



## Opracowywanie ubytków za pomocą lasera stomatologicznego

CE  
0123

## **Opracowywanie ubytków za pomocą lasera stomatologicznego: bieżące osiągnięcia w wykorzystaniu stomatologicznych systemów laserowych najnowszej generacji dla laserów erbowych pracujących w trybie zmiennych impulsów kwadratowych.**

**Matjaz Lukac<sup>1</sup>, Marko Marincek<sup>1</sup>, Ladislav Grad<sup>2</sup>, Zelimir Božič<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Research Associate, Institute Jozef Stefan, Ljubljana, Slovenia*

<sup>2</sup> *Research Associate, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia*

<sup>3</sup> *Fidelitas Dental Practice, Postojna, Slovenia*

**Streszczenie i cele:** Najnowsze i przełomowe osiągnięcia technologiczne wykorzystane w systemach laserowych dla laserów stomatologicznych najnowszej generacji Er:YAG z trybem zmiennych impulsów kwadratowych (VSP – variable square pulse, zmienne impulsy kwadratowe) posiadają dwie dodatkowe opcje: tryb SSP (Super Short Pulse – super krótkie impulsy) do bardzo precyzyjnej i minimalnie inwazyjnej ablacji laserowej oraz tryb MAX do maksymalnych prędkości opracowywania laserowego. Celem niniejszego badania były porównanie dwóch nowych trybów laseroterapii VSP Er:YAG z kątnicą mechaniczną i ocena ich skuteczności w procedurach apikoektomii. Poza tym oceniano również bezpieczeństwo trybu MAX.

**Schemat badania / Materiały i metody:** Prędkości borowania laserowego w usuniętych ludzkich zębach mierzono dla różnych ustawień laseroterapii w trybie VSP i porównywano z wcześniej opublikowanymi prędkościami borowania, jakimi dysponują kątнице stomatologiczne. Wykonano również mikrografie elektronowe otworów wykonanych w twardej tkance zęba za pomocą lasera Er:YAG w trybie MAX.

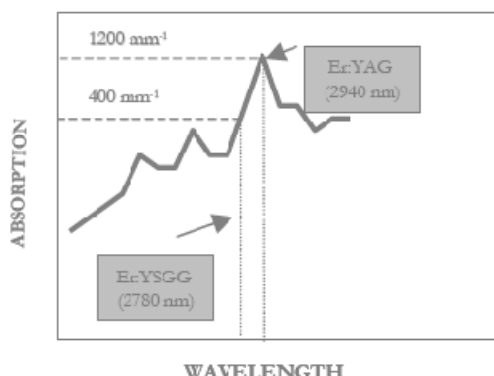
**Wyniki:** Tryb SSP lasera erbowego cechuje się największą skutecznością energii borowania dla pojedynczego impulsu, podczas gdy procedura lecznicza w trybie MAX jest 1,6 razy szybsza w porównaniu z kątnicą stomatologiczną. Fotografie otworów ablacyjnych spod skaningowego mikroskopu elektronowego, wykonanych w trybie MAX, wykazały brak pęknięć i nieobecność uszkodzeń termicznych w obrębie tkanki twardej zęba poddanej ablacji.

**Wnioski:** Najnowsze dwa tryby pracy lasera Er:YAG: SSP (Super Short Pulse – super krótkie pulsy) służące do wykonywania bardzo precyzyjnej i minimalnie inwazyjnej ablacji laserowej oraz tryb MAX przeznaczony do uzyskania maksymalnych prędkości borowania laserowego stanowią doskonałą alternatywę dla wiertel mechanicznych, są bardziej precyzyjne i mniej inwazyjne, nie zmniejszając równocześnie bezpieczeństwa, łatwości użytkowania ani prędkości pracy.

### **WSTĘP**

Lasery Er:YAG (erbowy) jest uznawany za stomatologiczny laser z wyboru do skutecznej, precyzyjnej i minimalnie inwazyjnej ablacji w twardych tkankach zęba. Spośród wszystkich dostępnych laserów pracujących w spektrum podczerwieni, długość promieniowania lasera Er:YAG równa 2,94 μm cechuje się najwyższą absorpcją w wodzie i w hydroksyapatycie (patrz rys. 1). Tym samym jest on optymalnym laserem do laserowego opracowywania szkliwa, zębiny oraz wypełnień kompozytowych.

