

IPPT Reports on Fundamental Technological Research

1/2020

Agata Roszkiewicz, Tomasz Wojciechowski,  
Wojciech Nasalski, Jacek Kossut

**RAPORT Z FORMOWANIA STRUKTURY  
SOCZEWKI FRESNELA I POMIARÓW JEJ  
WŁASNOŚCI OGNISKUJĄCYCH**

Institute of Fundamental Technological Research  
Polish Academy of Sciences

Warsaw 2020

IPPT Reports on Fundamental Technological Research

ISSN 2299-3657

ISBN 978-83-65550-27-9

Editorial Board/Kolegium Redakcyjne:

Wojciech Nasalski (Editor-in-Chief/Redaktor Naczelny),  
Paweł Dłużewski, Zbigniew Kotulski, Wiera Oliferuk,  
Jerzy Rojek, Zygmunt Szymański, YuriyTasinkevych

Reviewer/Recenzent:

Prof. Ryszard Pęcherski

Received on 16 June 2020

---

Copyright © 2020 by IPPT-PAN  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk (IPPT-PAN)  
Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences  
Pawińskiego 5B, PL 02-106 Warsaw, Poland

---

## PODZIĘKOWANIA

Prace sponsorowane częściowo przez Narodowe Centrum Nauki,  
Polska, projekt nr 2015/19/B/ST7/03656.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by National Science Centre, Poland, project nr 2015/19/B/ST7/03656.

Agata Roszkiewicz<sup>1</sup>, Tomasz Wojciechowski<sup>2</sup>,  
Wojciech Nasalski<sup>1,\*</sup>, Jacek Kossut<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Instytut Podstawowych Problemów Techniki  
Polskiej Akademii Nauk (IPPT PAN)

<sup>2</sup> Instytut Fizyki  
Polskiej Akademii Nauk (IF PAN)

\* korespondencja: [wnasal@ippt.pan.pl](mailto:wnasal@ippt.pan.pl) (W.N.), [kossut@ifpan.edu.pl](mailto:kossut@ifpan.edu.pl) (J.K.)

## Streszczenie

Raport zawiera graficzny zestaw wyników prac prowadzonych w okresie październik 2019 – marzec 2020 w ramach współpracy pomiędzy IPPT PAN i IF PAN. Prace prowadzone w IF PAN dotyczyły nałożenia warstwy złota na płytkę kwarcu i grawerowania w tej warstwie struktury jednowymiarowej soczewki Fresnela. Prace prowadzone w IPPT PAN dotyczyły wyznaczania parametrów geometrycznych wygrawerowanej struktury i charakterystyk jej oddziaływania z padającym polem optycznym. Prace eksperymentalne obu zespołów badawczych pozwoliły na precyzyjne sformowanie jednowymiarowej struktury ogniskującej typu płytki strefowej Fresnela (Fresnel Zone Plate - FZP) o właściwościach zgodnych z wynikami symulacji numerycznych.

Agata Roszkiewicz<sup>1</sup>, Tomasz Wojciechowski<sup>2</sup>,  
Wojciech Nasalski<sup>1,\*</sup>, Jacek Kossut<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Fundamental Technological Research  
Polish Academy of Sciences (IPPT PAN)

<sup>2</sup> Institute of Physics  
Polish Academy of Sciences (IF PAN)

\* correspondence: [wnasal@ippt.pan.pl](mailto:wnasal@ippt.pan.pl) (W.N.), [kossut@ifpan.edu.pl](mailto:kossut@ifpan.edu.pl) (J.K.)

## Summary

Report contains a graphical set of results of works conducting within a frame of collaboration between IPPT PAN and IF PAN in a period from October 2019 to March 2020. Works conducting at IF PAN pertained to deposition of a gold layer on a plate of quartz and engraving on it a Fresnel lens structure. Works conducting at IPPT PAN pertained to determination of geometric parameters of the structure engraved and characteristics of its interaction with an incident optical field. Experimental works of both research groups resulted in precise formation of the one-dimensional focusing structure of a Fresnel Zone Plate (FZP) type with properties compatible with results of numerical simulations.

