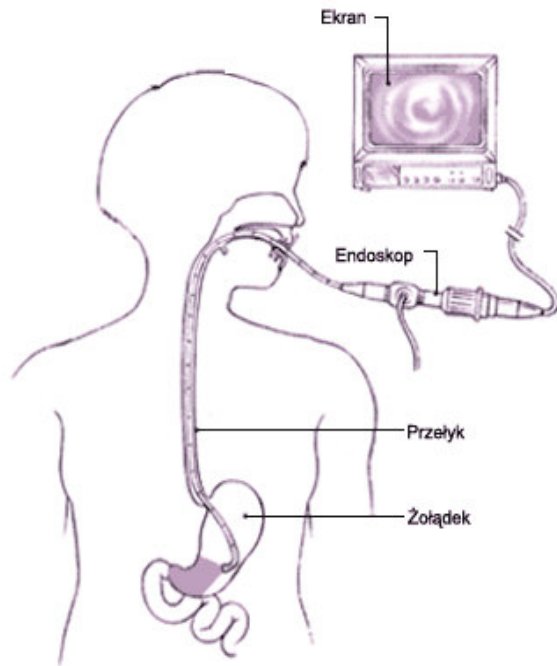
Najpopularniejszym motywem stosowania laserów w **stomatologii** jest odwieczne marzenie ludzkości usunięcia związku przyczynowo skutkowego pomiędzy wizytą u stomatologa, a bólem spowodowanym wzrostem temperatury oraz mechanicznymi wibracjami występującymi podczas borowania wiertłem. O ile usunięcie bolesnych wibracji jest w przypadku laseroterapii samo przez się zrozumiałe o tyle ograniczenie termicznych oddziaływań promieniowania lasera na ząb możliwe jest jedynie przez stosowanie ultrakrótkich impulsów w zakresie pikosekundowym (10^{-12} s). Ograniczanie zmian temperatury jest tym istotniejsze, że szybkie zmiany temperatury (w trakcie topienia i zestalania się szkliwa) mogą doprowadzić do głębokich mikropęknięć szkliwa (dochodzących do 3 milimetrów, tj. do zębiny) które mogą stać się zarodkami nowej próchnicy. Co więcej stosowanie pikosekundowych impulsów laserowych dla usuwania tkanek twardych umożliwia bardziej selektywne usuwanie uszkodzonych przez próchnicę szkliwa i zębiny. Występująca dla tak krótkich impulsów ablacja plazmowa usuwa zdemineralizowane szkliwo dziesięć razy szybciej niż zdrową tkankę. Otwory wykonane w materiale zęba w trakcie ablacji materiału posiadają gładkie (szkliste) ścianki - stanowiące w pewnym stopniu dodatkową zapórę przed dalszym rozprzestrzenianiem się próchnicy. Struktury wielkości do 20 mikrometrów na dnie otworu tworzą dobre warunki dla adhezji materiałów wypełniających ubytek. Najczęściej stosowane lasery w chirurgii stomatologicznej to CO₂ oraz Nd:YAG do operacji na tkankach miękkich (w tym znane są przykłady ich stosowania dla sterylizacji miazgi) ze szczególnym uwzględnieniem zmian nowotworowych. Do obróbki ubytków szkliwa i zębiny ze względu na opisane wyżej problemy zaleca się krótko impulsowe lasery Er:YAG i Nd:YLF.

Znane są liczne zastosowania **biostymulacyjne** laserów półprzewodnikowych i He-Ne dla leczenia trudno gojących się ran i owrzodzeń, wspomaganie wygajania przeszczepów skóry, ograniczanie bólu, obrzęków i stanów zapalnych, poprawienia wskaźników ukrwienia. Własności te znalazły zastosowanie w **reumatologii, ortopedii, rehabilitacji, stomatologii, leczeniu chorób krążenia i otolaryngologii**. W **okulistyce** stosowane są w celu biostymulacji również lasery argonowy i kryptonowy. Aspekt biostymulacyjny (w tym przeciwbólowy) niskoenergetycznego promieniowania laserów wykorzystywany jest w stomatologii do leczenia neuralgii, zatrzymanych zębów trzonowych trzecich, chorób stawu skroniowo-żuchwowego i artopatii z zespołem Costena włącznie, zapaleń zębodołów, znoszenia nadwrażliwości zębiny, aft nawrotowych, w celu zniesienia bólu poekstrakcyjnego i po zabiegach chirurgicznych.

