



## ZASTOSOWANIE LASERA FEMTOSEKUNDOWEGO W OKULISTYCE

Application of the femtosecond laser in ophthalmology



Maciej Juda<sup>1</sup>, Joanna Wierzbowska<sup>1,2</sup>

1. Wojskowy Instytut Medyczny – Państwowy Instytut Badawczy, Klinika Okulistyki, Polska
2. Klinika Optegra w Warszawie, Optegra, Polska

**Streszczenie:** Wprowadzenie na rynek lasera femtosekundowego było niewątpliwym kamieniem milowym w rozwoju nowoczesnej medycyny. Laser ten znalazł zastosowanie także w okulistyce, gdzie wykorzystywany jest podczas wielu różnych procedur zabiegowych. Mimo że technologia ta może nadal kojarzyć się głównie z chirurgią refrakcyjną, to okazało się, że ma szereg użytecznych zastosowań także w innych gałęziach okulistyki. Laser femtosekundowy, znany z zabiegów laserowej korekcji wzroku, jest coraz częściej wykorzystywany m.in. podczas transplantacji rogówki, w leczeniu stożka rogówki oraz w trakcie operacji zaćmy. W niniejszym artykule omówiono najważniejsze zastosowania, skuteczność i bezpieczeństwo lasera femtosekundowego w nowoczesnej chirurgii okulistycznej.

**Abstract:** The launch of the femtosecond laser technology was an unquestionable milestone in the development of modern medicine. This laser has been successfully implemented in ophthalmology, where it helps during various surgical procedures. Although this technology may still be associated mainly with refractive surgery, it has turned out to have dozens of applications in many different branches of ophthalmology. The femtosecond laser has not only been used in laser vision correction procedures, but also in corneal transplantation, keratoconus treatment and cataract surgery. This article discusses the most important applications, effectiveness and safety of the femtosecond assisted procedures in modern ophthalmic surgery.

**Słowa kluczowe:** laser femtosekundowy, chirurgia refrakcyjna rogówki, starczowzroczność, chirurgia zaćmy, laser in situ keratomileusis.

**Keywords:** femtosecond laser, corneal refractive surgery, presbyopia, cataract surgery, laser in situ keratomileusis.

DOI: 10.53301/lw/151937

Praca wpłynęła do Redakcji: 30.06.2022

Zaakceptowano do druku: 07.07.2022

**Autor do korespondencji:**

lek. Maciej Juda

Wojskowy Instytut Medyczny – Państwowy Instytut  
Badawczy, Klinika Okulistyki, Warszawa

e-mail: mjuda@wim.mil.pl

### Wstęp

Technologia lasera femtosekundowego, opracowana w Stanach Zjednoczonych na przełomie XX i XXI wieku, relatywnie szybko znalazła zastosowanie w medycynie, a zwłaszcza w chirurgii okulistycznej [1]. Lasery femtosekundowe wykorzystują promieniowanie podczerwone, które praktycznie nie jest absorbowane przez przezierne ośrodki optyczne oka, takie jak rogówka i soczewka.

Zasada działania lasera femtosekundowego polega na emisji impulsów świetlnych o czasie trwania zaledwie kilkuset femtosekund (10-15 s), długości fali 1053 nm i średnicy wiązki 0,001 mm. Co ważne, wiązka ta nie wywiera negatywnego wpływu na sąsiednie tkanki [1]. W przeciwieństwie do laserów argonowych i ekscymerowych, wykorzystujących zjawiska odpowiednio fotokoagulacji i fotoablacji, działanie laserów femtosekundowych oparte jest na efekcie fotodysrupcji. Jest to proces, w wyniku którego uwalniane są wolne elektrony i zjonizowane cząsteczki, a one w formie pęcherzyków

mikrokawitacyjnych i akustycznych fal uderzeniowych powodują przerwanie ciągłości i oddzielenie fragmentów tkanki bez traumatyzacji sąsiednich warstw [1]. Rana wycięta w taki sposób ma gładkie i równe brzegi, co znacznie przyspiesza proces gojenia i zapewnia przewidywalne wyniki pooperacyjne. To właśnie m.in. dzięki unikatowym właściwościom lasera femtosekundowego możliwe jest powtarzalne wykonywanie wyjątkowo precyzyjnych nacięć o różnych kształtach na dowolnych głębokościach w wielu rodzajach tkanek.

Zastosowanie technologii lasera femtosekundowego w praktyce umożliwiły wieloletnie badania fizyków m.in. Gerarda Mourou i Donny Strickland, którzy zostali uhonorowani Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki w 2018 r. za opracowanie metody generowania ultrakrótkich impulsów optycznych o wysokiej intensywności (*chirped pulse amplification*).

W artykule dokonano przeglądu aktualnego piśmiennictwa na temat zastosowań lasera femtosekundowego we współczesnej okulistyce.