## Spis treści

1. Nanoszenie warstwy złota i grawerowanie soczewki Fresnela ... 9
2. Parametry wygrawerowanej struktury soczewki Fresnela ..... 11
3. Obrazowanie właściwości ogniskowania soczewki Fresnela ... 13

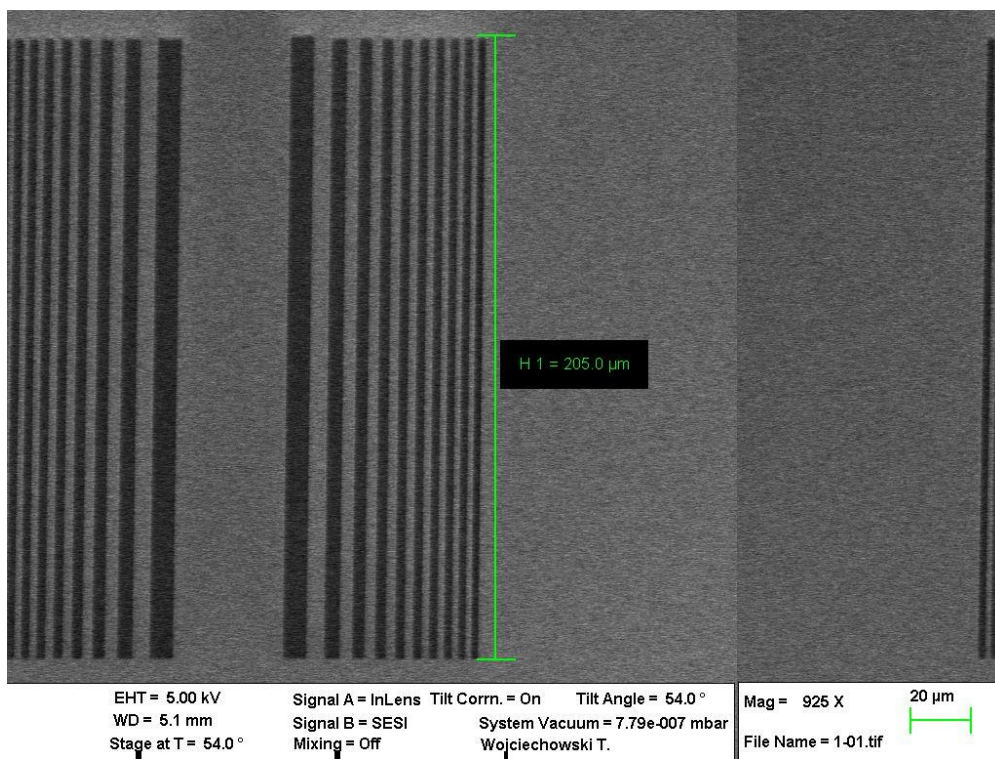
# Content

1. Deposition of a gold layer and engraving of a Fresnel lens ... 9
2. Parameters of an engraved structure of a Fresnel lens ..... 11
3. Visualisation of focusing properties of a Fresnel lens ..... 13



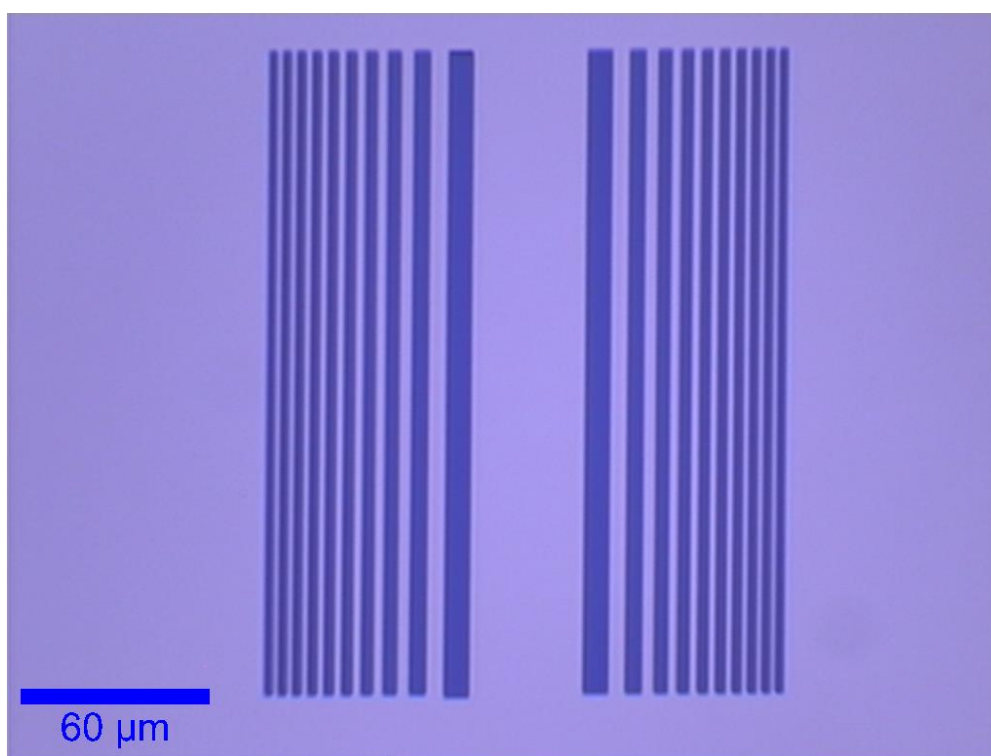
# Nanoszenie warstwy złota i grawerowanie soczewki Fresnela

