

(38)

Zastosowanie lasera femtosekundowego (LF) w chirurgii rogówki

Femtosecond laser application in keratoplasty – current view

Edward Wylęgała^{1,2}, Michał Milka¹, Dorota Tarnawska¹, Dariusz Dobrowolski¹

¹ Z Oddziału Okulistyki Okręgowego Szpitala Kolejowego Samodzielnego Publicznego Zakładu Opieki Zdrowotnej w Katowicach
Kierownik: dr hab. n. med. Edward Wylęgała

² Z Zakładu Pielęgniarstwa i Społecznych Problemów Medycznych Śląskiej Akademii Medycznej w Katowicach
Kierownik: dr hab. n. med. Edward Wylęgała

Summary: Main purpose of this article is to present an actual review of application femtosecond laser in keratoplasty. Femtosecond laser keratome is a new option in corneal surgery that provides depth and diameter accuracy even at increased depth settings. It seems to be an ideal instrument to carry out stromal tissue cuttings in penetrating and lamellar keratoplasty as well as in refractive surgery. In this paper we also paid attention on advantages and disadvantages of use FL, as well we compare this new technology with mechanical handheld microkeratomes.

Słowa kluczowe: laser femtosekundowy, keratoplastyka, chirurgia rogówki.

Key words: femtosecond laser, keratoplasty, corneal surgery.

Wstęp

Omawiając użycie nowego typu lasera w keratoplastyce, należy wspomnieć o naukowcu, który jako pierwszy zastosował laser excimerowy do trepanacji płatków przy przeszczepach rogówki. Był nim prof. Gottfried Naumann z uniwersytetu Erlangen w Niemczech, wybitny okulista i specjalista w dziedzinie chirurgii rogówki. Od tamtego czasu nastąpił znaczny postęp w laseroterapii rogówki, czego zwieńczeniem jest wprowadzony stosunkowo niedawno do keratoplastyki laser nowej generacji (1).

Laser femtosekundowy (LF) generuje impulsy światła o czasie trwania od kilku femtosekund do kilkudziesięciu femtosekund (1 femtosekunda to 10^{-15} część sekundy). We współczesnych laserach tego typu ośrodkiem czynnym jest kryształ szafiru domieszkowanego tytanem ($Ti:Al_2O_3$). Generacja tak krótkich impulsów światła jest możliwa dzięki zjawisku pasywnej synchronizacji modów.

Główną cechą lasera femtosekundowego jest ultrakrótki czas pulsacji światła. Cecha ta pozwala na użycie bardzo małej wartości energii niezbędnej do uzyskania zjawiska fotodysrupcji tkanki. W trakcie tego procesu skupiona wiązka światła z zakresu podczerwieni powoduje zmianę stanu skupienia niewielkiej objętości tkanki ze stanu stałego w gaz, czemu towarzyszy powstanie pęcherzyków CO_2 i H_2O między niezmiennymi tkankami. Zdolność usuwania tkanki rogówki z dokładnością do $0,25 \mu m$ z każdym pulsem powoduje, że ten typ lasera jest najdokładniejszym urządzeniem, jakie kiedykolwiek używano w operacjach okulistycznych (2).

Laser ten dostarcza energię na ściśle określonej i z góry zaplanowaną głębokość zrębu rogówki, tworząc płaszczyznę ściśle

upakowanych punktów poddanych zjawisku fotodysrupcji. Energia dostarczana w ten sposób ma wartość zaledwie kilku mikrodżuli, ale jej tysiąckrotna powtarzalność w bardzo krótkim odstępie czasu jest w stanie stworzyć nacięcie w zrębie rogówki. Olbrzymią zaletą tej techniki jest minimalna traumatyzacja tkanek przyległych.

Jednym z pierwszych zastosowań klinicznych, do którego użyto tego typu laser, było wycięcie płatka rogówki w technice LASIK (Laser Assisted In-Situ Keratomileusis). Jednakże wydaje się, że najbardziej obiecujące zastosowanie laser femtosekundowy ma w zabiegach keratoplastyki warstwowej. W wielkim uproszczeniu porównując laser femtosekundowy z laserem excimerowym można powiedzieć, że ten pierwszy jest idealnym narzędziem do wykonywania precyzyjnych cięć w rogówce, podczas gdy drugi sprawdza się doskonale podczas rzeźbienia oraz cięcia zrębu rogówki (2,3).

