

mgr Marek Mindak
Laser Projekt 2000 Sp. z o.o.

Lasery pikosekundowe do usuwania tatuaży i efektów fotostarzenia skóry

Fenomen tatuażu towarzyszy człowiekowi od zarania dziejów. Tatuaże można odnaleźć na mumii człowieka wydobytego z lodowca, słynnego Otziego sprzed 5300 lat! W ostatnich latach tatuaż stał się najbardziej powszechną (poza makijażem) metodą zdobienia ciała. W USA 47% populacji w wieku 18-34 lat ma tatuaże, z czego 23% planuje ich zmianę lub usunięcie. Gusta szybko się zmieniają, więc liczba chętnych do usunięcia lub modyfikacji tatuażu stale rośnie.

Od 20 lat metodą z wyboru usuwania tatuaży są lasery nanosekundowe (Q-switched), aleksandrytowe (o długości fali 755 nm), rubinowe (694 nm) czy Nd:YAG (1064 nm). Wszystkie inne metody powodują duże uszkodzenia skóry i nieuniknione blizny. Niestety, skuteczność laserowego usuwania tatuaży nie jest stuprocentowa, mimo przeprowadzenia kilkunastu, a nawet powyżej 20 zabiegów. Indywidualne oceny tej metody przez lekarzy także są rozbieżne – od bardzo pozytywnych i twierdzenia, że każdy tatuaż można usunąć, do pełnej negacji tej metody i wskazywania wielu skutków ubocznych, z których najpoważniejsze to blizny i keloidy oraz odbarwienia skóry.

Próba obiektywnej oceny skuteczności tej metody jest praca Printza i innych z 2004 roku^[1], w której na 74 pacjentach zbadano obiektywnie efektywność usuwania tatuaży laserami Q-switched 755, 532 i 1064 nm. Oceniano terapie obejmujące od 1 do 10 sesji i trwające do 6 miesięcy. W tabeli (Tab.I) zebrano wyniki i oceny efektywności zabiegów.

Jak widać statystycznie o skutecznym usunięciu tatuażu (>76% rozjaśnienia) można mówić tylko u 50% pacjentów. Druga połowa nie uzyskała zadowalających efektów w ciągu 6 miesięcy.

Co ogranicza skuteczność rozjaśniania tatuaży? Subiektywnie, niewątpliwie technika ich usuwania. Ważny jest dobór optymalnych parametrów takich jak gęstość energii (jak najwyższa, ale niepowodująca działań niepożądanych) czy wielkość plamki – największa możliwa do uzyskania dla wybranej gęstości energii (zależy od konkretnego lasera). Należy dokładnie prostopadłe ustawić aplikator zabiegowy do skóry, pamiętać

Tab. I. Ocena terapii usuwania tatuaży laserami Q-switched.

Liczba pacjentów	Część całej grupy	Efekt
14	19%	>95 % rozjaśnienia
23	31%	76 – 95 % rozjaśnienia
21	28%	51-75% rozjaśnienia
16	22%	<50% rozjaśnienia

o często pomijanym naciągnięciu skóry nad tatuażem, aby przybliżyć go do powierzchni skóry i zmniejszyć rozproszenie światła. Szczególnie istotny jest pierwszy zabieg, kiedy tatuaż jest najbardziej kontrastowy. Późniejsze zabiegi są coraz mniej skuteczne, przez co należy rozumieć coraz mniejsze rozjaśnianie tatuażu z zabiegu na zabieg. Obiektywne przyczyny leżą po stronie barwnika, jego koloru, składu chemicznego, głębokości wprowadzenia i rozmiaru drobin barwnika. Niewątpliwie usuwanie tatuaży laserami nanosekundowymi jest procesem długim, wymagającym kilkunastu sesji i obarczonym dużym prawdopodobieństwem pozostawienia blizn, przebarwień i keloidów.

Uznany od lat schemat (Ryc. 1) usuwania tatuaży laserem nanosekundowym (*Q-switched*) zakładał działanie krótkim impulsem o widmie dopasowanym do absorpcji drobin barwnika i słabo pochłanianym przez otaczające tkanki. Jest to spełnienie klasycznych wymagań selektywnej fototermolizy^[2]. Warunki selektywnej fototermolizy to:

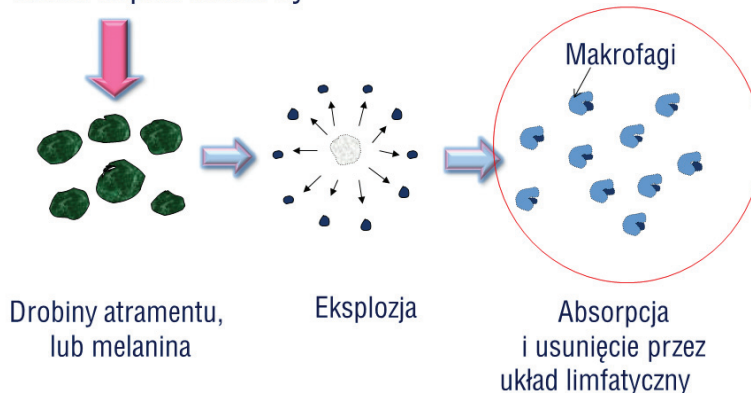
- długość fali: musi być silnie absorbowana przez barwnik i słabo przez tkankę otaczającą;
- czas trwania impulsu: musi być krótszy od czasu chłodzenia drobin barwnika

tj. od czasu jego relaksacji termicznej (TRT). Generalnie czas relaksacji termicznej zależy od wymiarów geometrycznych obiektu. Małe obiekty (melanosomy, naczynia, drobin barwnika) szybciej oddają ciepło i mają mniejszą wartość TRT. Ich skuteczne niszczenie wymaga zastosowania odpowiednio krótkich impulsów laserowych;

- energia impulsu: musi być wystarczająca do podgrzania chromoforu powyżej temperatury degradacji.