Warstwę złota naniesiono metodą sputteringu w napylarce Quorum Technologies Q150T ze źródła Au o czystości 99,99% na podłożu kwarcowym (10 x 10 mm) umyтым wcześniej w alkoholu izopropylowym. Grawerowanie struktury Fresnela przeprowadzono zogniskowaną wiązką jonów (Focused Ion Beam - FIB) o energii 30 keV przy użyciu prądu 120 pA w urządzeniu Auriga Crossbeam Carl Zeiss. Intencją było wycięcie wgłębień przez całą warstwę złota aż do odsłonięcia kwarcu. Długość wyłobień odpowiadała maksymalnej dostępnej wielkości w w/w urządzeniu, tj. 200 mikrometrów.



Rys. 1. Obraz SEM próbki kwarcu z nałożoną warstwą złota i z wygrawerowaną w niej strukturą soczewki Fresnela

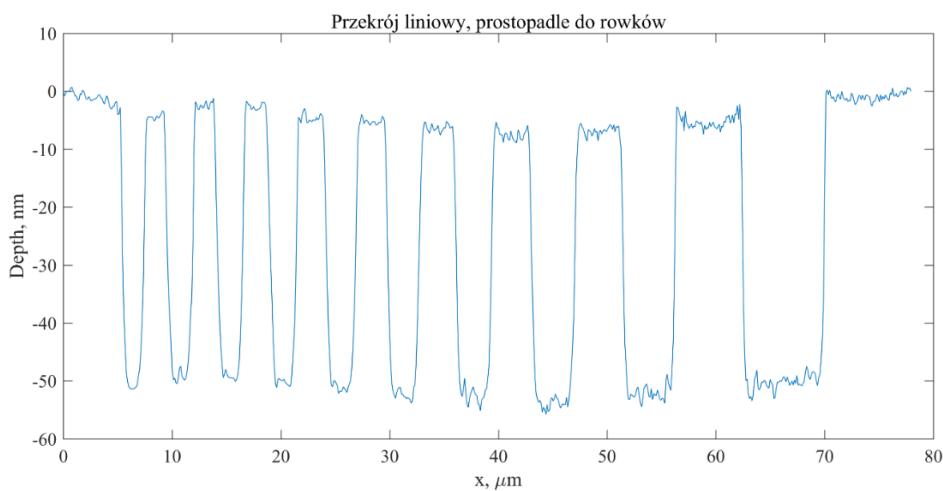
## Parametry wygrawerowanej struktury soczewki Fresnela



Rys.2. Obrazowanie (AFM AC) wygrawerowanej struktury soczewki Fresnela (FZP). Warstwa złota o grubości 50 nm na płytce kwarcu o grubości 500 μm; zdjęcie powierzchni, tryb confocal, obiektyw 20x.



Rys. 3. Skan AFM AC – topografia fragmentu lewej części wzoru.



Rys. 4. Przekrój liniowy wygrawerowanej struktury.