## Zastosowania lasera femtosekundowego w chirurgii refrakcyjnej

Na rynku komercyjnym technologia lasera femtosekundowego zadebiutowała w 2001 r. pod nazwą handlową Intralase™ i od razu spotkała się z ogromnym zainteresowaniem branży medycznej [2]. Miała na celu wytwarzanie płatków rogówki laserem femtosekundowym w trakcie zabiegów LASIK (*laser-assisted in situ keratomileusis*) i zastąpienie wykorzystywanych dotychczas w tym celu mechanicznych mikrokeratomów.

Dzięki krótkiemu okresowi rehabilitacji, bezpieczeństwu i szybkiej stabilizacji ostrości wzroku FemtoLASIK (*femtosecond LASIK*) wykazuje znaczną przewagę nad zabiegami refrakcyjnymi starszego typu [3]. Od momentu wprowadzenia na rynek znacznie rozwinęto i dopracowano tę technologię. Najnowsze sprzęty tego typu osiągają częstotliwości nawet 2 MHz, przygotowując płatek rogówki w ciągu zaledwie kilku sekund. Zwiększenie częstotliwości pracy pozwoliło zminimalizować zarówno ilość energii dostarczanej do tkanek, jak i podciśnienie potrzebne do stabilizacji gałki ocznej (znacznie niższe niż przy użyciu mikrokeratomu), co istotnie zwiększyło bezpieczeństwo procedury, a także pozwoliło uzyskać lepsze poczucie kontrastu [4] i mniejszą ilość aberracji sferycznych w porównaniu z metodą LASIK.

### Płatek

We wprowadzonej w 1990 r. metodzie LASIK płatek wytwarzany był za pomocą mechanicznych urządzeń zwanych mikrokeratomami. Nadejście lasera femtosekundowego bez wątplenia wyznaczyło nowy kierunek rozwoju światowej okulistyki, a zwłaszcza chirurgii refrakcyjnej. FemtoLASIK jest aktualnie jednym z najchętniej wykonywanych zabiegów refrakcyjnych w krajach rozwiniętych. Duże zainteresowanie tą metodą wynika głównie z jej bezpieczeństwa i przewidywalności. Procedura ta polega na tym, że wytworzony przy użyciu lasera femtosekundowego płatek jest unoszony przez chirurga, a znajdująca się poniżej stroma jest następnie remodelowana wiązką lasera ekscymerowego. Na koniec płatek jest ponownie przykładany na miejsce. Dzięki technologii lasera femtosekundowego wytwarzany płatek może mieć różny kształt w zależności od preferencji i techniki chirurga. Dodatkowo, dla lepszej precyzji i bezpieczeństwa zabiegu, można zmienić kąt, pod jakim wykonuje się cięcie boczne, szerokość, kąt położenia i pozycję zawiasu płatka. Femtolaser daje możliwość regulacji nachylenia kąta bocznego, zmniejszając ryzyko potencjalnego wrastania nabłonka pod płatkami oraz ma pozytywny wpływ na jego stabilność. Preparowanie płatka rogówki przez laser femtosekundowy zajmuje maksymalnie kilkanaście sekund, a dzięki możliwości preparowania cienkich płatków (o grubości poniżej 110 mikronów) istnieje możliwość przeprowadzenia zabiegu płatkowego u pacjentów także z relatywnie cienkimi rogówkami. Dodatkowo zapewnia to znacznie niższe ryzyko powstania otworu płatka (*buttonhole*) oraz wolnego płatka pozbawionego zawiasu (*free cap*). Metoda laserowa sprzyja także ograniczeniu wystąpienia objawów suchego oka w okresie pooperacyjnym.

W badaniu Keziran i wsp. [5] porównującym wyniki zabiegów FemtoLASIK i LASIK na grupie 375 oczu udoznaczono, że w grupie FemtoLASIK osiągnięto bardziej przewidywalną grubość płatka, niższe wartości astygmatyzmu pooperacyjnego i mniejszą traumatyzację nabłonka rogówki. Różnice w pooperacyjnej nieskorygowanej ostrości wzroku do dali (UDVA – *uncorrected distance visual acuity*) w obu grupach okazały się nieistotne statystycznie. Odsetek pacjentów z pełną (20/20) UDVA do dali w 1. dobie po zabiegu był podobny we wszystkich grupach. Po 3 miesiącach obserwacji ok. 99% pacjentów osiągnęło UDVA co najmniej 20/40, a ok. 70% z nich 20/20 lub lepszą. FemtoLASIK okazał się jednak znacznie bardziej przewidywalny pod względem wartości ekwiwalentu sferycznego (SE – *spherical equivalent*). SE +/- 0,5 D osiągnęło 91% operowanych pacjentów, podczas gdy w grupie LASIK było to odpowiednio 74% i 73% w zależności od użytego mikrokeratomu. Także Chen i wsp. [6] potwierdzili wyższość płatków wykonanych femtolasem nad wyciętymi przez manualne mikrokeratomy.