Lasery stomatologiczne we wczesnej standardowej technologii nie zostały zaakceptowane przez środowisko stomatologiczne, ponieważ ich prędkości opracowywania ubytków są zdecydowanie niższe niż w przypadku wiertel mechanicznych. Zmieniło się to wraz z wprowadzeniem laserów stomatologicznych VSP<sup>1</sup>, dzięki wykorzystaniu technologii Fidelis VSP<sup>2</sup> (VSP – Variable Square Pulse, zmienne impulsy kwadratowe), umożliwiającej generowanie bardzo krótkich impulsów z możliwością regulacji ich czasu trwania. Testy potwierdziły, że prędkość ablacji w technologii VSP dla laserów Er:YAG jest porównywalna do prędkości uzyskiwanych za pomocą metod klasycznych.



Rys. 1. Laser Er:YAG (2,94  $\mu\text{m}$ ) cechuje się najwyższą absorpcją w wodzie i w hydroksyapatycie. Innym laserem, który emituje promieniowanie w spektrum około 3  $\mu\text{m}$  jest laser Er:YSGG (2,78  $\mu\text{m}$ ), jednak laser ten cechuje się o 300% niższą absorpcją i tym samym mniej nadaje się do borowania laserowego.

Absorption	Absorpcja
Wavelength	Długość fali promieniowania

Przełomowe technologiczne osiągnięcia wykorzystane w systemach laserowych najnowszej generacji dla laserów stomatologicznych Er:YAG z trybem zmiennych impulsów kwadratowych (VSP – variable square pulse)<sup>3</sup> posiadają dwie dodatkowe opcje, tj. tryb SSP<sup>4</sup> (Super Short Pulse – super krótkie impulsy), przeznaczony do bardzo precyzyjnej i minimalnie inwazyjnej ablacji laserowej oraz tryb MAX, umożliwiający uzyskanie maksymalnych prędkości opracowywania laserowego.

Celem niniejszego badania *in vitro* było porównanie skuteczności i bezpieczeństwa nowych trybów laseroterapii VSP laserem Er:YAG podczas terapii tkanek twardych zęba ze skutecznością leczenia za pomocą klasycznej kątownicy stomatologicznej.

## MATERIAŁY I METODY

Wykonano eksperymenty wykorzystując najnowszej generacji laser stomatologiczny Fidelis Plus III Er:YAG VSP (produkowany przez firmę Fotona d.d.). Stosowano następujące tryby impulsowe: VLP – 1000  $\mu\text{s}$ , LP – 500  $\mu\text{s}$ , SP – 300  $\mu\text{s}$ , VSP – 100  $\mu\text{s}$ , SSP – 50  $\mu\text{s}$  oraz tryb MAX. Do zogniskowania wiązki lasera w ludzkim zębie po ekstrakcji stosowano bezkontaktową głowicę Fotona R02-C. Średnica plamki wiązki lasera w zębie wynosiła 0,9 mm.

W pierwszej grupie prowadzonych eksperymentów (oceniających skuteczność pojedynczych impulsów) skuteczność borowania laserowego za pomocą pojedynczych impulsów mierzono podczas równoczesnego stosowania rozpylacza wodnego i niskiej wartości energii pojedynczego impulsu. Energia była na poziomie 100 mJ, a częstotliwość wynosiła około 1Hz w różnych trybach impulsów laserowych (czasy trwania).

W drugiej grupie doświadczeń (eksperymenty oceniające prędkość borowania) mierzono czas wymagany, aby całkowicie przeciąć 2 mm odcinek korzenia zęba. Pomiary wykonywano dla piętnastu próbek zębów usuniętych u osób dorosłych. Próbki cięto na skrawki o grubości 2 mm. Borowanie w zębinie przeprowadzono przy użyciu lasera działającego w trybie MAX z wysoką częstotliwością 20 Hz i z pomocą rozpylacza wodnego. Zmierzony czas porównywano z wcześniej opublikowanymi wynikami badań dotyczącymi borowania mechanicznego w podobnych warunkach<sup>5</sup> (chirurgiczna

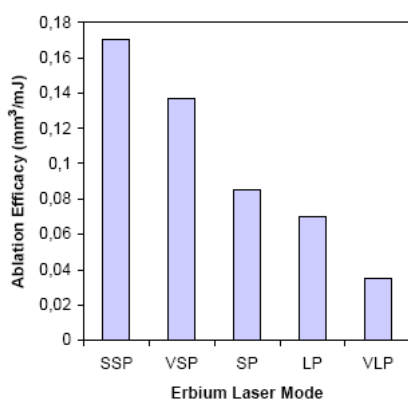
kątnica redukcyjna Intra 3614 N, KaVo, Biberbach, Niemcy z redukcją 4:1, o obrotach 7500/min, z wiertłami szczelinowymi o rozmiarze 12 zgodnie z normami ISO.

Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wykonano również fotografie otworów po ablacji w twardych tkankach zęba w trybie Er:YAG MAX.

## WYNIKI

### Eksperyment dotyczący skuteczności pojedynczego impulsu

Na rysunku 2 przedstawiono wcześniej opublikowane dane<sup>4</sup> dotyczące zależności między wydajnością ablacji a czasem trwania impulsu lasera Er:YAG. Stosowano następujące tryby impulsów laserowych lasera Fidelis: VLP – 1000  $\mu$ s, LP – 500  $\mu$ s, SP – 300  $\mu$ s, VSP – 100  $\mu$ s i najnowszy – SSP – 50  $\mu$ s. Zgodnie z wykresem (rys. 2) skuteczność ablacji wzrasta wraz ze skróceniem czasu trwania impulsów. Najbardziej wydajny i skuteczny okazał się nowy tryb SSP – SUPER SHORT PULSE (super krótkie impulsy), w którym efekty wydajności i redukcji, efekt dyfuzji cieplnej oraz efekt kontroli resztek są zminimalizowane. Poza tym, stosując impulsy w trybie SSP, rozpraszanie promieniowania laserowego w powstających resztkach tkanek jest minimalne, a jakość i precyzja otworów opracowanych laserowo ulegają znaczącej poprawie.



Ablation efficacy (mm <sup>3</sup> / mJ)	Skuteczność ablacji (mm <sup>3</sup> / mJ)
Erbium Laser Mode	Tryb pracy lasera erbowego

Rys. 2. Skuteczność ablacji w zębnie dla różnych trybów czasu trwania impulsu lasera Er:YAG (2,94  $\mu$ m), zgodnie z danymi opublikowanymi w punkcie 4 piśmiennictwa. Tryb SSP lasera Er:YAG cechuje się najwyższą skutecznością ablacji pojedynczych impulsów.

### Eksperyment z prędkością borowania

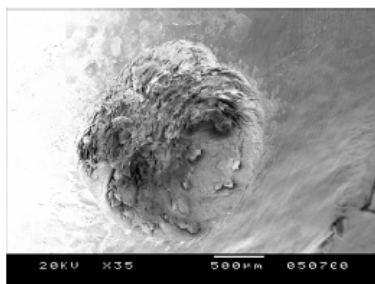
Porównanie uzyskanych czasów wykazało istotną różnicę między prędkością borowania laserem Er:YAG w trybie MAX a wcześniej opublikowanymi prędkościami opracowywania z zastosowaniem kątnicy stomatologicznej (rys.3).

	Kątnica stomatologiczna <sup>5</sup>	Tryb MAX lasera
Czas (s)	3,6	<b>2,2</b>
SD (odchylenie standardowe)	0,95	<b>0,54</b>

Rys. 3. Zębina – porównanie czasów uzyskanych za pomocą kątницы stomatologicznej<sup>5</sup> oraz lasera Er:YAG w trybie MAX. Potwierdzono, że tryb MAX jest szybszy niż opracowywanie z zastosowaniem kątницы stomatologicznej.

### Ocena w skaningowym mikroskopie elektronowym

Obrazy w skaningowym mikroskopie elektronowym otworów powstałych w trakcie ablacji w twardych tkankach zęba za pomocą lasera Er:YAG w trybie MAX wykazały brak pęknięć lub cech uszkodzeń natury termicznej (rys. 4).

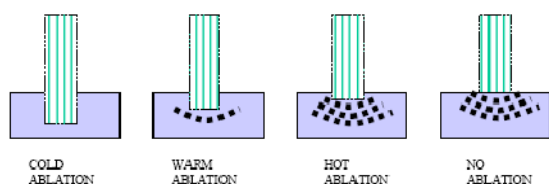


Rys. 4. Przykład otworu w szklwie po ablacji za pomocą lasera Er:YAG w trybie MAX. Nie zauważono pęknięć ani cech uszkodzenia termicznego.

### DYSKUSJA

Olbrzymi postęp w zakresie teoretycznego zrozumienia procesu ablacji laserowej tkanek biologicznych<sup>6</sup> ułatwił gwałtowny rozwój technologiczny stomatologii laserowej.