ENDOSKOPIA

Endoskopia to ogólna nazwa zabiegów diagnostyczno-leczniczych w medycynie polegających na badaniu wnętrza ciała ludzkiego przy wykorzystaniu endoskopów (aparatów umożliwiających doprowadzenie światła oraz optyki do wnętrza przewodu pokarmowego, oddechowego oraz jam ciała).

Badania endoskopowe polegają na wprowadzaniu do wnętrza ciała pacjenta sondy endoskopu (część endoskopu zawierająca światłowód do oświetlenia badanego pola, obrazowód - przekazujący obraz z wnętrza badanego narządu oraz kanał narzędziowy służący do wprowadzenia specjalnych narzędzi służących do pobierania materiału do badań i wykonywania zabiegów). Pierwsze badanie endoskopowe przełyku i żołądka nastąpiło w roku 1957 na Uniwersytecie Michigan w wykonaniu Hirchowitza, Curtisa i Petersa. Natomiast sama koncepcja endoskopii (*zagłądania do ludzkiego ciała przez rurę*) pojawiła się już na początku naszego wieku.



miniaturowej kamery CCD, umieszczonej na wprowadzanym do pacjenta koniuszku endoskopu.

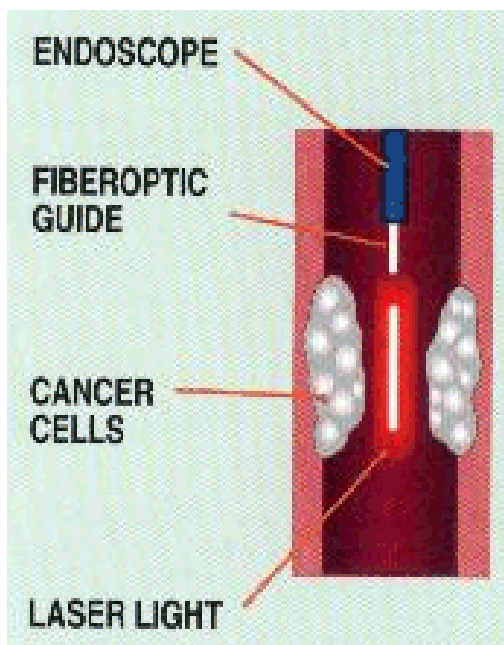
Endoskop zazwyczaj składa się ze źródła światła, którym oświetla się wnętrze chorego (mogą to być np. 300W źródła ksenonowe), następnie z kanału światłowodowego, obiektywu, wziernika i manipulatora. Wziernik może być



okularem, w który patrzy się bezpośrednio, lub też może być sprzężony z kamerą i monitorem.

Dodatkowo endoskopy mogą posiadać kanały narzędziowe, którymi można pobierać próbki (tzw. kanał biopsyjny) lub przez które można wprowadzać do ciała pacjenta małe urządzenia chirurgiczne (kleszczyki, pętle) do drobnych operacji (np. wycinania polipów). Poza takimi kanałami, występują także kanały wodne (np. w gastroskopach) lub powietrzne (np. w laparoskopach do wytwarzania pod ciśnieniem przestrzeni powietrznych dla endoskopu).

Włókna optyczne endoskopu mogą być używane, jako kanał transportujący wiązkę laserową, co wykorzystuje się do leczenia (przypalania) ran i niektórych operacji chirurgicznych (np. udrożnianie przełyku przy guzach nowotworowych).



Niektóre endoskopy mogą mieć na końcu sondę USG, umożliwiającą wykonywanie również takich badań „od wewnątrz”. Jest to przydatne w diagnostyce nowotworów.