Impuls laserowy spełniający te warunki zostanie efektywnie zabsorbowany w drobinie barwnika i doprowadzi do jego defragmentacji. W miarę upływu czasu drobne fragmenty barwnika zostaną usunięte przez makrofagi i tatuaż zniknie. Ten schemat był powszechnie akceptowany do czasu, kiedy zbadano koncentrację barwnika w skórze przed i po – wydawałoby się skutecznym – usunięciu tatuażu. Okazało się wówczas, że koncentracja barwnika w skórze, przed i po laserowym usunięciu tatuażu – była taka sama, w granicach błędu. Tatuaż przestał być widoczny, ale barwnik nie zniknął, makrofagi go nie usunęły. Zabieg laserowy spowodował, że rozdrobnione, mniejsze drobin barwnika przestały być widoczne.

Krótki impuls laserowy



Ryc. 1. Schemat usuwania barwnika tatuażu krótkim impulsem laserowym.

Odbicie promieniowania od skóry uwarunkowane jest kolorem i fakturą skóry oraz barwą padającego światła. Wsteczne rozproszenie światła w skórze silnie zależy od wielkości struktur (naczynia) i drobin barwnika.

Rola makrofagów w usuwaniu drobin barwnika została ograniczona, choć nie można jej całkowicie wykluczyć. Prawdopodobnie są one odpowiedzialne za obserwowane powolne rozjaśniania i rozmywania tatuażu z upływem czasu, bez ingerencji z zewnątrz.

Pomysł na wykorzystanie laserów pikosekundowych do usuwania tatuażu pojawił się już 20 lat temu. Pierwsza praca na ten temat ukazała się jeszcze w 1998 roku^[3] i była porównaniem działania pikosekundowego lasera Nd:YAG – 35 ps, 0.65 J/cm² i nanosekundowego – 10 ns, 8.0 J/cm². W tym zestawieniu laser nanosekundowy okazał się skuteczniejszy, ze względu na niewielką energię lasera pikosekundowego. Ale już wówczas autorzy pracy przewidywali, że większa energia lasera pikosekundowego może tę proporcję odwrócić. Sam pikosekundowy czas impulsu nie wystarczył do uzyskania większej skuteczności – potrzebna jest także odpowiednia ilość energii. Kolejną przewagą

silnych laserów pikosekundowych jest możliwość działania plamkami o średnicy 3-5 mm a nie 1-2 mm, co ograniczyło wnikanie światła w skórę na skutek rozproszenia.

Przez długie lata zastosowanie laserów pikosekundowych w dermatologii nie było rozpowszechnione z powodu ich wysokiej ceny.

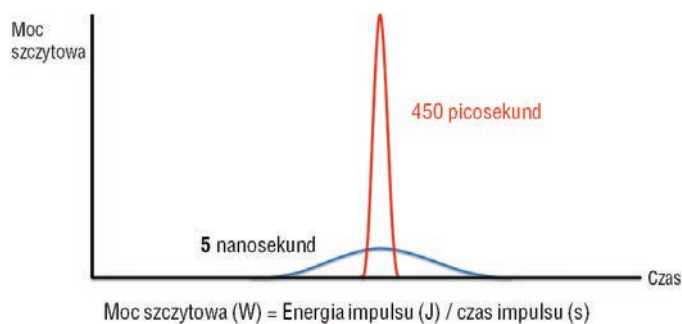
W roku 2012 FDA dopuściła do użytku medycznego pierwszy pikosekundowy laser aleksandrytowy (długość światła 755 nm), którym był aparat PicoSure firmy Cynosure (USA).

Przy impulsach pikosekundowych znaczące stają się nieliniowe efekty fotomechaniczne. Eksplozja generuje falę akustyczną, która rozbiła barwnik na znacznie mniejsze fragmenty, niż ma to miejsce przy wykorzystaniu impulsów nanosekundowych. Skuteczność fragmentacji wyznacza parametr – STR (ang. *Stress Relaxation Time* – czas relaksacji naprężeń). Wartość STR jest czasem, w jakim fala dźwiękowa przebiega przez drobinę barwnika.

$$(SRT) \text{ Stress Relaxation Time} = DD \frac{(\text{średnica drobin barwnika})}{VD} \frac{\text{Prędkość dźwięku w barwniku}}{}$$

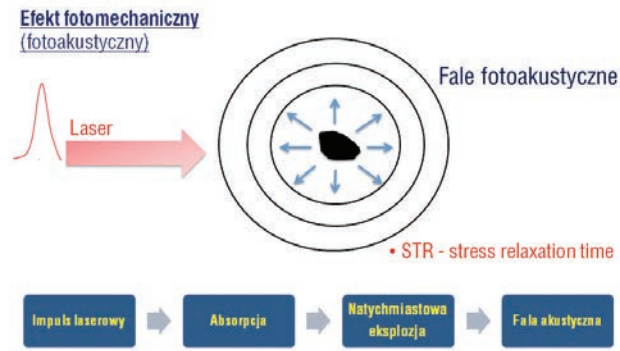
Im krótszy jest impuls laserowy w stosunku do SRT, tym silniejszy staje się efekt fotoakustyczny. Dla drobin barwnika o wy-

Nanosekundy (5×10^{-9} s) vs. Picosekundy (450×10^{-12} s)



Ryc. 2. Porównanie impulsu pikosekundowego z nanosekundowym (lasery Q-switched). Czas 450 ps jest 11 razy krótszy od 5 ns. Jest to różnica zaledwie jednego rzędu wielkości (10x), jednak efekty nieliniowe są proporcjonalne do kwadratu z gęstości mocy. Było 1,2 J/5 ns = 0,24 GW, a jest 1,78 GW. $(1,78/0,24)^2 = 55x$.