### Lentikula

Nowsze metody laserowej korekcji wzroku, takie jak FLEEx® (*femtosecond lenticule extraction*) z 2006 r. i ReLEEx®/SMILE® (*refractive lenticule extraction/small incision lenticule extraction*) z 2010 r. pozwalają na całkowite wyeliminowanie konieczności wykorzystywania lasera ekscymerowego, a metoda ReLEEx® nie wymaga przy tym wytworzenia płatka rogówki. Takie postępowanie pozwala na uniknięcie potencjalnych powikłań związanych z obecnością płatka m.in. otworu w płatkach (*buttonhole*) i wrastania nabłonka pod płatkami.

W metodzie FLEEx® laser przygotowuje w stromie rogówki lentikulę, którą następnie wydobywa się na zewnątrz poprzez standardowe, znane z techniki FemtoLASIK, cięcie okrężne.

Z kolei w technice ReLEEx® lentikulę wydobywa się poprzez niewielki 2-4 mm port. Głównymi zaletami metody SMILE® są: wysoka efektywność procedury, większa ochrona biomechaniczna rogówki poprzez znaczne ograniczenie wielkości nacięcia wertykalnego i mniejsze ryzyko wystąpienia zespołu suchego oka czy ektazji rogówki w porównaniu do metody FemtoLASIK [7]. Badania naukowe dowodzą, że zarówno FLEEx®, jak i SMILE® wykazują dobre i stabilne wyniki parametrów refrakcyjnych, ostrości wzroku, profilu bezpieczeństwa oraz przewidywalności [8].

Liu i wsp. [9] wykazali, że w oczach poddanych zabiegowi SMILE® obserwuje się mniejszą indukcję aberracji wyższego rzędu i większą czułość na kontrast niż w oczach poddanych korekcji równoważnej krótkowzroczności metodą FemtoLASIK.

W badaniu wykazano, że UDVA do dali w 1. dobie po zabiegu była lepsza u pacjentów w grupie FemtoLASIK, jednak w 6-miesięcznej obserwacji nie wykazano istotnych statystycznie różnic pomiędzy grupami FemtoLASIK i SMILE®. Odpowiednio 99% i 96% oczu uzyskało UDVA do dali 20/20 lub lepszą. Obie grupy nie różniły się istotnie także pod względem pooperacyjnych wartości SE.

## Zastosowanie lasera femtosekundowego w korekcji starczowzroczności

Starczowzroczność (prezbiopia) to postępujące, związane z wiekiem, obniżenie zdolności soczewki oka do akomodacji powodujące wystąpienie objawów astenopijnych do blizy i odległości pośrednich. Mimo że nadal to okulary pozostają najpopularniejszą metodą korekcji prezbiopii zastosowanie metody Presbyond® (FemtoLASIK z jednoczesnym wytworzeniem monowizji) pozwala u odpowiednio zakwalifikowanych pacjentów na osiągnięcie co najmniej akceptowalnej ostrości wzroku do blizy. Jest to zabieg preferowany u pacjentów w wieku powyżej 38 lat i może być przeprowadzony u osób z krótkowzrocznością do -8,0 D, nadwzrocznością do +3,5 D, z astygmatyzmem do 2,0 D oraz u osób z normowzrocznością wymagających jedynie poprawy widzenia do blizy. Dodatkowym warunkiem zastosowania tej metody korekcji jest pozytywny wynik testu tolerancji monowizji podczas badania kwalifikacyjnego. Plan zabiegu układany jest indywidualnie dla każdego pacjenta w celu wytworzenia wyraźnego widzenia obuocznego do dali, blizy i odległości pośredniej.

Inną metodą korekcji starczowzroczności jest wprowadzona w 2009 r. procedura Intracore® oparta na technologii lasera femtosekundowego FEMTEC® firmy Bausch&Lomb. Technika polega na wykonaniu femtolaserem w stromie rogówki oka niedominującego 5 okrągłych, współśrodkowych nacięć, z których najszerze ma średnicę 3,5 mm. Rogówka po zabiegu staje się wielogniskowa, a wartość centralnej keratometrii ulega stopniowej zmianie, stabilizując się po 12 miesiącach na poziomie około 1 D. Metoda cechuje się niską inwazyjnością, gdyż nie wiąże się z naruszeniem nabłonka ani zmniejszeniem centralnej grubości rogówki. Do istotnych powikłań zalicza się efekt halo występujący po roku u 36% pacjentów, a brak poprawy ostrości wzroku do blizy odnotowano u 12% pacjentów [10], co powoduje, że metoda ta jest obecnie rzadko wykorzystywana.

Na całym świecie prowadzone są badania w celu opracowania nowych metod korekcji starczowzroczności z wykorzystaniem pobranej podczas zabiegu SMILE® lentikuli.

