

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Jaroszewicz
Centralna Izba Pomiarów Telekomunikacyjnych (Z-12)
Instytut Łączności
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Warszawa, dnia 07 kwietnia 2021 roku

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Komorowskiego p.t. „Multipleksacja promieniowania THz z wykorzystaniem nie-poosiowych optycznych struktur dyfrakcyjnych”

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Pawła Komorowskiego p.t. "Multipleksacja promieniowania THz z wykorzystaniem nie-poosiowych optycznych struktur dyfrakcyjnych", jak to jej tytuł już na to wskazuje, stawia problem zaprojektowania i wytworzenia dyfrakcyjnych elementów optycznych, które działając w terahercowym obszarze widma (tj. w zakresie od 0.1 THz do 10 THz, co przekłada się na długości fali od 3 mm do 30 μ m) będą w stanie dokonać podziału wiązki promieniowania pomiędzy różne kanały transmisyjne.

Zgodnie ze słowami autora główną tezą rozprawy było wykazanie, „że możliwe jest wykonanie układu multipleksującego sygnał terahercowy w oparciu o wykorzystanie zoptymalizowanych dyfrakcyjnych elementów optycznych działających nie-poosiowo.”

Ta główna teza została poddana uszczegółowieniu, w wyniku czego ostatecznie autor postawił następujące tezy rozprawy:

„1. Separacja sygnałów terahercowych pochodzących z pojedynczego kanału transmisyjnego może zostać zrealizowana za pomocą optycznych struktur dyfrakcyjnych i pozwala na zwielenokrotnienie pojemności informacyjnej tego kanału. Sygnały propagujące się tym samym torem optycznym mogą zostać rozdzielone ze względu na separację z podziałem częstotliwości lub separację z podziałem czasu.

2. Iteracyjne algorytmy optymalizacji struktur dyfrakcyjnych umożliwiają otrzymanie dobrej jakości plamek ogniskowych zlokalizowanych nie-poosiowo. Dodatkowo, algorytmy iteracyjne umożliwiają asymetryczne przekierowanie promieniowania względem osi optycznej.

3. Zastosowanie sieci neuronowych do optymalizacji rozkładu fazy struktur dyfrakcyjnych pozwala na poprawę parametrów geometrycznych plamek ogniskowych, redukcję poziomu szumów w płaszczyźnie ogniskowej oraz minimalizację pasożytniczych (niepożądanych) efektów dyfrakcyjnych, pozwalając jednocześnie na znalezienie rozkładów fazowych, realizujących zadany cel, niemożliwych do uzyskania klasycznymi metodami.”

Rozprawa liczy 129 stron, zawiera wiele rysunków, co korzystnie wpływa na jej przejrzystość i gromadzi 173 pozycje bibliograficzne. Na pracę składa się 7 rozdziałów, spis cytowanych pozycji bibliograficznych oraz streszczenie.

W pierwszych dwóch rozdziałach zostają przedstawione wstęp i motywacja rozprawy oraz wspomniane już wyżej cel i tezy rozprawy.

Trzeci rozdział zawiera wprowadzenie teoretyczne, w którym zostają omówione podstawowe własności promieniowania terahercowego oraz sposoby jego generacji i detekcji. Ponadto omówiono kwestię transmisji danych w zakresie terahercowym, w tym konieczność wprowadzenia rozwiązań pozwalających na zwiększenie przepływności danych, gdzie jedno z możliwych rozwiązań stanowi multipleksacja/zwielokrotnienie, czyli przesłanie jednym torem komunikacyjnym dwóch lub więcej niezależnych kanałów transmisji. W rozdziale przyjęto nieprzyosiowe równanie transmitancji soczewki dyfrakcyjnej jako punkt wyjścia do dalszych prac nad optymalizowanymi strukturami dyfrakcyjnymi oraz sposób symulacji propagacji światła oparty na metodzie splotowej.

Tematem czwartego rozdziału jest modelowanie i optymalizacja struktur dyfrakcyjnych zaprojektowanych dla zakresu promieniowania terahercowego i przedstawienie iteracyjnego algorytmu optymalizacyjnego. W dalszej kolejności został wprowadzony algorytm optymalizacji oparty na sieci neuronowej, co pozwala na osiągnięcie większej jakości działania elementu – stosunek sygnału do szumu okazuje się znacząco lepszy niż w przypadku innych rozwiązań i stanowi oryginalny wkład autora. Rozdział kończy się omówieniem zastosowanych metod produkcji dyfrakcyjnych elementów optycznych dla terahercowego zakresu widma i wprowadzeniem koncepcji elementów harmoniczych, tj. o skoku fazy na granicy strefy wynoszącym $2m\pi$ rad.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki eksperymentalne otrzymane przy pomocy zaprojektowanych dyfrakcyjnych elementów optycznych. Jako jeden z elementów realizujący multipleksację zaproponowano iloczyn transmitancji soczewki dyfrakcyjnej i binarnej siatki fazowej o dobranej wysokości stopnia fazowego. Rozdział zawiera też podstawowy z punktu widzenia tezy rozprawy eksperyment, to jest wprowadzenie dwóch kanałów transmisji do pojedynczego toru wykonany za pomocą zaprojektowanych elementów dyfrakcyjnych.

Szósty rozdział zawiera dyskusję problemów eksperymentalnych, takich jak właściwa orientacja detektorów promieniowania wymuszona ich ograniczonym kątem akceptacji i pokazuje na skalę trudności eksperymentalnych, z którymi musiał zmierzyć się autor.