Aktualnie uznaje się, że dostępne są cztery schematy ablacji (patrz rys. 5), które zależą od relacji między czasem trwania impulsu lasera a energią impulsu (lub ściślej – fluencją lasera, tzn. energią lasera przypadającą na powierzchnię wyrażoną w  $J/cm^2$ ).



Rys. 5. Schematyczny przegląd czterech schematów ablacji.

Cold ablation	Zimna ablacja
Warm ablation	Ciepła ablacja
Hot ablatiom	Gorąca ablacja
No ablation	Brak ablacji

Przy wysokich wartościach energii i krótkim czasie trwania impulsów prędkość ablacji jest wyższa niż dyfuzja energii cieplnej w głąb tkanki w przypadku zużycia całej energii w ZIMNEJ ABLACJI. Wraz ze zmniejszaniem wartości energii  $i/$  lub wydłużeniem czasu trwania impulsu warstwa tkanki, w której zachodzą zmiany cieplne do zakończenia impulsu ulega pogrubieniu. Efekty cieplne stają się

wyraźniejsze, a równocześnie skuteczność ablacji zostaje znacząco zredukowana (CIEPŁA ABLACJA, a przy niższych wartościach energii GORĄCA ABLACJA). W przypadku podprogowej wartości energii ablacja nie ma miejsca (BRAK ABLACJI), a w następstwie całość energii ulega rozproszeniu pod postacią ciepła, niezależnie od czasu trwania impulsu lasera.

Należy pamiętać, że zmniejszając energię lasera, aby poprawić bezpieczeństwo pracy, operator może osiągnąć dokładnie odwrotny efekt od zamierzonego, tzn. dojdzie do silniejszych efektów cieplnych w tkance. Istotnym czynnikiem, który można wykorzystać do określenia wpływu energii lasera na tkankę zęba jest liczba Pecleta<sup>6</sup> lub Liczba Laser-Tkanka (Laser-Tissue-Number – LTN). LTN definiuje poniższy wzór:

$LTN = \text{natężenie mocy lasera} \times LTF,$

gdzie:

$\text{natężenie mocy lasera} = \text{fluencja lasera} / \text{czas trwania impulsu laserowego},$

a LTF (tkankowy współczynnik laserowy) jest stałym współczynnikiem, uzależnionym od długości fali promieniowania laserowego oraz poszczególnych fizycznych właściwości tkanki zębów:

$LTF = 0,5 \times \text{współczynnik absorpcji lasera} \times \text{czas relaksacji termicznej tkanki} / \text{specyficzne ciepło ablacji}$

W przypadku fluencji lasera powyżej progu ablacji zimna ablacja charakteryzuje się wartością  $LTN > 1$ .

Aby uzyskać zimną ablację, osoba obsługująca musi wybrać parametry lasera z  $LTN > 1$ . Jeżeli wybrany zostanie czas trwania poszczególnych pulsów  $t_L$ , ablacja rozpocznie się przy progowej wartości energii. Skuteczność ablacji rośnie wówczas wraz z rosnącą energią do momentu, gdy energia impulsu przekroczy wartość, przy której  $LTN > 1$ . Powyżej tej wartości efekt ablacji jest najbardziej skuteczny, najczęściej ma charakter „zimnej ablacji” i wzrasta liniowo wraz ze wzrostem energii promieniowania laserowego.

Aby leczenie było precyzyjne i dokładne przy niskich wartościach energii, impulsy lasera muszą być odpowiednio krótkie, aby wartość LTN była większa od 1. Najbezpieczniejszy jest schemat, w którym czas trwania impulsów jest krótszy niż czas relaksacji tkanki. W takiej sytuacji nie zachodzi ablacja ciepła ani gorąca. W przypadku szkliwa czas relaksacji termicznej wynosi około 100  $\mu\text{s}$ .

Z drugiej strony, gdy pożądana jest wysoka prędkość ablacji, najlepszym wyborem jest wykorzystanie wysokich energii impulsu i dłuższych czasów trwania impulsu, co daje pewność, że wartość LTN będzie wyraźnie powyżej 1. Wynika to z innego efektu, który wpływa na dynamikę ablacji – kontroli resztek, czyli absorpcji i rozpraszania energii lasera w cząsteczkach wyrzucanych z miejsca prowadzenia ablacji. Poziomą kontrolę resztek zależy od ich zagęszczenia i jest najwyższy w przypadku wysokich wartości LTN. Jako że gęstość resztek zależy od natężenia wiązki laserowej, korzystne jest uzyskanie  $LTN > 1$  przy dłuższych czasach trwania impulsu, tzn. w przypadku niższego natężenia wiązki lasera.