Jedną z obiecujących technik jest metoda PEARL (*presbyopic allogenic refractive lenticule*), opisana w 2017 r. przez Jacoba i wsp. [11], polegająca na wszczepieniu odpowiednio wypreparowanego fragmentu lentikuli pozyskanej od krótkowzrocznego dawcy w trakcie zabiegu SMILE® do kieszonki wytworzonej laserem femtosekundowym w rogówce biorcy. Zastosowanie metody odwróconego płata do wytworzenia kieszonki zapobiega powikłaniom i pozytywnie wpływa na gojenie się rany. Implantacja lentikuli modyfikuje rogówkę biorcy w taki sposób, że uzyskuje ona właściwości płaszczyzny wielogniskowej.

Badacze opisali kilkusobową grupę normowzrocznych pacjentów ze starczowzrocznością, u których wszczepienia implantu dokonano w oku niedominującym. Przed pobraniem lentikuli wykonano odpowiednie testy serologiczne wykuczające obecność antygenów powierzchniowych u dawców. Po operacji nieskorygowana ostrość wzroku do blizy poprawiła się w badanej grupie od 3 do 5 rzędów Jaegera. Należy podkreślić, że zmianie nie ule-

gła wyjściowa, pełna ostrość wzroku do dali. Pacjenci w trakcie półrocznego okresu obserwacji byli zadowoleni z efektów zabiegu. Nie potrzebowali korekcji okularowej do blizy, odległości pośrednich, a także nie zgłaszali objawów dysfotopsji, efektów halo czy olśnienia.

Konieczne są dalsze badania na większej grupie badanych i z dłuższym okresem obserwacji w celu ostatecznego potwierdzenia skuteczności tej metody w korekcji starczowzroczności.

## Zastosowanie lasera femtosekundowego i lentikuli w leczeniu stożka rogówki

Stożek rogówki (*keratoconus*) jest chorobą degeneracyjną objawiającą się postępującym ścięceniem i uwypukleniem części rogówki, co w konsekwencji powoduje powstanie astygmatyzmu nieregularnego i pogorszenie ostrości wzroku.

Sieciowanie rogówki (*crosslinking*, CXL) za pomocą ryboflawiny i światła ultrafioletowego A (UVA) jest uznawane za skuteczną i bezpieczną opcję leczenia stożka rogówki w oczach, w których grubość rogówki centralnej wynosi co najmniej 400 mikrometrów [12]. W celu „pogrubienia” zbyt cienkich rogówek, dla ochrony warstwy śródbłonki przed promieniowaniem stosowane są hipoosmolarne preparaty ryboflawiny oraz soczewki kontaktowe. Modyfikacje te wiążą się jednak z obniżeniem skuteczności procedury CXL [13]. Uwaga naukowców skupiła się zatem na możliwości wykorzystania allogenicznej lentikuli pozyskanej podczas zabiegu SMILE®. W badaniu z 2015 r. Sachdev i wsp. [14] wykazali, że w procedurze *Tailored Stromal Expansion CXL* grubość rogówki pacjenta ze stożkiem można zwiększyć poprzez bezpośrednie ułożenie allogenicznej lentikuli na zrębie rogówki biorcy. Badacze nie stwierdzili poważnych powikłań śródoperacyjnych ani pooperacyjnych. O osiągnięciu optymalnych wyników pooperacyjnych i zahamowaniu progresji stożka - po 6 miesiącach obserwacji - świadczą zarówno stabilne wartości pachymetrii, jak i keratometrii. Nie zaobserwowano przy tym znaczącej utraty komórek śródbłonki.

O powodzeniu przeprowadzonej procedury sieciowania z zastosowaniem lentikuli świadczyła obecność opisywanej w stromie każdego pacjenta linii demarkacyjnej widocznej w badaniu AS-OCT.

Kolejnym przykładem skutecznego zastosowania lentikuli w leczeniu stożka było opublikowane w 2015 r. przez Ganesha i wsp. [15] badanie, w którym oceniali procedurę FILI (*femtosecond intrastromal lenticular implantation*) w połączeniu z CXL u pacjentów z postępującym stożkiem i nietolerancją soczewek kontaktowych.

W badaniu sprawdzano m.in. wpływ procedury na kształt powierzchni rogówki, parametry refrakcyjne i ogólne bezpieczeństwo zabiegu. W celu uzyskania efektu spłaszczenia stożka dokonano wszczepienia 6 uprzednio kriokonserwowanych lentikul – alloimplantów, które pochodziły od nadwzrocznych pacjentów operowanych metodą SMILE®. Lentikule nasączono 0,25% ryboflawiną i odpowiednio wypreparowano, uzyskując kształt „donut-cake” celem zwiększenia grubości obwodowej rogówki biorcy z wypłaszczeniem jej centrum (wraz ze szczytem

stożka). Implanty wszczepiono do kieszonek zrębowych wytworzonych laserem femtosekundowym i poddano działaniu promieniowania UV.