Włókna optyczne obserwacyjne endoskopu muszą przebiegać równolegle, aby nie zakłócić obrazu. Mogą być na jednym końcu poszerzane w celu wykonywania powiększeń (ma to nieco lepsze właściwości niż stosowanie soczewek). Światłowody transmitujące oświetlenie od źródła światła nie muszą być natomiast

równoległe. Włókna optyczne oświetlające są ponadto znacznie grubsze od obserwacyjnych, gdyż nie wpływa to na rozdzielczość obrazu. Z rozmiarami włókien obserwacyjnych wiąże się ich liczba, sięgająca dziesiątek tysięcy.

Obiektyw endoskopu (w klasycznym endoskopie) to system soczewek, zapewniających odpowiedni kąt widzenia i skupianie odpowiednich wiązek na włóknach światłowodu. Soczewki te maksymalizują przy tym wykorzystanie pola widzenia pojedynczych włókien światłowodowych. Obiektyw, w niektórych endoskopach może mieć pryzmat, zginający pole widzenia w którymś z kierunków.

Na drugim końcu endoskopu, w wypadku korzystania z okularu, występuje analogiczny jak w obiektywie układ soczewek, odtwarzający wprowadzony do światłowodu obraz.

Sterowanie końcówką może być realizowane za pomocą systemu linek, które skręcając się z jednej strony potrafią zgiąć przewód endoskopu.

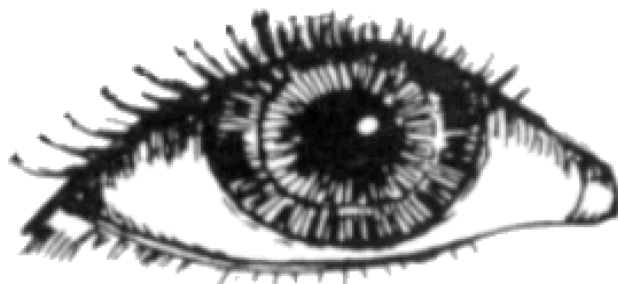
W chwili obecnej za pomocą endoskopu przeprowadza się nim. Badania:

- Bronchoskopia - Badania układu oddechowego

- Laryngoskopia - badanie krtani
- Gastroskopia - Badania przewodu pokarmowego
- Kolonoskopia - badanie jelita grubego
- Endoskopowa cholangiopankreatografia wsteczna - badanie umożliwiające diagnostykę schorzeń dróg żółciowych.
- Artroskopia - wziernikowanie stawu, np. Kolanowego.
- Kolposkopia - wziernikowanie pochwy i szyjki macicy
- Cystoskopia - wziernikowanie pęcherza, cewki moczowej, moczowodów oraz prostaty (u mężczyzn)
- Laparoscopia - badanie wnętrza jamy otrzewnej, np. Żołądka
- Endoscopia igłowa, np. endoscopia oczna, angioendoscopia, korzystająca z ultracienkich włókien optycznych, umożliwiających oglądanie np. wewnętrznych struktur oka czy zastawek serca i naczyń wieńcowych.

Przeprowadza się również operacje endoskopowe

Badanie wzroku



Refraktometria automatyczna, czyli komputerowe badanie refrakcji pozwala na zautomatyzowane, bardzo szybkie określenie wady bez żadnego przygotowania badanego.

Działanie aparatu opiera się bądź na zasadzie refraktometrii subiektywnej (optometrii), tzn. wprowadzaniu przed oko soczewek różnej mocy aż do momentu optymalnej korekcji ostrości wzroku, lub na zasadzie automatycznej skiaskopii przy użyciu podczerwieni. Osoba badająca dokonuje kilkukrotnego pomiaru dla jednego i drugiego oka oddzielnie. Dodaje lub odejmuje stopniowo soczewki skupiające lub rozpraszające, a pacjent obserwuje optotypy i podaje, przy których wartościach widzi wyraźnie. Wartość wady zostaje podana w formie wydruku komputerowego. Refraktometr, choć ma mikroprocesor, nie jest komputerem. Nie dokonuje analizy ani oceny narządu wzroku, ani nie wykrywa chorób oczu, mierzy jedynie wielkość wady: nadwzroczność, krótkowzroczność i astygmatyzm

Badanie dna oka jest badaniem niezwykle ważnym - pozwala na rozpoznanie większości schorzeń oka, zwłaszcza siatkówki (odklejanie siatkówki, krwotoki do siatkówki, choroby plamki siatkówki), błony naczyniowej (zapalenie, nowotwory), nerwu wzrokowego (zapalenie, jaskra) i ciała szklanego (wylew krwi, zmętnienia).