Rodzaje obecnie dostępnych aparatów wykorzystujących technikę (LF)

Obecnie na rynku dostępnych jest kilka urządzeń tego typu, zostały one dopuszczone do użytku przez amerykańską Food and Drug Administration. Tabela I przedstawia poszczególne typy tych urządzeń oraz ważniejsze różnice między nimi.

Wszystkie powyżej przedstawione aparaty są na bieżąco udoskonalane i modyfikowane. Producenci wprowadzają kolejne zmiany w budowie i działaniu tych urządzeń, jednak we wszystkich stosowana jest technologia podobna do tej, wg której wyprodukowano laser femtosekundowy (4,5).

IntraLase (Intralase Corp, Irvine, California, USA)	<ul style="list-style-type: none"> – wymaga użycia płaskiego szkła kontaktowego oraz większych sił ssących na płaszczyznę rogówki – coraz wydajniejsze modele (od 15kHz do 60 kHz)
Femtec (20/10 Perfect Vision, GmbH, Heidelberg, Germany)	<ul style="list-style-type: none"> – wykonanie cięcia przy zachowanej naturalnej krzywiznie rogówki (bez spłaszczania jej)
Femto LDV (Ziemer Ophthalmic System AG, Port, Switzerland)	<ul style="list-style-type: none"> – sposób fiksacji do rogówki jak w przypadku IntraLase – oferowany jako mobilna stacja (niewielki kompaktowy rozmiar)
VisuMax (Carl Zeiss Meditec AG, Jena, Germany) – znany wcześniej jako DaVinci	<ul style="list-style-type: none"> – niewielka siła ssąca na rogówkę przy zachowanej naturalnej krzywiznie – wspólna platforma: LF + MEL-80 laser excimerowy

Tab. I. Porównanie poszczególnych typów LF.

Tab. I. Femtosecond laser system types – comparison.

Początki zastosowania LF w chirurgii rogówki

Jedną z pierwszych procedur chirurgicznych, w której zaczęto wykorzystywać na szerszą skalę LF, było odpreparowanie płatka zewnętrznych warstw rogówki w tzw. technice LASIK. W technice tej duże znaczenie odgrywa laser excimerowy, za pomocą którego można rzeźbić powierzchnię zrębu rogówki, tak aby otrzymać docelowy efekt refrakcyjny. Jednak przed wykonaniem ablacji zrębu rogówki laserem excimerowym konieczne jest wykonanie tak zwanej klapki bądź płatka zewnętrznych warstw rogówki, które po modelowaniu zrębu wracają na swoje miejsce. W tradycyjnym wydaniu tej techniki do odpreparowania płatka używa się mechanicznych keratomów. Wprowadzone obecnie na rynek ich nowe modele, takie jak np. Zyoptix XP (Bausch & Lomb, Rochester, NY) i Moria M2 (Antony, France), są dokładniejsze od swych poprzedników, lecz używanie ich wiąże się z komplikacjami, które najczęściej wynikają z wciąż niezbyt wysokiej przewidywalności i powtarzalności urządzenia.

Najczęściej spotykane komplikacje dotyczą: wielkości płatka, głębokości (rozerwanie endotelium, perforacja), kształtu (pomarszczony, nieregularny, obrzęknięty) czy lokalizacji zawiasu rogówki. Oczywiście prawdopodobieństwo wystąpienia tych zdarzeń oprócz użytej techniki i instrumentów w dużym stopniu zależy od doświadczenia i umiejętności chirurga (6,7).

Użycie lasera LF w technice LASIK gwarantuje lepsze rezultaty i zapewnia wyższy poziom bezpieczeństwa. Metoda ta daje możliwość wykonania z góry zaprogramowanego (z użyciem programu komputerowego) cięcia o konkretnych głębokości i średnicy.

Płatek rogówki utworzony w tej technice ma optymalne i przewidywalne wcześniej kształt i wielkość oraz odpowiednio umiejscowiony zawias rogówki. Tworzenie płatka tą techniką trwa około 30 sekund. Tak jak wcześniej było opisywane, promienie lasera są skupiane na ściśle określonej głębokości zrębu rogówki. W wyniku ich działania wytwarza się mikroplazma, tworzą się pęcherzyki wypełnione gazem i wodą rozciągające się na określonej głębokości, tworząc płaszczyznę między warstwami zrębu. Kiedy pęcherzyki z gazem zostaną wchłonięte, pozostaje rozszczepiona powierzchnia z niewielkimi zrębowymi mostkami, które stanowią pozostałość po mięszu rogówki. Mostki te są w następnej kolejności rozrywane z użyciem tępej szpatułki. Utworzony w ten sposób płatek jest następnie unoszony na swoim zawiasie, tak aby umożliwić wykonanie ablacji zrębu z użyciem lasera excimerowego (8,9).