Po 6-miesięcznym okresie obserwacji uzyskano znaczną poprawę zarówno nieskorygowanej, jak i skorygowanej ostrości wzroku do dali, sięgającą nawet kilku rzędów w skali logMAR oraz uzyskano istotną statystycznie poprawę wartości ekwiwalentu sferycznego. Opisano także uogólnione spłaszczenie średniej keratometrii z redukcją aberracji wyższego rzędu i obniżeniem parametrów asferyczności (współczynnik Q), dzięki uzyskaniu bardziej regularnej przedniej powierzchni rogówki. Nie wykazano istotnych powikłań śród- i pooperacyjnych. Dla potwierdzenia skuteczności tej alternatywnej metody leczenia stożka rogówki konieczne są dalsze badania randomizowane.

### Tunele rogówkowe

Technologia lasera femtosekundowego umożliwia tworzenie tuneli (kieszonek) zrębowych o różnych wielkościach i kształcie w obrębie centralnej 6-milimetrowej strefy rogówki. Umieszcza się w nich dobierany indywidualnie dwuczęściowy implant (*ring*) w kształcie pierścienia w celu korekcyjnej krótkowzroczności do -3,5D, stożka rogówki czy jatrogennej ektazji po zabiegach keratorefrakcyjnych [1].

Do niewątpliwych zalet wszczępienia tego typu pierścieni należy m.in. stabilizacja lub zahamowanie rozwoju stożka już po kilku miesiącach od zabiegu oraz możliwość usunięcia implantów w razie potrzeby. Efekt pooperacyjny może być modyfikowany np. poprzez wymianę segmentu na inny lub zmianę jego położenia.

Piñero i wsp [16]. dowiedli, że wprowadzenie pierścieni do tuneli utworzonych przy użyciu lasera femtosekundowego pozwoliło osiągnąć porównywalne wyniki ostrości wzroku i refrakcji do tych wytworzonych z użyciem mechanicznego ekspandera, co więcej, metoda laserowa okazała się korzystniejsza pod względem pooperacyjnych wartości aberracji wyższego rzędu.

Z kolei Hashemi i wsp. [17] wykazali, że połączenie tej procedury z interwencją wzmacniającą tkankę, taką jak crosslinking, poprawia UDVA u tych pacjentów ze stożkiem, którzy nie tolerują korekcji za pomocą soczewek kontaktowych. Ryzyko ciężkich powikłań tej procedury wynosi ok. 1%. Są nimi perforacja rogówki, zakaźne zapalenie rogówki oraz wysunięcie implantu.

### Zastosowania lasera femtosekundowego w chirurgii zaćmy

Chirurgia zaćmy wspomagana laserem femtosekundowym FLACS (*femtosecond laser-assisted cataract surgery*) to najnowsza z technik chirurgicznych zaćmy.

Pierwszy zabieg tego typu został przeprowadzony na Węgrzech w 2008 r. przez Nagy'ego [18]. Metoda ta, m.in. dzięki swojej precyzji i powtarzalności, dość szybko zyskała popularność na całym świecie. Technologia lasera femtosekundowego zmniejsza potrzebną energię i umożliwia zastosowanie lasera na dokładnie określonej

głębokości przy minimalnym uszkodzeniu sąsiednich tkanek. Wszystkie dostępne na rynku platformy FLACS są wyposażone w system obrazowania optycznej tomografii koherentnej (OCT) lub kamerę Scheimpfluga, która precyzyjnie naprowadza wiązkę laserową.

W celu prawidłowego nakierowania wiązki lasera operowane oko musi zostać odpowiednio ufixowane za pomocą systemu dokowania próżniowego. Dostępne na rynku platformy wykorzystują różne rozwiązania techniczne. Niektóre posiadają specjalną soczewkę aplanacyjną i system ssący (*LenSx®*, *Alcon* i *Victus*, *Bausch & Lomb*), inne - wypełniony płynem pierścień ssący (*Catalys®*, *Johnson & Johnson* i *LensAR*) [19].

Głównymi zaletami operacji zaćmy z użyciem lasera femtosekundowego są: niezwykła precyzja i powtarzalność umiejscowienia, rozmiaru i głębokości wykonywanych nacięć rogówki, przewidywalność rozmiaru i umiejscowienia kapsulotomii oraz zmniejszenie energii ultradźwiękowej potrzebnej do emulsyfikacji jądra soczewki poprzez wstępne pocięcie go na mniejsze fragmenty, co zmniejsza negatywny wpływ na śródbłonek.

Pomimo wspomnianych zalet opublikowane metaanalizy nie wykazały istotnych statystycznie korzyści płynących z wykonywania operacji wspomaganą laserem w porównaniu z konwencjonalną, manualną fakoemulsyfikacją wykonywaną przez doświadczonego chirurga [20]. Potwierdzono natomiast, że zastosowanie lasera femtosekundowego u chorych z obniżoną liczbą komórek śródbłonek jest korzystniejsze niż klasyczna operacja zaćmy, m.in. ze względu na ograniczenie traumatyzacji rogówki poprzez użycie mniejszej ilości ultradźwięków potrzebnych do fragmentacji jądra soczewki [21].