Lasery najnowszej generacji Er:YAG VSP umożliwiają operatorowi wybór następujących trybów: SSP (super krótkie impulsy: 50  $\mu\text{s}$ ), VSP (bardzo krótkie impulsy: 120  $\mu\text{s}$ ), SP (krótkie puls: 300  $\mu\text{s}$ ), LP (długie impulsy: 600  $\mu\text{s}$ ) i VLP (bardzo długie impulsy: 1000  $\mu\text{s}$ ).

Czas trwania impulsów w trybie SSP jest niezmiernie krótki, wynosząc około 50  $\mu\text{s}$ . Wartość ta znajduje się poniżej czasu relaksacji szkliwa, który wynosi 100  $\mu\text{s}$ . Impulsy SSP są zatem najlepiej dostosowane do precyzyjnej i dokładnej ablacji przy niskiej energii lasera.

W przypadku standardowej pracy zalecane są impulsy VSP i SP z wartością LTN powyżej 1, podczas gdy w przypadku maksymalnych prędkości ablacji najlepszy jest tryb MAX. Zapewnia on wartość LTN > 1 poprzez ustabilizowanie wartości energii promieniowania laserowego i czasu trwania impulsu na optymalnych, wysokich poziomach, równych odpowiednio 1000 mJ i 30  $\mu$ s.

W przypadku zastosowań w obrębie tkanek miękkich, kiedy pożądana jest koagulacja termiczna, najlepsze są tryby LP i VLP.

### Porównanie laserów Er:YAG i Er,Cr:YSGG

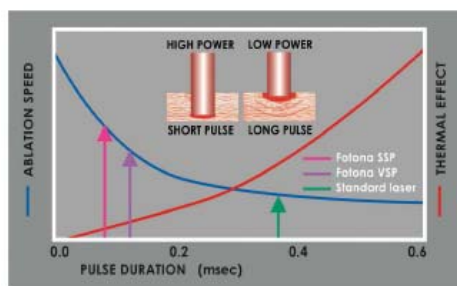
Jako że współczynnik absorpcji promieniowania lasera Er,Cr:YSGG jest trzykrotnie niższy niż w przypadku lasera Er:YAG, zakres bezpiecznych parametrów, które można wykorzystać stosując ten laser jest istotnie mniejszy. Energia progowa ablacji jest zatem trzy razy wyższa.

Po drugie zakres czasów trwania impulsów lasera Er,Cr:YSGG jest ograniczony wyłącznie do czasów dłuższych. Pod tym względem korzystniejszy jest laser Er:YAG, ponieważ oferuje różne szerokości impulsów, tj. aż do 50  $\mu$ s, podczas gdy laser Er,Cr:YSGG – ze względu na długi czas relaksacji krzyżowej jonu  $Cr^{3+}$  – jest ograniczony do minimalnej szerokości impulsu równej około 500  $\mu$ s. Aby zilustrować te ograniczenia, na rysunku 6 przedstawiono czasy trwania impulsu systemu laserowego Er:YAG (Fidelis Plus III, Fotona) oraz systemu laserowego Er,Cr:YSGG (Waterlase MD, Biolase). Należy pamiętać, że system laserowy Waterlase MD wykorzystuje względnie krótkie powtarzalne impulsy trwające tylko 140 ms w trybie H i odpowiednio 700  $\mu$ s w trybie S. Pomimo tego, ze względu na obecność jonów  $Cr^{3+}$  w kryształach lasera Er,Cr:YSGG, generowane impulsy lasera są o wiele dłuższe i w trybie H (trybie najkrótszych impulsów tego lasera) trwają około 600  $\mu$ s, natomiast w trybie S (dłuższych impulsów) – około 1200  $\mu$ s.

TRYB IMPULSOWY	CZAS TRWANIA IMPULSU
<b>Er:YAG (Fidelis Plus III)</b>	
SSP	80 $\mu$ s
VSP	150 $\mu$ s
SP	200 $\mu$ s
LP	500 $\mu$ s
VLP	800 $\mu$ s
<b>Cr,Er:YSGG (Waterlase MD)</b>	
H	600 $\mu$ s
S	1200 $\mu$ s

Rys. 6. Dostępne czasy trwania impulsów w systemach laserowych Er:YAG (Fidelis Plus III, Fotona) i Er,Cr:YSGG (Waterlase MD, Biolase).