Generacja fali fotoakustycznej picosekundowym impulsem laserowym



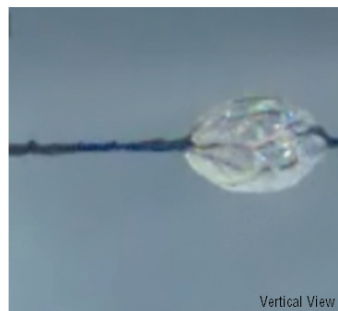
Ryc. 3. Fotomechaniczne działanie impulsu pikosekundowego. Drobin barwnika rozbijane są falą akustyczną.

miarach od 10 do 100 nm (średnio 55 nm) czas SRT wynosi ok. 1 ns. Wynika z tego, że efektywna fragmentacja drobin barwnika wymaga impulsów o czasie trwania krótszym od nanosekundy.

W pracy^[4] przeprowadzono niezwykle ciekawe badanie efektywności pulweryzacji – rozdrobnienia barwnika (czarny atrament) zatopionego w fantomie skóry (hydrożelu

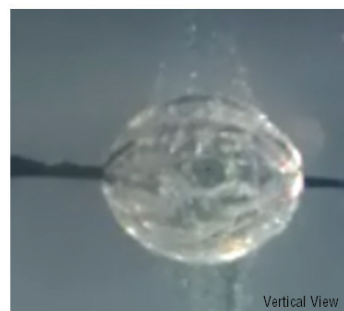
poliacrylamidu) pod wpływem impulsów nanosekundowych (5 ns) i pikosekundowych (750 ps) lasera Nd:YAG (1064 nm) Pico Plus. Wykazano, że impulsy pikosekundowe dużo skuteczniej rozdrabniały czarny barwnik niż impulsy nanosekundowe, co zarejestrowano ultraszybką kamerą. Co więcej, impulsy pikosekundowe w kolejnych przejściach, dalej rozdrabniały barwnik na drob-

Impuls nanosekundowy



5 ns, Ø4 mm, 4.8 J/cm², 1 impuls

Impuls picosekundowy

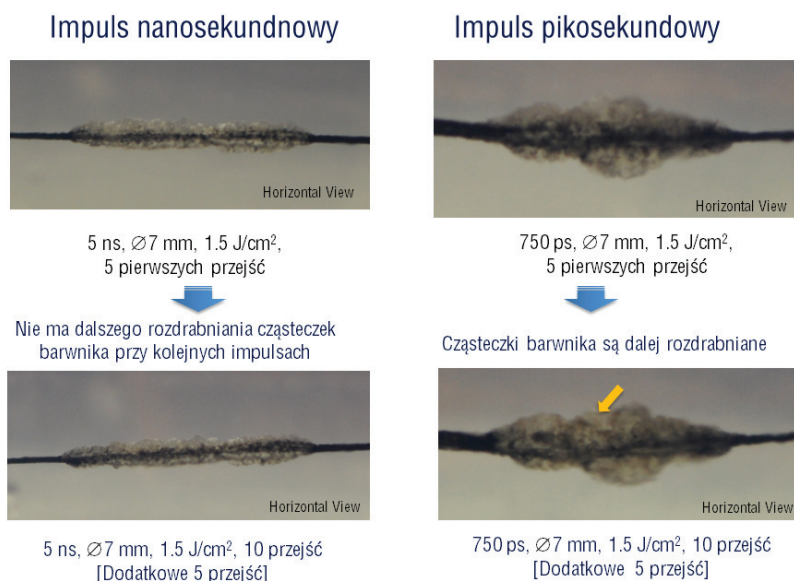


750 ps, Ø4 mm, 4.8 J/cm², 1 pass

Klatki z filmy nagranych ultraszybką kamerą

Courtesy of S.B. Cho, MD, South Korea, Comparison between nano- and pico-second on tissue phantom

Ryc. 4. Zdjęcia wybuchu barwnika pod wpływem impulsu lasera Nd:YAG o czasie 5 ns i o czasie 750 ps z pracy^[3]. Gęstość energii i wielkość plamki jest taka sama, podobnie jak skala zdjęć. Wniosek: krótszy impuls laserowy skuteczniej rozdrabnia barwnik.



Courtesy of S.B. Cho, MD, South Korea, Comparison between nano- and pico-second on tissue phantom

Ryc. 5. Porównanie skuteczności pulweryzacji barwnika kolejnymi naświetleniami lasera nano- i pikosekundowego^[3]. Dodatkowe przejścia laserem nanosekundowym już nie rozdrabniają barwnika, natomiast krótkie impulsy pikosekundowe w kolejnych przejściach zwiększają stopień pulweryzacji.

niejsze fragmenty, co było nieosiągalne przy impulsach nanosekundowych. Także ponowne naświetlanie próbek poddanych wcześniej działaniu impulsów nanosekundowych, wywoływało ich dalszą skuteczną pulweryzację. Wyniki pracy^[4] dokładnie pokrywają się z obserwacjami klinicznymi.