Ograniczeniem metody femtofakoemulsyfikacji jest bardzo wysoki koszt procedury wynikający z zakupu i eksploatacji platformy femtolasera.

### Laser femtosekundowy w keratoplastyce drążącej

Nowoczesna keratoplastyka to kolejny przykład niebywałego postępu, jaki nastąpił w światowej okulistyce od 1905 r., kiedy to E. Zirm po raz pierwszy wykonał przeszczepienie rogówki. Laser femtosekundowy wydaje się być obiecującym narzędziem w uzyskaniu poprawy wyników pooperacyjnych, pozwalając na osiągnięcie większej precyzji podczas trepanacji, a w związku z tym lepszego dopasowania i stabilności przeszczepianej rogówki.

Skutkuje to zwiększeniem powierzchni stycznej pomiędzy płatkami a tkanką biorcy, pozytywnie wpływając na zmniejszenie astygmatyzmu pooperacyjnego i proces gojenia [22]. Wykorzystanie lasera femtosekundowego w keratoplastyce drążącej jest rozwinięciem koncepcji zaproponowanej w latach 60. XX wieku przez J. Barraquera charakteryzującej się różną grubością przeszczepu (graftu) w przedniej i tylnej części rogówki [23].

Badania naukowe dowiodły, że transplantacja z wykorzystaniem jednego z dwóch najczęściej wykonywanych obecnie wzorców trepanacji laserowej, tj. „top-hut” i „zigzag”, pozwoliła na osiągnięcie lepszej skorygowanej ostrości wzroku (CDVA – corrected distance visual

acuity) przy mniejszym astygmatyzmie pooperacyjnym i szybszym usunięciu szwów niż w przypadku klasycznej keratoplastyki. Należy zaznaczyć, że odsetek niepowodzeń i odrzutów jest podobny dla obu grup.

W badaniu oceniającym laserowe metody „top-hut” i „zigzag” osiągnięto porównywalne wartości ostrości wzroku, parametrów refrakcyjnych, liczby komórek śródbłonna oraz czasu gojenia [24]. Z kolei laserowa keratoplastyka drażąca techniką typu „mushroom” okazała się skuteczną opcją terapeutyczną zwłaszcza u dzieci. Metoda ta pozwoliła na osiągnięcie optymalnych wartości refrakcji oraz zmniejszenie astygmatyzmu pooperacyjnego z jednoczesnym ograniczeniem ryzyka odrzutu dzięki relatywnie mniejszej tylnej części przeszczepianego płatka [25].

### Laser femtosekundowy w keratoplastyce warstwowej

Selektywne przeszczepianie warstw rogówki ma liczne zalety, a jedną z najważniejszych jest ograniczenie reakcji immunologicznej (i ryzyka wystąpienia odrzutu) dzięki transplantacji mniejszej ilości obcej tkanki. Dzięki możliwości wytwarzania przewidywalnych i precyzyjnych nacięć, w dowolnych konfiguracjach i na różnych głębokościach, laser femtosekundowy jest uznawany za użyteczne narzędzie także w keratoplastyce warstwowej. W przedniej głębokiej keratoplastyce warstwowej DALK (*deep anterior lamellar keratoplasty*) około 95% przedniej części rogówki jest usuwane z pozostawieniem jej najbardziej wewnętrznych fragmentów oraz błony Descemeta i warstwy komórek śródbłonna [26]. Możliwe jest oddzielenie błony Descemeta od przednich warstw zrębu poprzez podanie powietrza w tzw. procedurze „big-bubble” [27]. Trudność stanowi znalezienie odpowiedniego sposobu iniekcji powietrza, który w skuteczny sposób pozwoliłby na oddzielenie od siebie warstw rogówki bez towarzyszącego uszkodzenia błony Descemeta i konieczności konwersji procedury chirurgicznej do keratoplastyki drażącej.

Najnowsze rozwiązania wykorzystujące technologię lasera femtosekundowego pozwalają chirurgowi na wypreparowanie w rogówce kanału, przez który wprowadzana jest specjalna kaniula, aż do osiągnięcia odpowiedniej głębokości. Wykonanie tak precyzyjnej procedury jest możliwe dzięki jednoczesnej śródoperacyjnej wizualizacji warstw rogówki w optycznej tomografii koherentnej (OCT) [27].