Jednym z kluczowych czynników, które warunkują rodzaj oraz skuteczność wybranej ablacji laserowej, jest czas trwania impulsu laserowego. Jeżeli wymagana wartość energii jest dostarczana w krótkim czasie, wówczas jest niewiele czasu, aby energia mogła wydostać się z objętości tkanki poddanej ablacji, a tym samym mniej ciepła ulega dyfuzji do otaczających tkanek (patrz rys. 7).



Rys. 7. Utrzymując niezmienną wartość energii impulsu, wzrasta skuteczność ablacji, a efekty cieplne zmniejszają się wraz z coraz krótszym czasem trwania impulsu. Ze względu na długi czas krzyżowej relaksacji jonu  $Cr^{3+}$ , laser Er,Cr:YSGG nie jest w stanie działać poniżej około 500  $\mu s$ .

Ablation speed	Prędkość ablacji
Pulse duration (msec)	Czas trwania impulsu (ms)
High power	Wysoka moc
Low power	Niska moc
Short pulse	Krótki impuls
Long pulse	Długi impuls
Thermal effect	Efekt cieplny
Fotona SSP	Fotona SSP
Fotona VSP	Fotona VSP
Standard laser	Standardowy laser

Na podstawie powyższych rozważań dotyczących długości fali promieniowania laserowego i czasu trwania impulsu wykazano, że laser Er,Cr:YSGG nadaje się do zastosowań w obrębie tkanek miękkich, gdzie pożądane są pewnego stopnia działania termiczne o charakterze koagulacji, ale ma wiele ograniczeń w przypadku stosowania w obrębie tkanek twardych. Z drugiej strony, laser Er:YAG, w szczególności, gdy stosowany jest w trybie powtarzalnych impulsów VSP, może działać w odpowiednio dostosowanych czasach trwania impulsu – od super krótkich impulsów (SSP), które idealnie nadają się do precyzyjnej ablacji tkanek twardych do bardzo długich impulsów (VLP) w przypadku procedur wykonywanych w tkankach miękkich (patrz rys. 6).

## WNIOSKI

W przypadku precyzyjnych procedur w tkankach twardych (gdzie stosuje się niskie wartości energii impulsu) stwierdzono, że tryb SSP z czasem trwania impulsu krótszym niż czas relaksacji tkanek twardych ( $i LTN > 1$ ) jest najlepszym i najbezpieczniejszym trybem działania. Podyktowane jest to faktem, że w tym trybie osiąga się najwyższą wydajność borowania w trybie pojedynczych impulsów, a równocześnie dochodzi do uwalniania najniższych wartości energii cieplnej.

Jeżeli wymagane są maksymalne prędkości borowania laserowego, stwierdzono, że najbezpieczniejszym i najszybszym narzędziem do wykorzystania w laserowej stomatologii tkanek



twardych jest tryb MAX. Borowanie laserowe w trybie VSP MAX jest **1,6 razy szybsze** niż dotychczas opublikowane<sup>5</sup> prędkości borowania uzyskane za pomocą standardowych kątnic stomatologicznych.

Dzięki dwóm nowym trybom – SSP i MAX – udało się wreszcie uzyskać pierwotnie zakładane cele w zakresie stosowania laserów dentystycznych – zastąpienie wiertel mechanicznych bardziej precyzyjną i mniej inwazyjną technologią laserową, bez pogorszenia bezpieczeństwa, łatwości użycia i prędkości działania.

## **PIŚMIENNICTWO**

...

## **WYJAŚNIENIE**

Zamiarem niniejszej publikacji Laser and Health Academy (Akademia Zdrowia i Wykorzystania Laserów) jest ułatwienie wymiany informacji dotyczących opinii, wyników badań i doświadczeń klinicznych wśród społeczności stosującej lasery medyczne. Za zawartość niniejszej publikacji pełną odpowiedzialność ponoszą wyłącznie autorzy i nie może być ona w żadnym przypadku uważana za oficjalną informację producentów wyrobów medycznych na temat produktu. Jeżeli pojawią się jakiegokolwiek wątpliwości, należy sprawdzić wraz z producentem, czy określony produkt lub zastosowanie zostały zatwierdzone lub otrzymały zezwolenie na wprowadzenie do obrotu w Państwa kraju.

Dystrybucja laserów FOTONA w Polsce:

### **BTL Polska Sp. z o.o.**

ul. Leonidasa 49

02-239 Warszawa

tel. 022 667 02 76, 022 822 42 51

fax 022 667 95 39

[btlnet@btlnet.pl](mailto:btlnet@btlnet.pl)

[www.btlnet.pl](http://www.btlnet.pl)