Specjalny przyrząd do badania dna oka, **oftalmoskop**, ma własne oświetlenie i zasilany jest przez połączenie z siecią elektryczną poprzez transformator lub poprzez zamontowane w rękojeści wziernika baterie czy akumulator. W głowicy wziernika specjalny układ optyczny powoduje skierowanie strumienia światła żarówki w kierunku badanego oka. Niewielki otwór umożliwia oglądanie tak oświetlonego oka. Wziernik wyposażony jest w układ soczewek o różnej wartości optycznej, które można ustawić w otworze obserwacyjnym po przesunięciu pokrętki.

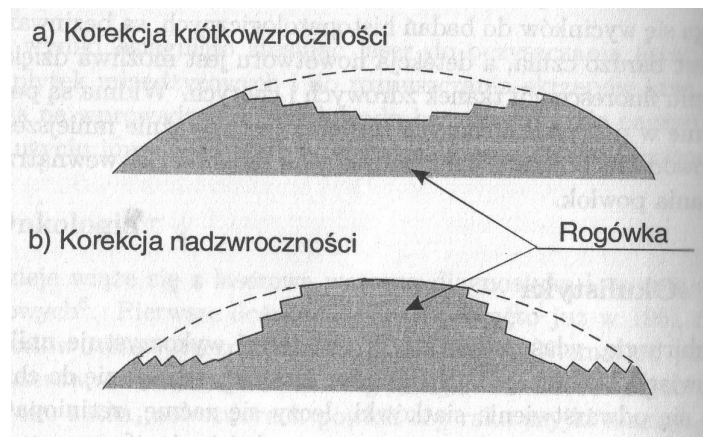


Wzierniki często są dodatkowo wyposażone w układy różnych przysłon, filtrów barwnych, jak i dają możliwości uzyskania różnej średnicy oświetlanego pola na dnie oka. Ułatwiają one dostrzeganie i różnicowanie zmian.

Technika **pomiaru ciśnienia śródgałkowego** (prawidłowe 14-22 mm Hg) ma swoją długą historię. Najprostszy, choć najbardziej niedokładny sposób oceny ciśnienia śródgałkowego polega na ocenie napięcia gałki ocznej przez ucisk palcami. Jednak tylko lekarz z dużym doświadczeniem może wtedy stwierdzić, czy ciśnienie jest podwyższone, czy w granicach prawidłowych.

W ostatnich latach opracowano dokładne metody pomiaru ciśnienia śródgałkowego przy użyciu bezdotykowych tonometrów. Badanie tonometrem bezdotykowym jest niebolesne i nie wymaga znieczulenia oka. Zasada jego działania polega na komputerowej analizie przez odpowiedni układ optyczny wielkości odkształcenia fragmentu rogówki po uderzeniu jej strumieniem powietrza. Badany odczuwa to jak "dmuchnięcie" powietrza w oko. Pomiar jest kilkakrotnie powtarzany i dzięki temu dokładny.

Chirurgia refrakcyjna – zmiana siły skupiającej oka – korekcja nadwzroczności i krótkowzroczności. Modelowanie rogówki wykonuje się specjalną przystawką sprzężoną z laserem ekscymerowym ArF (193 nm). Dokonuje się fotoablacji fragmentów rogówki na określoną grubość z dokładnością ułamka mikrometra.