Buzzonetti i wsp. [28] porównali DALK wspomagany laserem femtosekundowym z klasycznym zabiegiem tego typu u 20 dzieci i wskazali, że w grupie oczu operowanych z użyciem femtolasera, dzięki równym, laserowym nacięciom bocznym, dopasowanie tkanek dawcy i biorcy było bardzo precyzyjne i skutkowało mniejszym pooperacyjnym ekwiwalentem sferycznym i szybszym gojeniem się ran. Wprowadzenie keratoplastyki warstwowej tylnej bez wątplenia zrewolucjonizowało chirurgię rogówki do tego stopnia, że technika ta jest obecnie powszechnie wykorzystywana w ośrodkach okulistycznych na całym świecie w leczeniu zaawansowanych dystrofii Fuchsa lub innych chorób śródbłonna rogówki. Śródbłonek rogówki zbudowany jest z wysoko wyspecjalizowanych komórek, które mimo że nie są zdolne do regeneracji,

to odgrywają kluczową rolę w utrzymywaniu jej przezierności. Przeszczepienie tych komórek, czy to z niewielką ilością zrębu rogówki w tzw. procedurze DSEK/ DSAEK (*Descemet's stripping endothelial keratoplasty*), czy z samą błoną Descemeta jako ich nośnikiem, tzw. DMEK (*Descemet's membrane endothelial keratoplasty*) zwłaszcza w przypadku DMEK-a, pozwala na osiągnięcie bardzo dobrej pooperacyjnej ostrości wzroku [29]. Kluczowym etapem operacji jest usunięcie nieprawidłowo funkcjonującej błony Descemeta biorcy. Ten proces jest zwykle wykonywany manualnie.

Sorkin i wsp. [30] opublikowali w 2019 r. artykuł porównujący descemetoreksję, tj. usuwanie nieprawidłowej błony Descemeta, w sposób manualny i za pomocą lasera femtosekundowego. Wynika z nich, że do najważniejszych zalet metody laserowej można zaliczyć przede wszystkim osiągnięcie precyzyjnego wyśrodkowania, pożądanego kształtu i wielkości usuwanego obszaru błony.

### Przyszłe zastosowania lasera femtosekundowego

Trwają intensywne prace nad miniaturyzacją i zwiększeniem mobilności platform laserowych. W nieodległej perspektywie powinna pojawić się możliwość wykonywania femtolaserowej pierwotnej kapsulotomii tylnej oraz nanoszenia odpowiednich oznaczeń na torebkę soczewki w celu idealnego ustawienia osi w przypadku implantacji torycznej soczewki wewnątrzgałkowej. Dodatkowo, na horyzoncie rysuje się możliwość pooperacyjnej modyfikacji mocy sztucznych soczewek wewnątrzgałkowych za pomocą wiązki femtolasera.

### Podsumowanie

Technologia lasera femtosekundowego zrewolucjonizowała współczesną chirurgię okulistyczną. Stworzyła szereg nowych możliwości oraz pozwoliła nie tylko na zwiększenie skuteczności i bezpieczeństwa dotychczas wykonywanych procedur, ale także na opracowanie zupełnie nowych, przełomowych zastosowań.

### Piśmiennictwo

1. Soong HK, Malta JB. Femtosecond lasers in ophthalmology. *Am J Ophthalmol*, 2009; 147 (2): 189-197
2. Ratkay-Traub I, Juhasz T, Horvath C, et al. Ultra-short pulse (femtosecond) laser surgery: initial use in LASIK flap creation. *Ophthalmol Clin North Am*, 2001; 14 (2): 347-55
3. McAlinden C. Corneal refractive surgery: past to present. *Clin Exp Optom*, 2012; 95 (4): 386-398
4. Montés-Micó R, Rodríguez-Galietero A, Alió JL. Femtosecond laser versus mechanical keratome LASIK for myopia. *Ophthalmology*, 2007; 114 (1): 62-68
5. Kezirian GM, Stonecipher KG. Comparison of the IntraLase femtosecond laser and mechanical keratomes for laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 2004; 30 (4): 804-811
6. Chen S, Feng Y, Stojanovic A, et al. IntraLase femtosecond laser vs mechanical microkeratomes in LASIK for myopia: a systematic review and meta-analysis. *J Refract Surg*, 2012; 28 (1): 15-24
7. Ganesh S, Gupta R. Comparison of visual and refractive outcomes following femtosecond laser-assisted lasik with smile in patients with myopia or myopic astigmatism. *J Refract*