W tabeli (Tab.1) zebrano parametry dermatologicznych laserów pikosekundowych, opracowane na podstawie materiałów informacyjnych producentów. Podstawowym parametrem decydującym o jakości aparatu jest niewątpliwie jego moc szczytowa P_{imp} [GW]:

$$P_{imp} = E_{max} [mJ] / T [ps]$$

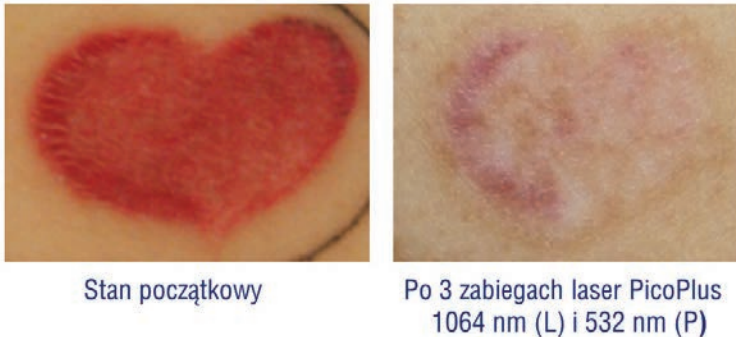
gdzie E_{max} jest maksymalną energią impulsu laserowego, a T jego czasem trwania. W tym miejscu pojawiają się pierwsze wątpliwości: o ile pomiar energii bardzo krótkich impulsów jest prosty, o tyle już pomiar czasu trwania impulsu zależy od metody oraz od kształ-

tu impulsu i nie jest tak jednoznaczny.

Producenci rzadko ujawniają rzeczywisty kształt impulsu, a to on ma decydujące znaczenie dla efektywności usuwania zmian barwnych. Przykładem są producenci chińscy, którzy podają zawsze rekordowe i nierealne 200 ps (!), jako czasu trwania impulsu. Tylko jedna firma (LUTRONIC Co) dostarcza z aparatem (laser Pico Plus) certyfikat czasu trwania impulsu wydany przez niezależne laboratorium. Kolejnym bardzo istotnym czynnikiem decydującym o wszechstronności lasera są końcówki zabiegowe i ilość generowanych długości fal. Okazało się w praktyce, że lasery generujące impulsy z zakresu setek pikosekund wcale nie są „color blind”, a wręcz przeciwnie – nadal efektywność usuwania zmian barwnych zależy w decydującym stopniu od dopasowania koloru impulsu do maksimum absorpcji targetu (Ryc. 6).

Tab. 2. Zestawienie parametrów dermatologicznych laserów pikosekundowych na podstawie informacji producentów.

Nazwa	Producent	Długość fali	Maksymalna energia	Czas impulsu	Moc szczytowa	Wielkość plamki
PiQo4	Lumenis	1064/532/650/585 nm	Tryb Pico 650 mJ @ 1064 nm 325 mJ @ 532 nm Tryb Nano 2000 mJ @ 1064 nm 800 mJ @ 532 nm	600 ps/800 ps 2ns/8ns	1,1 GW	2-15 mm
TattooStar	Asclepion	1064/532 585/650 nm	Tryb Pico 800 mJ Tryb Nano 1000 mJ	<300 ps	2,5 GW	2 – 10 mm
StarWalker	Fotona	1064/532 585/650 nm	ok. 1000 mJ/5 ns ciąg impulsów 10 000 J/50 ms	Nano 5 ns. Modlocking Ciąg 8-10 imp. 580 ps o małej energii	0,2 GW	1,5 – 20 mm
-	Producent z Chin	1064/532 nm Opcja 755 nm	1400 mJ @ 1064 nm 800 mJ @ 532 nm Opcja 1200 nm @ 755 nm	200 ps (!)	4,67 GW (!)	2-10 mm
PicoWay	Syneron & Candela	1064/532 nm	400 mJ @ 1064 nm 200 mJ @ 532 nm	450 ps/375 ps	0.89 GW/ 0.53 GW	2-10 mm 6x6 mm Frx 100 punktów
PicoSure	Cynosure	755 nm	200 mJ	750 ps	0.27 GW	2– 6 mm Zoom 6, 8, 10 mm stałe
Enlighten	Cutera	1064/532 nm	600 mJ @ 1064 nm 300 @ 532 mJ	750 ps & 2 ns	0,8 GW/ 0,4 GW	2-8 mm
Discovery	Quanta	1064/532 nm	Pico 800 mJ @ 1064 nm, 300 mJ @ 532 nm, Nano 1200 mJ @ 6 ns 450 mJ @ 6 ns 2000 J @300 us	450 ps/ 370 ps & 6ns & 300us	1.8 GW/ 0.8 GW	2 – 5mm (kwadrat) 2 – 8mm (koło) 8mm wieloogniskowa
PICOCARE	WonTech	1064/532 nm (595/660) nm	600 mJ/300 mJ	700 ps & 650 ps	0.8 GW/ 0.4 GW	Max. 10 mm
PICOPLUS	Lutronic	1064/532 nm (595/660) nm	800 mJ/300 mJ @ 450 ps 800 mJ/300 mJ @ 2 ns	450 ps & 2 ns	1.77 GW/ 0.66 GW	1-6 mm Zoom 6-10 Collimated 7.4 X 7.4 mm, 10 mm wieloogniskowa



Za pozwoleniem: Dr. S. Lee, Republika Korei

Ryc. 6. Tatuaz czerwony usuwany impulsami pikosekundowymi o długości fali 1064 nm i 532 nm.