Wzór jest bardzo regularny, o głębokości około 50 nm. Z porównania zaprojektowanych i zmierzonych wartości szerokości wytrawionych stref wynika, że szerokości stref różnią się od zaprojektowanych tylko o kilka procent.

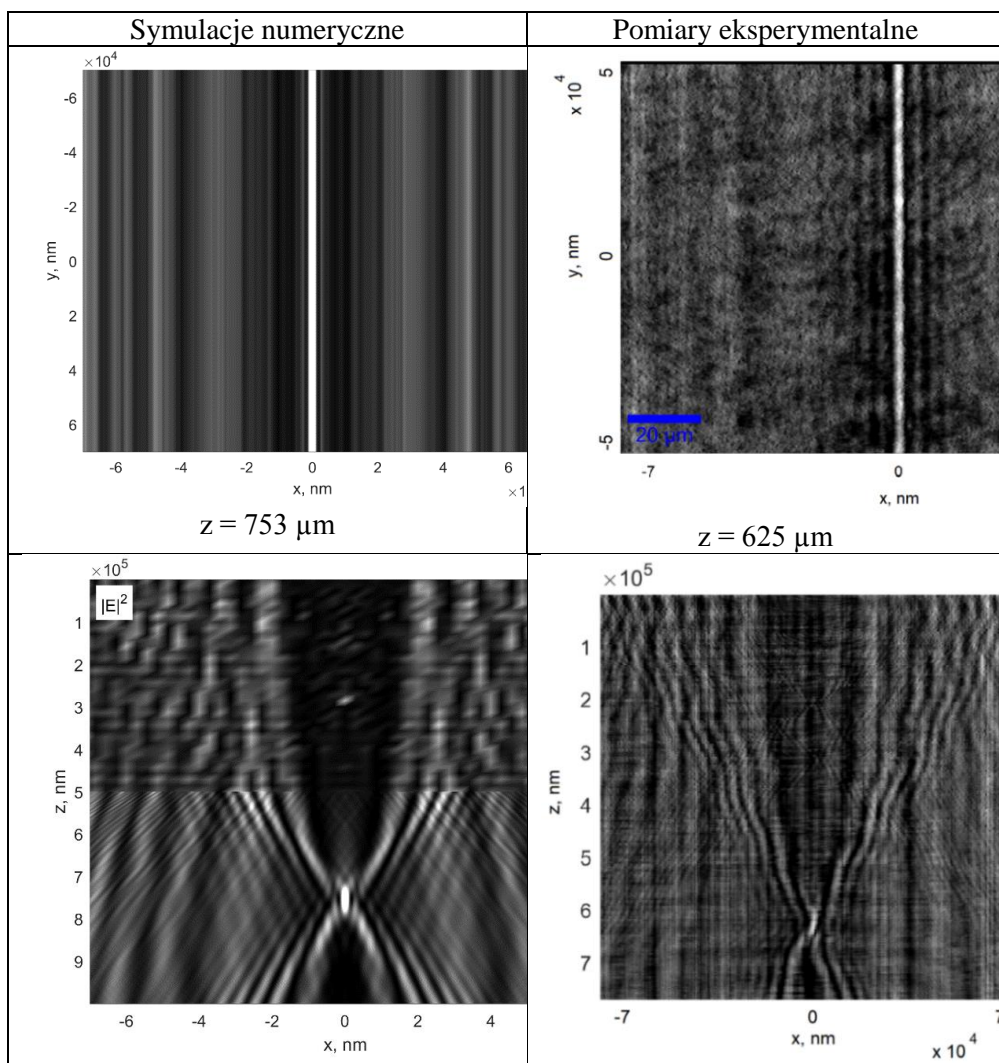
## Obrazowanie właściwości ogniskowania soczewki Fresnela

Struktura ogniskująca składa się z warstwy złota o grubości 50 nm na kwarcu o grubości 500  $\mu\text{m}$ . W złocie wygrawerowana jest jednowymiarowa (1D), periodyczna w kierunku  $x$  soczewka Fresnela o ogniskowej 600  $\mu\text{m}$  (dla długości fali  $\lambda = 532$  nm) i długości 200  $\mu\text{m}$  w kierunku  $y$ . Soczewka ma 10 stref, w wyniku czego jej szerokość wynosi ok. 160  $\mu\text{m}$ .