- Surg, 2014; 30 (9): 590-596
8. Kamiya K, Shimizu K, Igarashi A, et al. Visual and refractive outcomes of femtosecond lenticule extraction and small-incision lenticule extraction for myopia. *Am J Ophthalmol*, 2014; 157 (1): 128-134
  9. Liu M, Chen Y, Wang D, et al. Clinical Outcomes After SMILE and Femtosecond Laser-Assisted LASIK for Myopia and Myopic Astigmatism: A Prospective Randomized Comparative Study. *Cornea*, 2016; 35 (2): 210-216
  10. Menassa N, Fitting A, Auffarth GU, et al. Visual outcomes and corneal changes after intrastromal femtosecond laser correction of presbyopia. *J Cataract Refract Surg.*, 2012; 38 (5): 765-773
  11. Jacob S, Kumar DA, Agarwal A, et al. Preliminary Evidence of Successful Near Vision Enhancement With a New Technique: PrEsbyopic Allogenic Refractive Lenticule (PEARL) Corneal Inlay Using a SMILE Lenticule. *J Refract Surg*, 2017; 33 (4): 224-229
  12. Spoerl E, Mrochen M, Sliney D, et al. Safety of UVA-riboflavin cross-linking of the cornea. *Cornea*, 2007; 26 (4): 385-389
  13. Jacob S, Kumar DA, Agarwal A, et al. Contact lens-assisted collagen cross-linking (CACXL): A new technique for cross-linking thin corneas. *J Refract Surg*, 2014; 30 (6): 366-372
  14. Sachdev MS, Gupta D, Sachdev G, et al. Tailored stromal expansion with a refractive lenticule for crosslinking the ultrathin cornea. *J Cataract Refract Surg*, 2015; 41 (5): 918-923
  15. Ganesh S, Brar S. Femtosecond Intrastromal Lenticular Implantation Combined With Accelerated Collagen Cross-Linking for the Treatment of Keratoconus--Initial Clinical Result in 6 Eyes. *Cornea*, 2015; 34 (10): 1331-1339
  16. Piñero DP, Alio JL, El Kady B, et al. Refractive and aberrometric outcomes of intracorneal ring segments for keratoconus: mechanical versus femtosecond-assisted procedures. *Ophthalmology*, 2009; 116 (9): 1675-1687
  17. Hashemi H, Alvani A, Seyedian MA, et al. Appropriate Sequence of Combined Intracorneal Ring Implantation and Corneal Collagen Cross-Linking in Keratoconus: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cornea*, 2018; 37 (12): 1601-1607
  18. Nagy Z, Takacs A, Filkorn T, et al. Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery. *J Refract Surg*, 2009; 25 (12): 1053-1060
  19. Wang J, Su F, Wang Y, et al. Intra and post-operative complications observed with femtosecond laser-assisted cataract surgery versus conventional phacoemulsification surgery: a systematic review and meta-analysis. *BMC Ophthalmol*, 2019; 19 (1): 177
  20. Schweitzer C, Brezin A, Cochener B, et al. Femtosecond laser-assisted versus phacoemulsification cataract surgery (FEMCAT): a multicentre participant-masked randomised superiority and cost-effectiveness trial. *Lancet*, 2020; 395 (10219): 212-224
  21. Kanclerz P, Alio JL. The benefits and drawbacks of femtosecond laser-assisted cataract surgery. *Eur J Ophthalmol*, 2021; 31 (3): 1021-1030
  22. Steinert RF, Ignacio TS, Sarayba MA. "Top hat"-shaped penetrating keratoplasty using the femtosecond laser. *Am J Ophthalmol*, 2007; 143 (4): 689-691
  23. Barraquer JI. Two-level Keratoplasty. *Int Ophthalmol Clin*, 1963; 3: 515-539
  24. Shehadeh Mashor R, Bahar I, Rootman DB, et al. Zig Zag versus Top Hat configuration in IntraLase-enabled penetrating keratoplasty. *Br J Ophthalmol*, 2014; 98 (6): 756-759
  25. Elkamshoushy A, Gonnah R, Madi S, et al. Single-piece femtosecond-assisted mushroom keratoplasty in children. *J AAPOS*, 2019; 23 (1): 28, e1-28.e5
  26. Reinhart WJ, Musch DC, Jacobs DS, et al. Deep anterior lamellar keratoplasty as an alternative to penetrating keratoplasty a report by the american academy of ophthalmology. *Ophthalmology*, 2011; 118 (1): 209-218
  27. Buzzonetti L, Laborante A, Petrocelli G. Standardized big-bubble technique in deep anterior lamellar keratoplasty assisted by the femtosecond laser. *J Cataract Refract Surg*, 2010; 36 (10): 1631-1636
  28. Buzzonetti L, Petrocelli G, Valente P, et al. Refractive outcome of keratoconus treated by big-bubble deep anterior lamellar keratoplasty in pediatric patients: two-year follow-up comparison between mechanical trephine and femtosecond laser assisted techniques. *Eye Vis (Lond)*, 2019; 6:1
  29. Stuart AJ, Romano V, Virgili G, et al. Descemet's membrane endothelial keratoplasty (DMEK) versus Descemet's stripping automated endothelial keratoplasty (DSAEK) for corneal endothelial failure. *Cochrane Database Syst Rev*, 2018; 6 (6): CD012097
  30. Sorkin N, Mednick Z, Einan-Lifshitz A, et al. Three-Year Outcome Comparison Between Femtosecond Laser-Assisted and Manual Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty. *Cornea*, 2019; 38 (7): 812-816