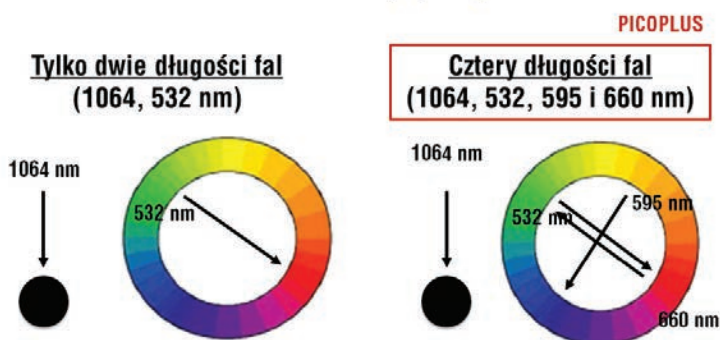
Tatuaze (inkrustacje) powypadkowe

Znając efektywność laserów pikosekundowych w usuwaniu zmian barwnych, w pracy^[4] podjęto pierwszą próbę zbadania skuteczności lasera pikosekundowego Nd:YAG 1064 nm, (Lutronic Pico Plus) w usuwaniu tatuazu powypadkowych. Powstają one po wprowadzeniu pod skórę takich substancji, jak: grafit, asfalt, produkty ropopochodne, piasek, metale, szkło, proch, kurz. Wielkość drobin, skład i głą-

bokość jest przypadkowa. Łączy je lokalizacja – znajdują się w górnych warstwach skóry i są widoczne z zewnątrz. Do prób wybrano 9 pacjentów z tatużami powypadkowymi zlokalizowanymi na różnych częściach ciała. Uzyskane wyniki zebrano w tabeli (Tab.2).

Obiektywna poprawa ujęta w tabeli, oznacza ocenę przeprowadzoną na podstawie fotografii wyników przez 2 niezależnych lekarzy. Stopień satysfakcji (1-3) był subiektywnym odczuciem pacjenta. Wnio-

Dopasowanie długości fali impulsu picosekundowego do widma absorpcji targetu



Ryc. 7. Dopasowanie długości fali do absorpcji koloru barwnika jest tak samo ważne w laserach pikosekundowych, jak było w laserach nanosekundowych. Do skutecznego działania na zmiany barwne potrzebnych jest więcej kolorów niż tylko podczerwień (1064 nm) i zielony (druga harmoniczna – 532 nm).

Tatuaż czarny - poprzednio usuwany laserem



Courtesy of G.S. Lee, MD, South Korea

Ryc. 8. Przykład skuteczności działania impulsów pikosekundowych - tatuaż czarny, poprzednio usuwany laserem nanosekundowym. Stan po trzech zabiegach laserem LUTRONIC Pico Plus.

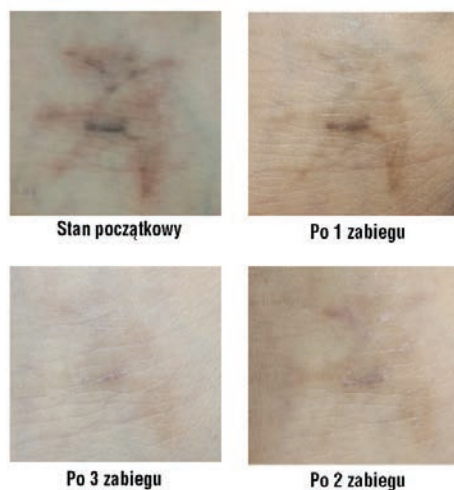
ski z badań (uzyskane na małej grupie) są następujące: laser PicoPlus jest skuteczny w szybkim usuwaniu tatuaży powypadkowych. Potrzeba od 2 do 4 zabiegów, co 2-4 tygodnie. Skuteczne parametry: długość fali 1064 nm, plamka 4-6 mm, gęstość energii od 1,8 do 3,4 J/cm².

Wskazania do lasera pikosekundowego Nd:YAG z końcówkami barwnikowymi 595 i 660 nm:

- tatuaże (w tym kolorowe),
- melasma,
- przebarwienia pozapalne (PIH),
- Nevus Ota, Nevus Hori,
- plama soczewicowata,
- piegi,
- rogowacenie posłoneczne,
- zaczerwienia potrądzikowe, pozapalne,
- trądzik zapalny,
- rumień,
- trądzik różowaty,
- wygładzanie skóry i usuwanie zmian barwnych - odmładzanie skóry (*Cold Rejuvenation*).

Końcówki wieloogniskowe laserów pikosekundowych – *Cold Rejuvenation*

Termin „*Laser Cold Rejuvenation*” pojawił się po raz pierwszy w pracy^[5] opublikowanej w roku 2012. Opisano w niej całkowicie nową, mało inwazyjną technikę



Courtesy of G.S. Lee, MD, South Korea

Ryc. 9. Przykład skuteczności działania impulsów pikosekundowych - tatuaż czarny, poprzednio usuwany laserem nanosekundowym. Stan po trzech zabiegach laserem LUTRONIC Pico Plus.



Ryc. 11. Laser pikosekundowy Nd:YAG - Lutronic PICO PLUS.

Cold rejuvenation jest zjawiskiem nielinowym, wywołanym wielką gęstością mocy wiązki laserowej. Proces ten nie ma nic wspólnego z selektywną fototermolizą i nie towarzyszy mu nagrzewanie tkanek. Metodą uzyskiwania jeszcze większych gęstości mocy jest użycie wieloogniskowych końcówek zabiegowych. Mają one różną budowę u różnych producentów laserów pikosekundowych, ale to samo zadanie – uzyskanie jeszcze większej gęstości mocy w kilkudziesięciu punktach pod powierzchnią skóry. Ich zasadniczym elementem jest zawsze macierz mikrosoczewek, która dzieli zasadniczą wiązkę lasera na kilkadziesiąt odrębnych, niezależnie ogniskowanych wiązek. W mikroogniskach gęstość mocy jest 5-10 razy większa od, i tak dużej, gęstości mocy w wiązce zasadniczej. Sumaryczna powierzchnia ognisk stanowi jedynie ok. 1% powierzchni plamki.