Tradycyjne mechaniczne mikrokeratomy wycinają płatki o kształcie menisku (grubsze w części obwodowej i cieńsze

w centrum). Laser LF jest w stanie wyciąć płatek o jednakowej zgodnej grubości całej powierzchni.

Kolejną zaletą jest możliwość umiejscowienia zawiasu rogówki w dowolnym miejscu, wcześniejsze zaplanowanie wielkości płatka oraz jego średnicy, a także dokładne określenie jego grubości. Ma to szczególne znaczenie, ponieważ płatki tworzone metodą LF mogą mieć grubość zaledwie 90-120 μm , co daje sporą oszczędność pozostałego mięszu i ma bezpośrednie przełożenie na to, ile pozostałej tkanki może być poddane ablacji. Umożliwia to usuwanie większych wad nawet wówczas, gdy rogówka jest bardzo cienka (8).

Keratoplastyka drążąca

Pojawienie się LF stworzyło zupełnie nową jakość również w keratoplastyce drążącej. Takie procedury, jak preparowanie płatka w wyżej opisanej technice LASIK czy tworzenie kanałów rogówki dla śródrogówkowych pierścieni INTACTS (Intrastromal Corneal Ring Segments), są od kilku lat z powodzeniem stosowane w chirurgii rogówki. Ostatnie prace pokazują, że po wprowadzeniu odpowiedniego oprogramowania oraz zwiększeniu głębokości zrębu rogówki, na której LF może być używany, uzyskano urządzenie, które może mieć ogromny wpływ na dalszy rozwój keratoplastyki drążącej. Największą zaletą tego lasera jest możliwość wykonywania wysoce precyzyjnych cięć mięszu rogówki z dużą dokładnością, powtarzalnością, o kształtach, których do tej pory praktycznie nie można było wykonać. Wszystko to powoduje, że taki przeszczep ma większą stabilność biomechaniczną, wykazuje mniejszą skłonność do astygmatyzmu, a rana pooperacyjna goi się szybciej. To wszystko przekłada się na skuteczniejszą rehabilitację wzroku (10).

W zależności od ośrodka, w którym wykonuje się zabieg, i użytego konkretnego typu LF algorytmy postępowania różnią się między sobą. Ogólny schemat użycia LF w PKP techniką typu „grzyb” (mushroom) wygląda następująco: po umieszczeniu rogówki dawcy w sztucznej przedniej komorze i ustawieniu dokładnych parametrów nacięć, identycznych zarówno dla dawcy, jak i biorcy, rozpoczyna się preparowanie płatka rogówki laserem. Kolejno wykonuje się cięcia, rozpoczynając od śródłonka w płaszczyźnie pionowej, następnie poziomej, po czym laser powraca ponownie do płaszczyzny pionowej i pod kątem 90 stopni kończy cięcie aż do nabłonka. Płatek jest następnie odłączany i zabezpieczony w sterylnej kapsule na czas preparowania płatka biorcy. Preparowanie płatka rogówkowego biorcy odbywa się bardzo podobnie z tą różnicą, że tutaj LF wymaga użycia zarówno soczewki kontaktowej, jak i pierścienia zasysa-

jącego. Procedurę kończy delikatne odłączenie naciętego płatk, umieszczenie w to miejsce płatk dawcy oraz założenie szwów rogówkowych (11).