Symulacje numeryczne: Jednowymiarowa, periodyczna (w kier.  $x$ ) struktura analizowana metodą RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis), z PML (Perfectly Matched Layers) na krawędziach komórki obliczeniowej w kierunku  $x$ . Okres w kier.  $x$  wynosi 350  $\mu\text{m}$ , liczba rzędów ugięcia w kier.  $x$  wynosi 1361, w kier.  $y$  struktura jest przyjęta jako nieskończona. Liczba rzędów propagujących się w kierunku  $x$ : 1315 (czyli  $-651, \dots, 0, \dots, +651$ ), pozostałe 46 rzędów jest zanikające. W obliczeniach przyjęta została wartość przenikalności elektrycznej dla złota wynosząca  $-4.6532 + 2.3471i$  dla  $\lambda = 532$  nm oraz  $-11.8080 + 1.1601i$  dla  $\lambda = 633$  nm (B. Johnson and R. W. Christy, Phys. Rev. B **6**, 4370, 1972). Dla kwarcu jej wartość jest stała i wynosi 2.1336. Struktura oświetlona została falą płaską o liniowej polaryzacji i długości fali 532 nm padającą normalnie. Siatka obliczeniowa poniżej warstwy kwarcu na wykresie w przekroju  $xz$  jest gęstsza niż w warstwie kwarcu. Otrzymane numerycznie ognisko ma długość około 50  $\mu\text{m}$  i szerokość około 1.6  $\mu\text{m}$ .

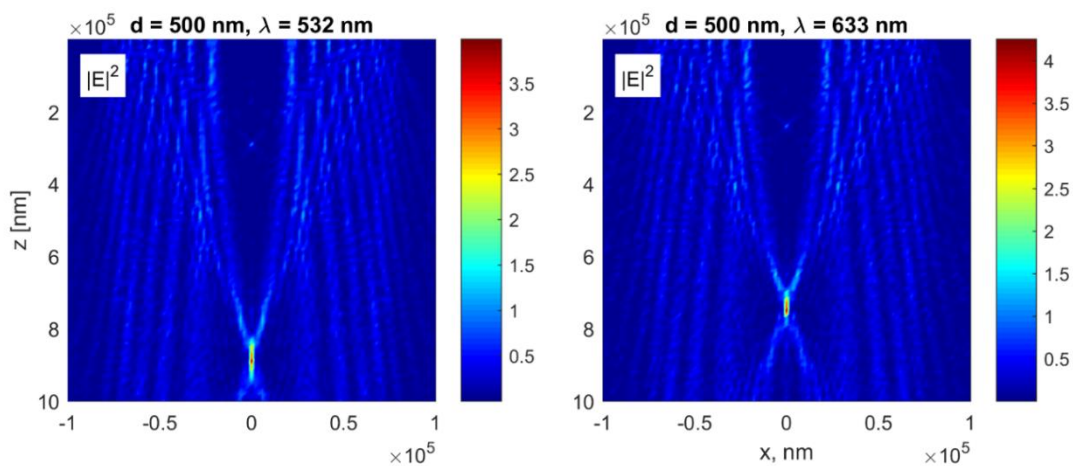
Eksperyment: Struktura FZP soczewki oświetlona została szeroką wiązką Gaussa padającą normalnie, o liniowej polaryzacji i długości fali 532 nm. Pole zostało zmierzone za pomocą mikroskopu konfokalnego (alpha300

S, WITec GmbH, Ulm, Germany) w płaszczyznach  $xy$  położonych co  $5 \mu\text{m}$  w kierunku  $z$ , a następnie złożone w wykres przedstawiający ogniskowanie w płaszczyźnie  $xz$ . Otrzymane eksperymentalnie ognisko ma długość około  $40 \mu\text{m}$  i szerokość około  $1.85 \mu\text{m}$ .



Rys. 5. Obrazowanie ogniskowania pola optycznego; lewa strona – symulacje numeryczne pola, ognisko ma długość  $50 \mu\text{m}$  i szerokość ok.  $1.6 \mu\text{m}$ ; prawa strona – pomiar eksperymentalny, ognisko ma długość ok.  $40 \mu\text{m}$  i szerokość ok.  $1.85 \mu\text{m}$ . Padanie normalne, polaryzacja liniowa.