Przy dobrze zjustowanych końcówkach wieloogniskowych, do 80% energii impulsu

Tab. 4. Specyfikacja techniczna lasera pikosekundowego Nd:YAG na przykładzie aparatu Lutronic Co. Pico Plus.

Parametr			Wartość
Długość fali			1064 / 532 / 595 / 660 nm
Pilot – wiązka wskazująca			Laser diodowy 655nm / <5mW
Ośrodek czynny			Nd:YAG, barwnik
Prowadzenie wiązki zabiegowej			Ramię z 7 przegubami,
Energia impulsu	1064 nm	piko /nano	Max 800 mJ/450 ps, 1,77 GW
	532 nm	piko / nano	Max 300 mJ/450 ps, 0,66 GW
	595 nm	piko / nano	Max 110 mJ/450 ps, 0,24 GW
	660 nm	piko / nano	Max 90 mJ/450 ps, 0,20 GW
	1064 nm wieloogniskowa	piko/ nano	Max 800 mJ
Długość impulsu	piko		450 ps
	nano		2 ns
Częstotliwość powtarzania			SI, 1, 2, 5 i 10 Hz
Klasyfikacje Bezpieczeństwa	Bezpieczeństwo laserowe		IV
	Elektryczne		B
	Urządzenie medyczne - MDD		Klasa II b
	FDA		Klasa II
Końcówki zabiegowe	Zmiennoogniskowa - Zoom		1 – 6 mm (532 / 1064 nm)
	Skolimowana - Pico Toning		6 – 10 mm (532 / 1064 nm)
	Wieloogniskowa 1064/532 nm		Średnica od 2 do 10 mm
	Gold Toning (660 nm)		Średnica plamki 2 i 5 mm
	RuVY Touch (595 nm)		Średnica plamki 2 i 3 mm



Ryc. 12. Schemat działania przestrajalnej końcówki wieloogniskowej. [Materiały informacyjne LUTRONIC Co.]

skupia się w ogniskach, a 20% przypada na otaczające je tło. Gęstość mocy w ogniskach jest dostateczna do wytworzenia pod skórą przebiecia elektrycznego – LIOB, i wytworzenia mikroognisk plazmy. Ogniska powstają w skórze na głębokości od 0,1 do 1,5 mm. Ekspandująca mikrokulka plazmy, wytwarza falę ciśnienia – efekt fotoakustyczny, który uszkadza otaczające tkanki i wyzwała odpowiedź stanu zapalnego.

W rezultacie dochodzi do wzmożenia produkcji kolagenu i elastyny, bez żadnych uszkodzeń termicznych i bez potrzeby rekonwalescencji. Jednocześnie rozbijane są drobiny pigmentów obecne w skórze, co rozjaśnia jej koloryt.

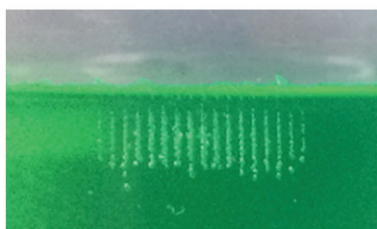
Pracując końcówkami wieloogniskowymi, stosuje się 5-10 kolejnych przebiegów, które obejmują do 10% powierzchni skóry poddanej zabiegowi. Powrót do stanu normalnego jest szybki, a efekty odmłodzenia skóry, niwelacji drobnych zmarszczek i blizn są doskonałe. Metoda prowadzenia zabiegu jest prosta, skuteczna i mało bolesna dla pacjenta. Wyjaśnia to, dlaczego obecnie ok. 80% zabiegów prowadzonych laserami pikosekundowymi, to właśnie zimne fotooodmł-

dzenie, a tylko 20% stanowi usuwanie zmian barwnych różnego rodzaju.

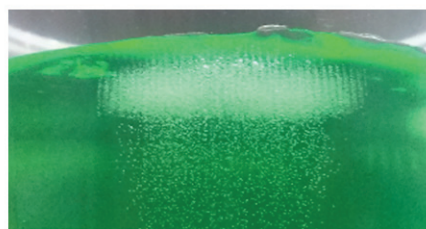
Brak uszkodzeń termicznych powoduje bardzo szybki powrót skóry do stanu normalnego. Krótki czas gojenia wynika także z punktowego charakteru uszkodzenia skóry i pozostawienia między ogniskami dużych obszarów nieuszkodzonych. Działanie punktowe powoduje, że w jednym zabiegu koniecznych jest wiele przebiegów, a uzyskania pełnego efektu na danym obszarze, wymaga przeprowadzenie 3-4 zabiegów.

Głębokość, na jakiej powstają mikroogniska plazmy, ma podstawowe znaczenie dla efektów zabiegu, stąd budowa zabiegowych końcówek wieloogniskowych z możliwością przestrajania głębokości ogniskowania. Jednak głębokość, na jakiej powstają ogniska plazmy w skórze, nie zależy tylko od regulacji optycznej, ale także od zastosowanej gęstości mocy. Ten efekt pokazany jest na rycinie (Ryc. 12), gdzie zestawiono przekroje histopatologiczne górnych warstw skóry z gęstościami mocy w ogniskach. We wszystkich przykładach zastosowano tę samą głębokość ogniskowania. Jak widać, najpłytsze LIOB występują przy największej gęstości mocy.