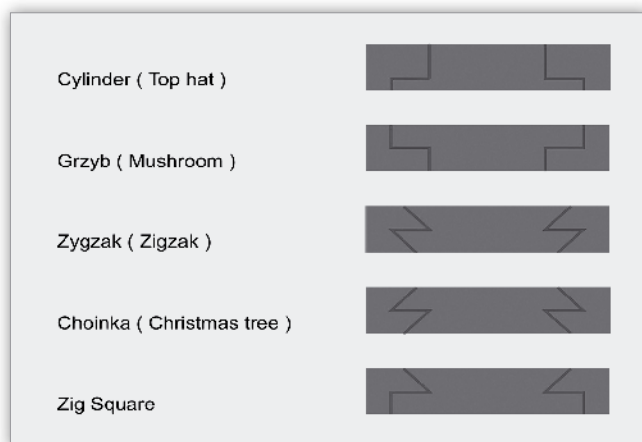
Jednym z ważniejszych założeń przy wykonywaniu tego typu zabiegów jest bardzo dobre dopasowanie przeszczepu do rogówki biorcy, co w przypadku tej techniki gwarantują nam komputerowo zaplanowane, z bardzo dużą precyzją, i wcześniej ustalone linie oraz kąty cięć. Obecnie proponowanych jest kilka rodzajów cięć wykonywanych za pomocą LF w keratoplastyce drążącej. Każde z nich ma swoje zalety i wady, a kryterium ich wyboru pozostaje przyczyna, z powodu której decydujemy się na przeszczep, oczekiwany rezultat i przekonanie chirurga co do skuteczności tej, a nie innej, metody.

Żalny jest jednak znaczny wzrost liczby wykonanych zabiegów tzw. keratoplastyki warstwowej tylnej. PLK, nazywana także keratoplastyką warstwową endotelialną głęboką DLEK (Deep Lamellar Endothelial Keratoplasty), jest techniką manualną i została wprowadzona w celu dokonania przeszczepu tylko wybranych warstw rogówki dotkniętych konkretnym schorzeniem. Z taką sytuacją spotykamy się w keratopatii dekompensacyjnej obrzękowej czy dystrofii Fucha, gdzie patologia obejmuje tylko śródbłonek rogówki. Wymiana tylnej części rogówki z pozostawieniem nietkniętych pozostałych warstw pozwala nam uniknąć większości komplikacji towarzyszących PKP, takich jak wysoki astygmatyzm, problemy z gojeniem się ran (infekcje, waskularyzacja) czy wreszcie większe ryzyko odrzutu przeszczepu (13).

Cylinder (Top hat)	Jego zaletą jest poprawienie stabilności przeszczepu, a co z tego wynika – także całej rogówki oraz większa powierzchnia wymienionego endotelium, co ma szczególne znaczenie przy patologjach w tej części rogówki.
Grzyb (Mushroom)	Jest dokładnie odwrotnością cięcia typu cylinder. W tym przypadku płatek przeszczepianej rogówki ma większą powierzchnię od strony nabłonka. Uzyskujemy tutaj poprawę kształtu rogówki, co ma wpływ na zmniejszenie astygmatyzmu. Ujemną stroną tego typu cięcia są: możliwość uniesienia płatk przez podwyższone ciśnienie oraz mniejsza powierzchnia wymienianego endotelium.
Zygzak (Zigzag)	Tę konfigurację jako pierwszy zaproponował dr Roger Steinert. Jego przewagą jest przede wszystkim doskonałe dopasowanie płatk do rogówki, lepszy kształt, redukcja astygmatyzmu i szybki powrót ostrości wzroku. Główną niedogodnością jest fakt sporej delikatności i kruchości płatk, co zwłaszcza przy jego separowaniu może doprowadzić do podarcia.
Choinka (Christmas tree)	Stosunkowo rzadko stosowana. Zalety i wady podobne jak przy poprzednim rodzaju cięcia.
Zig Square	Powstało z połączenia cięcia typu zygzak i grzyb. Doskonale przypasowuje płatek do rogówki biorcy, a jego prostsza konstrukcja w tylnej części zmniejsza ryzyko przedarcia. Znaczenie ma tutaj także szersza tylna średnica, co przekłada się bezpośrednio na ilość wymienionego endotelium.

Tab. II. Proponowane rodzaje cięć rogówkowych, możliwe do wykonania z użyciem LF.

Tab. II. Suggested corneal cut shapes done with femtosecond laser.



Ryc. 1. Rodzaje najczęściej wykonywanych cięć zrębu rogówki z użyciem LF.

Fig. 1. Common geometric patterns made by a femtosecond laser.

Tabela II prezentuje proponowane rodzaje cięć (11,12) (ryc. 1).