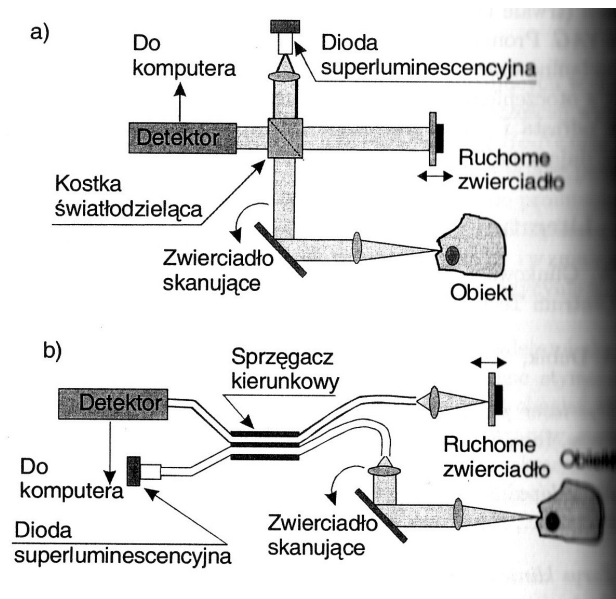
Korekcja krzywizny rogówki w metodzie corneal shaping

Do operacji i zabiegów zewnętrznych oka wykorzystuje się lasery holmowe (2090 nm) i erbowe (2900 nm). Lasery stosuje się w przypadku **jaskry** (wzrost ciśnienia wewnątrzgałkowego wskutek zatoru uniemożliwiającego przepływ cieczy wodnistej prowadzący do zwężenia pola widzenia, a z czasem zaniku nerwu wzrokowego) oraz zaćmy (usunięcie zmętniałej soczewki i wstawienie implantu).

Tomografia optyczna

Tomografia komputerowa jest bezinwazyjną i bezkontaktową techniką diagnostyczną, stosowaną do obiektów przezroczystych lub słabo pochłaniających (diagnostyka oka, skóry i zębów).

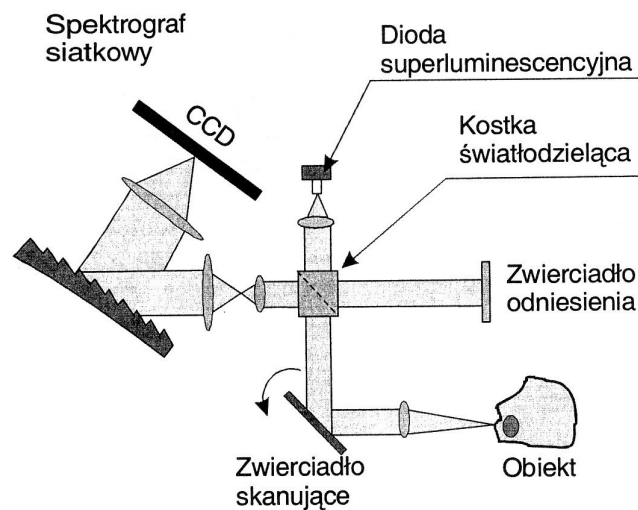
Wykorzystuje się światło koherentne i niekoherentne. Obrazowanie przy pomocy światła częściowo spójnego – OCT (Optical Coherence Tomography). Tomografia optyczna polega na obrazowaniu odbijających światło powierzchni lub obiektów. Metoda OCT pozwala na określenie kształtu i położenia w przestrzeni odbijającej powierzchni rozdzielającej ośrodki o różnych współczynnikach załamania. Źródło światła – dioda superluminescencyjna, emitująca promieniowanie o dużej koherencji przestrzennej, ale bardzo małej czasowej (odwrotnie proporcjonalnej do szerokości widmowej pasma emisji). Podstawowe zadanie OCT – pomiar różnicy faz fali odniesienia i promieniowania odbitego na strukturach wewnętrznych badanych obiektów, tam gdzie zmienia się współczynnik załamania – obserwacja obrazu interferencyjnego z interferometru Michelsona. Prążki interferencyjne będą widoczne tylko wtedy, gdy drogi optyczne w obu ramionach interferometru będą równe z dokładnością do długości koherencji. Stąd można wnioskować o położeniu obiektu.