Wieloogniskowa końcówka zabiegowa lasera Pico Plus



Jedno przejście



Przejścia wielokrotne

W skórze powstaje jednorodna „chmura” mikroskopijnych ognisk o idealnej jednorodności”

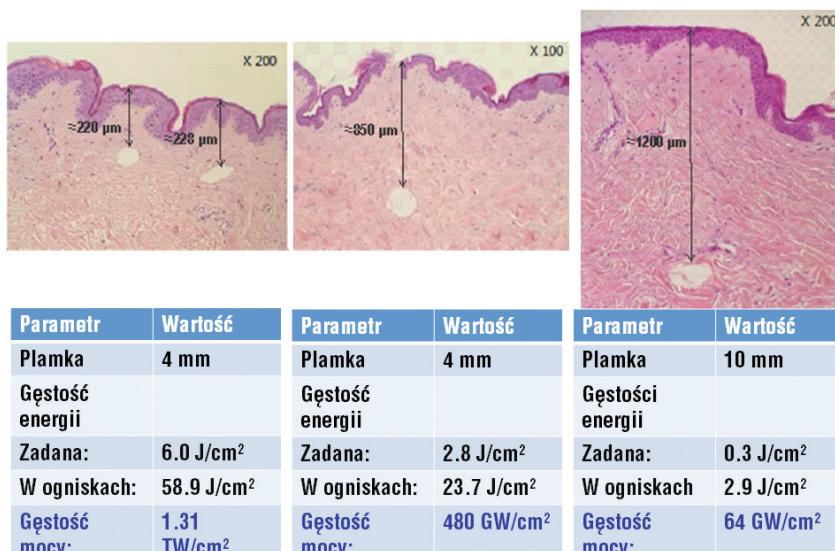
Source: Lutronic R&D

Ryc. 13. Efekt działania impulsu pikosekundowego z końcówki wieloogniskowej na fantom skóry. Pole działania 7.4 x 7.4 mm @ 1064 nm, 450 ps, 81 mikro ognisk (9x9) o średnicy 100 μm każde. Widoczne kolumny ognisk powstałe przy jednym przejściu, a potem, po wielu przejściach, na tym samym obszarze.

W miarę zmniejszania gęstości mocy, ogniska plazmy powstają coraz głębiej, jednak cały czas znajdują się płytko pod powierzchnią skóry. Ta pozorna sprzeczność wynika z mechanizmu zjawiska. Zbieżna wiązka laserowa o malejącej średnicy wnika w ośrodek tak długo, aż lokalna gęstość mocy nie przekroczy progu jonizacji tkanki. Po jego przekroczeniu powstaje kulka plazmy, która jest całkowicie nieprzezroczysta dla wiązki laserowej. Początek impulsu wywołuje zapłon plazmy, ale jego dalsza część „grzeźnię” już w plazmie i nie wnika dalej w skórę. Dogrzewa plazmę i powiększa jej średnicę, działając falą uderzeniową na otaczającą tkankę. Należy mieć na uwadze, że dzieje się to w pikosekundach, a w tej skali czasowej tkanka kompletnie nie przewodzi ciepła. Jak doskonale widać na rycinie (Ryc. 12) wokół śladów po ogniskach nie ma stref przegrzanych i zniszczonych wysoką temperaturą. Dlatego też gojenie przebiega bez potrzeby sorpcji tkanek zdenaturyzowanych i jest bardzo szybkie. Uszkodzenie tkanek i stan zapalny, wywoływane są przez mecha-

niczne fale uderzeniowe, a nie przez temperaturę, która występuje przy laserowych impulsach nanosekundowych i dłuższych. LIOB powstają w naskórku oraz w powierzchniowej warstwie skóry. Połączenie dermo-epidermalne pozostaje nienaruszone, co zmniejsza prawdopodobieństwo przebarwień (PIH). LIOB w górnych warstwach skóry dodają efekt ujędrnienia do efektu skutecznej fragmentacji drobin pigmentu.

Kliniczne efekty działania końcówki wieloogniskowej oceniono w pracy^[6]. Zbadano w niej skuteczność usuwania zmarszczek wokół oczu i ust końcówką zabiegową z matrycą soczewek dyfrakcyjnych lasera pikosekundowego - 755 nm. Mikrosoczewki (ang. *Focused Lens Array*) dzieliły wiązkę lasera na ok. 250 ognisk, otoczonych tłem o niższej gęstości mocy. W ogniskach gęstość mocy była ponad 7x większa niż średnia gęstość bez macierzy soczewek. Sumaryczna powierzchnia mikroognisk była mniejsza niż 1% powierzchni plamki. Odległość ognisk – 0,5 mm, średnica plamki – 6 mm, średnia



Ryc. 14. Głębokość lokalizacji LIOB w zależności od gęstości mocy w ogniskach. Laser 1064 nm, impuls 450 ps, ogniskowanie w głębi skóry – poziom I. [Materiały informacyjne LUTRONIC Co.]

gęstość energii 0,71 J/cm², częstotliwość 10 Hz, czas trwania impulsu lasera – 740 ps.

Badania przeprowadzono na grupie 40 pacjentek. Zabiegi obejmowały całą twarz, w każdym zabiegu stosowano po 4 przejścia, deponując ok. 5000 impulsów.

Efekty zabiegu zwiększały przez 4 m-ce. Zauważono stałą poprawę w przypadku drobnych zmarszczek i przebarwień. Badania histopatologicznych po trzech miesiącach wykazały brak zmian zapalnych oraz zaburzeń barwnikowych, zwiększoną gęstość kolagenu w skórze, a także zwiększoną grubość i gęstość włókien elastynowych. Takie same badania powtórzone w 6-tym miesiącu wykazały wzrost syntezy kolagenu w skórze, widoczny w całym przekroju wycinka. Wyniki badań histopatologicznych pokrywały się z widoczną redukcją fotouszkodzeń, ze spłyceniem zmarszczek oraz z poprawą kolorytu i faktury skóry.

Objawy niepożądane: zaczerwienienie skóry przez kilka godzin do dwóch dni.

Obrzęk przez 4 dni, zasinienia. Wszystko to mija samoistnie, bez stosowania leków.