Keratoplastyka warstwowa tylna PLK (Posterior Lamellar Keratoplasty)

Keratoplastyka drążąca, od czasu kiedy pierwszy udany tego typu zabieg przeprowadził w 1905 roku Eduard Konrad Zirm w Ołomuńcu na Morawach, jest wciąż najczęściej wykonywaną procedurą transplantacyjną rogówki na świecie. W ostatnich latach zauwa-

Technika DLEK jest bardzo wymagająca, a odpowiednie wypreparowanie tylnego płatk zarówno w oku dawcy, jak i biorcy, zawierającego tylną część zrębu rogówki wraz z błoną Descemeta i endotelium, jest czasochłonne i trudne technicznie. Aby wyeliminować tę niedogodność, do PLK wprowadzono nową technikę zwaną DSEK (Descemet-stripping endothelial keratoplasty). W technice DSEK usunięte zostają śródbłonek oraz błona Descemeta, a pozostałe struktury tylnej rogówki pozostają nietknięte. Jedną z nowszych modyfikacji techniki DSEK jest użycie automatycznych mikrokeratomów umożliwiających łatwiejsze i dokładniejsze odpreparowanie tylnego płatk dawcy. Największym problemem w tej technice pozostaje jednak odpowiednio dokładne usunięcie tylnych warstw rogówki biorcy, gdyż każda nieregularność w przyleganiu przeszczepionego płatk dawcy ma w późniejszym czasie wpływ na ostrość widzenia. I właśnie w preparowaniu rogówki biorcy upatruje się szansy dla zastosowania lasera femtosekundowego (13,14).

W ostatnim czasie ukazały się prace badawcze mające na celu dowiedzieć o przydatności technologii LF w tego typu zabiegach. Wiele z nich dowodzi, że technika LF, która z tak wielkim powodzeniem stosowana jest w technice LASIK, o której już wyżej wspomniano, może być równie skuteczna w odpreparowaniu tylnych warstw rogówki w PLK. Seitz i wsp. używając mikroskopu elektronowego, zbadali precyzję cięć w głębokich warstwach rogówki wykonanych z użyciem LF i stwierdzili gładką powierzchnię i normalne przyleganie włókien kolageno-

wych bez oznak uszkodzenia termicznego. Prace autorstwa Sarayba i wsp. (Cornea 2005) oraz Cheng i wsp. (Cornea 2007) pokazują ogólny schemat takiego zabiegu. W pierwszej części z użyciem LF wycina się tylny płatek z rogówki dawcy poprzez utworzenie nacięć w płaszczyźnie warstwowej (tu używa się mniejszych energii) oraz trepanacyjnej (większa energia) według ściśle wcześniej określonych parametrów, takich jak średnica płatka czy jego głębokość (grubość). Samo odłączenie płatka od pozostałej części rogówki może być wykonane za pomocą pęsetki lub tzw. separacji tępej. Jak już wcześniej było opisywane, niektóre ze stosowanych aparatów potrafią utworzyć taki płatek bez używania dużych sił ssących i aplacyjnych, dzięki czemu jego krzywizna jest jak najbardziej zbliżona do naturalnej.

Następnie w bardzo podobny sposób postępuje się z rogówką biorcy. Po odpowiednim umocowaniu oka laser ponownie wycina płatek rogówki biorcy zawierający endotelium. Zachowane zostają te same parametry cięcia, co oznacza, że może mieć ono taką samą średnicę i głębokość oraz zachowane kąty cięć. Średnica cięcia horyzontalnego (warstwowego) jest najczęściej nieco szersza niż średnica cięcia trepanacyjnego.

Kolejnym krokiem jest umieszczenie płatka z endotelium dawcy w łożu po płatku biorcy (dokonuje się tego przez wąski tunel na obwodzie rogówki) oraz wykonanie tamponady powietrznej, która będzie dociskać świeżo przeszczepiony płatek zawierający endotelium. Użycie tej techniki gwarantuje chirurgowi dobre dopasowanie przeszczepianych płatków, zmniejsza ryzyko przemieszczenia przeszczepu i zapewnia niezbędny margines bezpieczeństwa. Udowodniono również, że poza skróceniem czasu zabiegu oraz wyeliminowaniem niedogodności związanych z czynnościami manualnymi niezbędnymi podczas wykonywania tego typu zabiegu użycie LF nie powoduje utraty większej liczby komórek śródbłonka niż ma to miejsce w klasycznej PKP.

Precyzja, z jaką wykonuje się powyżej opisaną procedurę z użyciem LF, jest praktycznie niemożliwa do osiągnięcia podczas stosowania mechanicznych mikrokeratomów (15).