Symulacje numeryczne (wykonane za pomocą metody RCWA) ogniskowania fali płaskiej przez (tę samą w obu przypadkach) soczewkę Fresnela o ogniskowej  $600\ \mu\text{m}$  (obliczonej dla  $\lambda = 532\ \text{nm}$ ) wygrawerowanej w warstwie złota o grubości  $d = 500\ \text{nm}$ . W odróżnieniu od przypadku przedstawionego na Rys. 5, tutaj warstwa złota jest dziesięciokrotnie grubsza i brak jest podłoża kwarcowego. Soczewka została oświetlona falą płaską o liniowej polaryzacji i długości fali  $532\ \text{nm}$  (lewa strona) oraz  $633\ \text{nm}$  (prawa strona) padającą normalnie. Widoczna jest wysoka transmisja przez szczeliny w metalu (grubość złota nie pozwala na bezpośrednią transmisję przez metal) w dwóch kierunkach – do osi, co skutkuje ogniskowaniem, oraz na zewnątrz, ze względu na swobodną transmisję przez szczeliny w warstwie złota szersze niż długość fali.



Rys. 6. Symulacje numeryczne: obrazowanie ogniskowania pola optycznego w przypadku soczewki Fresnela o ogniskowej  $600\ \mu\text{m}$  dla długości fali  $532\ \text{nm}$ , wykonanej ze złota o grubości  $d = 500\ \text{nm}$  dla padającej normalnie fali płaskiej o liniowej polaryzacji; lewa strona – fala płaska o długości  $532\ \text{nm}$ , prawa strona – fala płaska o długości  $633\ \text{nm}$ .

W załączeniu lista publikacji obejmujących powyższy zakres badań.

## Bibliografia

1. J. M. Pitarke, V. M. Silkin, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, *Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons*, Reports on Progress in Physics 70, 1 (2007)
2. P. Johnson, R. Christy, *Optical constants of noble metals*, Physical Review B 6, 4370 (1972)
3. K. Kolwas, A. Derkachova, *Impact of the Interband Transitions in Gold and Silver on the Dynamics of Propagating and Localized Surface Plasmons*, Nanomaterials 10, 1411 (2020)
4. A. Roszkiewicz, A. Jain, M. Teodorczyk, W. Nasalski, *Formation and characterization of hole nanopattern on photoresist layer by scanning near-field optical microscope*, Nanomaterials 9, 1452 (2019)
5. H. Wang, Y. Deng, J. He, P. Gao, N. Yao, C. Wang, Z. Zhao, J. Wang, B. Jiang, X. Luo, *Subwavelength light focusing of plasmonic lens with dielectric filled nanoslits structures*, Journal of Nanophotonics 8, 083079 (2014)
6. S. S. Stafeev, V. V. Kotlyar, L. O'Faolain, *Subwavelength focusing of laser light by microoptics*, Journal of Modern Optics 60, 1050 (2013)
7. G. Vitrant, S. Zaiba, B. Y. Vineeth, T. Kouriba, O. Ziane, O. Stéphan, J. Bosson, P. L. Baldeck, *Obstructive micro diffracting structures as an alternative to plasmonics nano slits for making efficient microlenses*, Optics Express 20, 26542 (2012)
8. R. G. Mote, S. F. Yu, A. Kumar, W. Zhou, X. F. Li, *Experimental demonstration of near-field focusing of a phase micro-Fresnel zone plate (FZP) under linearly polarized illumination*, Applied Physics B 102, 95 (2011)
9. T. Wang, X. Wang, C. Kuang, X. Hao, X. Liu, *Experimental verification of the far-field subwavelength focusing with multiple concentric nanorings*, Applied Physics Letters 97, 231105 (2010)
10. Y. Fu, W. Zhou, *Hybrid Au-Ag subwavelength metallic structures with variant periods for superfocusing*, Journal of Nanophotonics 3, 033504 (2009)
11. Y. Fu, W. Zhou, L. E. N. Lim, C. L. Du, X. G. Luo, *Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime*, Applied Physics Letters 91, 061124 (2007)