Wskazania do stosowania wieloogniskowych końcówek zabiegowych w laserach pikosekundowych:

- niejednorodna pigmentacja skóry i zmiany barwne wywołane fotostarzeniem,
- rozlane plamy melaninowe,
- zaburzenia tekstury i uszkodzenia postłoneczne,
- ogólna tonizacja skóry, poprawa kolorytu i odmłodzenie – „Cold rejuvenation”,
- drobne zmarszczki i powierzchowne blizny.

Możliwe efekty uboczne – u osób z historią keloidów - częściej pojawiają się blizny. U pacjentów z ciemną skórą występuje większe prawdopodobieństwo przebarwień. Nie wolno także działać w pobliżu zmian podejrzanych o nowotworzenie. Należy szczególnie uważać, prowadząc zabieg w okolicach oczu ze względu na możliwość uszkodzenia wzroku.

Oceny użytkowników laserów pikosekundowych

Pierwsze lasery pikosekundowe pojawiły się w klinikach dermatologicznych ok. 5 lat temu i ten czas pozwolił na zgromadzenie wielu doświadczeń praktycznych. Mimo marketingowej zmiany nazwy z laserów nanosekundowych na pikosekundowe, tak naprawdę nastąpiło skrócenie czasu impulsu o jeden rząd wielkości (ok. 10 x); z 5-20 ns do 750-450 ps. Tak samo wzrosła moc szczytowa decydująca o efektach nieliniowych, co pokazuje porównanie poniżej:

$$\frac{1000 \text{ mJ}/5 \text{ ns}}{0,2 \text{ GW}} = \frac{1000 \text{ mJ}/5000 \text{ ps}}{800 \text{ mJ}/450 \text{ ps}} = 1,77 \text{ GW}$$

Bezwzględnie wzrosła skuteczność zabiegów i dzięki temu połowę zmalała liczba zabiegów potrzebnych do skutecznego usunięcia tatuażu. Zabiegi wymagają mniejszej gęstości energii (od 1 do 1/3), są mniej bolesne, jest lepsza reakcja skóry i mniej efektów ubocznych. Lasery pikosekundowe okazały się także bardzo skuteczne w „poprawkach” – usuwaniu tatuaży opornych, które wcześniej nieskutecznie usuwano laserami nanosekundowymi. Zmniejszenie niezbędnej gęstości energii nie jest proporcjonalne do skrócenia czasu, ale dla pacjentów ważne jest zmniejszenie bolesności zabiegu i dużo szybsze gojenie. O wiele rzadziej występują powikłania. Szybsze gojenie pozwala na skrócenie odstępu między zabiegami, z 2-3 miesięcy przy laserach nanosekundowych do 4-6 tygodni przy laserach nowej generacji.

Nieoczekiwaną wartością dodaną techniki pikosekundowej jest wielka skuteczność zabiegowych końcówek wieloogniskowych w usuwaniu objawów fotostarzenia skóry. Nadal dużo skuteczniej działają na zmiany barwne impulsy o długości fali dopasowane do absorpcji zmiany, stąd potrzeba większej ilości kolorów, niż tylko 1064 i 532 nm. Wiele użytkowników wskazuje na niedostateczną energię impulsów 532 nm i pilnym problemem technicznym jest

zwiększenie sprawności przetwarzania na drugą harmoniczną w pikosekundowych laserach Nd:YAG. Gigantyczne moce, jakie przenosi optyka końcówek zabiegowych, wymagają od obsługi utrzymania końcówek w idealniej czystości i starannego czyszczenia po, a nawet w trakcie dłuższych zabiegów. Oczekiwana jest poprawa trwałości optyki, a zwłaszcza warstw antyrefleksyjnych okienek osłonowych, które najczęściej ulegają uszkodzeniom.

Piśmiennictwo:

1. Prinz et al. Efficiency of the laser treatment of tattoos using lasers emitting wavelengths 532nm, 755nm and 1064nm. *British Journal of Dermatology* 150:245-251 (2004).
2. Anderson, R. R. et al. Selective photothermolysis: precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation. *Science* 220, 524-527, (1983). In all cases, conventional high-fluence nanosecond domain pulses were as or more effective than the low-fluence picosecond fluences used in the direct comparison part of the study."
3. K. J. Ahn, Z. Zheng, T. R. Kwon, B.J. Kim, H. S. Lee & Sung B. Cho - Pattern analysis of laser-tattoo interactions for picosecond- and nanosecond-domain 1064-nm Nd:YAG lasers in tissue-mimicking phantom. www.nature.com/scientificreports 7: 1533, DOI:10.1038/s41598-017-01724-1.
4. Ross VE, Naseef G, Lin C, Kelly M, Michaud N, Flotte TJ, Raythem J, Anderson RR: Comparison of responses of tattoos to picosecond and nanosecond Q-switched Neodymium:YAG lasers. *Arch Derm*, 1998; 134: 4. B.L Goo, S.B.Cho – "Efficacy and Safety of Picosecond Laser Treatment on various Causes of Traumatic Tattoos – *Med.Laser* 2016, 5(2):90-95.
5. L. Habbema, R. Verhagen, R. Van Hal, Y. Liu, and B. Varghese- Minimally invasive non-thermal laser technology using laser-induced optical breakdown for skin rejuvenation : *Biophotonics* 5, No. 2, 194-199 (2012) / DOI 10.1002/jbio. 201100083.
6. Laser pikosekundowy 755nm – leczenie zmarszczek wokół ust i oczu wywołanych fotostarzeniem – badania na 40 pacjentkach. R.A. Weiss, D.H. McDaniel, M.A. Weiss, A.M., Mahoney i inni – Konferencja ASLMS Orlando, 04.2015.