Wnioski

Technologia użycia LF w keratoplastyce jest metodą nową i wciąż mało zbadaną. Mimo to w ostatnim czasie obserwuje się jej dynamiczny rozwój i doskonalenie. Powstające nowe urządzenia są sprawniejsze, dokładniejsze i będą coraz powszechniej stosowane. Zdobywa ona coraz szerszą rzeszę zwolenników i mimo wciąż obecnych głosów przeciwników, zarzucających nowej technologii głównie wysokie koszty całej procedury, wydaje się, że technika operacyjna z użyciem LF ma szansę stać się nowym standardem w chirurgii rogówki. Za takim obrotem sprawy przemawiają pozytywne wyniki badań przeprowadzanych w różnych placówkach na całym świecie, a także rosnąca popularność tej metody i jej powszechność.

Piśmiennictwo:

1. Naumann GO, Seitz B, Lang GK, Langenbucher A, Kus MM: *193 excimer laser trepanation in perforating keratoplasty. Report of 70 patients.* Klin. Monatsbl. Augenheilkd 1993 Oct, 203(4), 252-261.
2. Gatineau D: *The Femtosecond Laser: Is it the Gold Standard Yet?* Cataract & Refractive Surgery Today Europe 2007, 2(3), 51-52.
3. Balestrazzi E, Mosca L, Fasciani R, Mosca L: *Is the Femtosecond Laser the Key to LASIK's Future?* Cataract & Refractive Surgery Today Europe 2007, (2)3, 55-57.
4. Holzer MP, Rabsilber TM, Auffarth GU: *Penetrating Keratoplasty Using Femtosecond Laser.* American Journal of Ophthalmology 2007, 143(3), 524-526.
5. Holzer MP, Rabsilber TM, Auffarth GU: *Femtosecond laser-assisted corneal flap cuts: morphology, accuracy, and histopathology.* Invest Ophthalmol Vis Sci 2006, (47).
6. Maldonado BMJ, Ruiz-Oblitas L, Munuera JM et al.: *Optical coherence tomography evaluation of the corneal cap and stromal bed features after laser in situ keratomileusis for high myopia and astigmatism.* Ophthalmology 2000, 107, 81-87.
7. Leung AT, Rao SK, Cheng AC et al.: *Pathogenesis and management of laser in situ keratomileusis flat button hole.* J Cataract Refract Surg 2000, 26, 358-362.
8. Touboul D, Salin F, Mortermousque B et al.: *Avantages and inconvenients du microkeratome laser femtoseconde.* J Fr Ophthalmol 2005, 28, 535-546.
9. Talamo JH, Meltzer J, Gardner J: *Reproducibility of flap thickness with IntraLase FS and Moria LSK-1 and M2 mikrokeratomes.* J Refract Surg 2006, 22, 556-561.
10. Daya SM, Espinosa M: *The Catalyst for Innovative Penetrating Keratoplasty.* Cataract & Refractive Surgery Today Europe 2007, 2(3), 70-71.
11. Buratto L, Böhm E: *The Use of the Femtosecond Laser in Penetrating Keratoplasty.* Am J of Ophthalmology 2007, 143(5), 737-742.
12. Ignacio TS, Nguyen TB, Chuck RS, Kurtz RM, Sarayba MA: *Top hat wound configuration for penetrating keratoplasty using the femtosecond laser: a laboratory model.* Cornea 2006, 25, 336-340.
13. Donald TH Tan, Jodhbir S Mehta: *Future directions in lamellar corneal transplantation.* Cornea 2007, 26, 21-28.
14. Kaz Soong H, Mian S, Abbasi O, Juhasz T: *Femtosecond laser-assisted posterior lamellar keratoplasty.* Ophthalmology 2005, 112, 44-49.
15. Cheng YY, Pels E, Nuijts RMMA: *Femtosecond-laser-assisted Descemet's stripping endothelial keratoplasty.* J Cataract Refract Surg 2007, 33, 152-155.

Praca wpłynęła do Redakcji 14.02.2008 r. (1015)
Zakwalifikowano do druku 26.03.2008 r.

Adres do korespondencji (reprint requests to):

dr hab. n. med. Edward Wylęgała
Oddział Okulistyczny Okręgowego Szpitala Kolejowego
ul. Panewnicka 65
40-760 Katowice
e-mail: wylegala@gmail.com