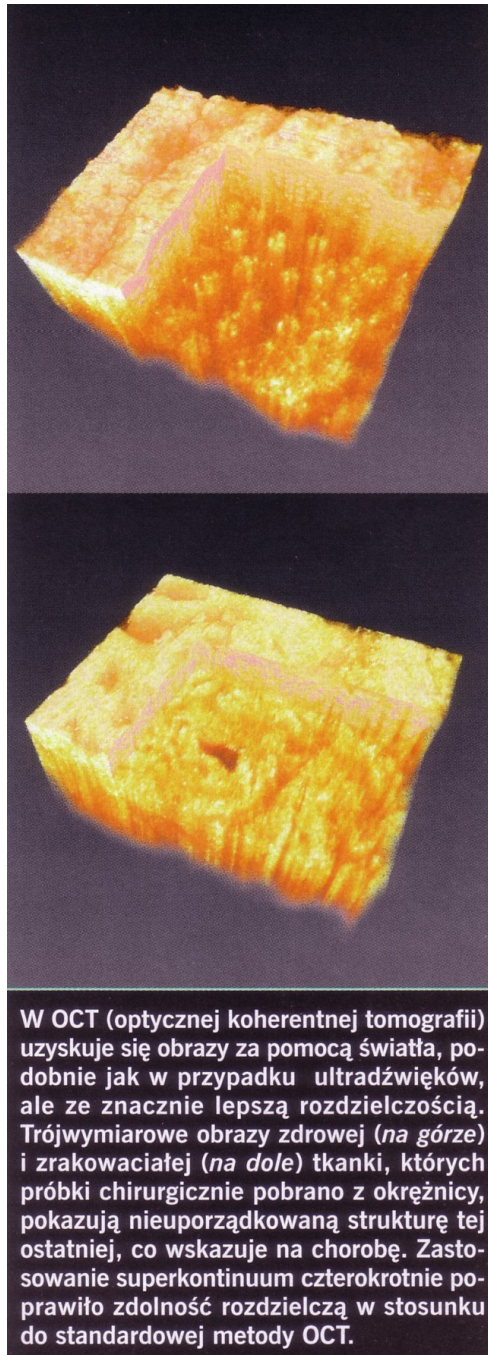
Tomograf optyczny wykorzystujący otwarty (a) i światłowodowy (b) interferometr Michelsona

W czasowej OCT, znając położenie zwierciadła odniesienia, przy którym zaobserwowano prążki, określa się położenie obiektu w jednym przekroju. Wielokrotne przesunięcie równoległe wiązki skanującej umożliwia skonstruowanie mapy warstw rozpraszających. Zdolność rozdzielcza urządzenia zależy od długości koherencji emitowanego promieniowania i wynosi od 4 do 25 μm .

W widmowej OCT w ramieniu odniesienia brak części ruchomych. Informacja o położeniu powierzchni odbijających zawarta jest w transformacji Fouriera obrazu interferencyjnego, zbieranego przez spektrograf zaopatrzonej w szybką kamerę CCD. Obie metody znajdują zastosowanie w diagnostyce oka, skóry i zębów.



Tomograf optyczny do częstotliwościowej OCT



OCT – Optical Coherence Tomography – obrazy tkanek wysokiej rozdzielczości – siatkówka oka, komórki rakowe, choroby skórne i układu pokarmowego. Obraz OCT uzyskuje się rozdzielając światło na dwie wiązki, jedna oświetla próbkę, druga, wiązka oświetlenia, kierowana jest do światłowodu. W wyniku interferencji obu wiązek powstaje obraz badanej tkanki. Rozdzielczość tego obrazu $0,5 \mu\text{m}$ (USG – $100 \mu\text{m}$) – typowa komórka $10 \mu\text{m}$.

Supercontinuum (S.C.) ma krótką drogę spójności, a szerokość jego widma jest $>$ od każdego lasera femtosekundowego – idealne źródło światła dla OCT.