Rozprawa kończy się podsumowaniem, które zawiera omówienie zawartości całokształtu dysertacji, wskazuje na możliwości zastosowań analizowanych w niej struktur oraz pokrótce omawia możliwości dalszych badań.

Nie mam uwag dotyczących układu pracy, bądź też sposobu potraktowania tematu. Sam problem postawiony w rozprawie został rozwiązany pomyślnie. Co więcej, na uwagę zasługuje fakt, że autor przedstawił nowe podejście do projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych oparte na sieci neuronowej. Na podkreślenie i uznanie zasługują opisy licznych procedur doświadczalnych i szeroki zakres prac eksperymentalnych, które były konieczne dla pomyślniej realizacji rozprawy. Do poważnych problemów eksperymentalnych, z którymi musiał zmierzyć się autor, należy zaliczyć np. dużą podatność sygnału na pasożytnicze interferencje albo ograniczony kąt odbioru detektorów promieniowania terahercowego. Sam problem podjęty w rozprawie uważam za ważny i mający istotne znaczenie zarówno teoretyczne, jak i praktyczne. To pierwsze, gdyż w pracy został podjęty problem projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych w zakresie

pasma terahercowego. Znaczenie praktyczne polega natomiast na opracowaniu nowych technik eksperymentalnych wytwarzania struktur będących przedmiotem rozprawy oraz ich metod pomiarowych, jak również ich potencjalne znaczenie dla telekomunikacji w zakresie terahercowym.

W mojej opinii tezy pracy zostały dowiedzione. Gdybym w tym miejscu mógł skończyć pisanie opinii, to bez wahania wystąpiłbym o wyróżnienie dla rozprawy. Tym niemniej sposób ujęcia i potraktowania problemu nie wydaje mi się pełny i czuję się zmuszony poczynić kilka uwag.

W pierwszej kolejności chciałbym odnieść się do sposobu przedstawienia algorytmów propagacji pola świetlnego. Metoda polegająca na rozkładzie na kątowe widmo fal płaskich ma już pewną przeszłość, która nie znalazła należytego odbicia w wyborze pozycji wspomnianych w spisie cytowanej literatury. Należy tu wspomnieć przede wszystkim cały szereg prac prof. M. Sypka [1-3], który jest jednym z jej twórców. Wprawdzie w tekście rozprawy jest krótka wzmianka na ten temat, ale tym bardziej dziwi brak jakichkolwiek odniesień bibliograficznych, zwłaszcza że co do istoty jest to dokładnie ta sama metoda, co użyta przez autora. Wydaje się to być niezgodne (delikatnie mówiąc) z dobrymi obyczajami akademickimi i zarzut ten kierowałbym raczej nie pod adresem autora, lecz promotora pomocniczego. Co więcej, metoda ta jest rozwijana także przez inne ośrodki, że ograniczę się jedynie do polskich autorów i wymienię tu chociażby prace prof. T. Kozackiego i jego zespołu [4-6].

Kolejną kwestię stanowi szereg przyjętych arbitralnych założeń, bez próby dyskusji prawomocności ich przyjęcia.

Pierwsze z nich stanowi przybliżenie cienkiej transmitancji bezkrytycznie przyjęte w trzecim rozdziale, zgodnie z którym pole za elementem jest prostym iloczynem pola padającego na element i jego transmitancji. Brak bardziej realistycznego opisu uwzględniającego zarówno skończoną grubość elementu, jak i wynikające na skutek tego poprzeczne przesunięcie promienia w kierunku nachylenia powierzchni załamującej wymagałby jednak uzasadnienia. Problem granicy stosowalności pojęcia cienkiej transmitancji, gdzie zakłada się nagłą zmianę fazy na granicy analizowanego elementu traktowanego jako nieskończenie cienki był już podnoszony w literaturze przedmiotu i stał się tematem co najmniej kilku znaczących prac, pomiędzy którymi można wymienić chociażby następujące pozycje [7-9]. Problem ten tym bardziej można uznać za istniejący ze względu na propozycję użycia elementów harmonicznych o wysokości przejść fazowych pomiędzy strefami wynoszącymi $m2\pi$, w którym to przypadku jeszcze trudniej jest mówić o cienkiej transmitancji.

Następny problem stanowi element zaproponowany w rozdziale 5, tj. złożenie transmitancji soczewki dyfrakcyjnej i binarnej siatki fazowej w celu powielenia jej ognisk. Takie podejście dalece nie wyczerpuje problemu i stanowi najprostsze z możliwych rozwiązań. Sam problem ma dosyć obszerną bibliografię, która nie znalazła odbicia w treści rozprawy [10-17], a propozycja np. optymalnego triplikatora [12] wydaje się że mogłaby stanowić co najmniej porównywalny, o ile nie lepszy, punkt wyjścia do zaprojektowania elementu wieloogniskowego.

Z kolei użyta metoda symulacji niejako z góry zakłada przyjęty opis dyfrakcji światła i musi to być skalarna teoria dyfrakcji w ujęciu nieprzyosiowym. Zdaję sobie sprawę, że próba opisu na bardziej szczegółowym poziomie uwzględniającym wektorową teorię dyfrakcji wykluczyłaby podejście splotowe, co sprawia, że autor jest niejako skazany na

ten rodzaj opisu. Tym niemniej chociaż krótki komentarz nt. jego dopuszczalności byłyby wskazany, zwłaszcza, że rozmiary charakterystyczne elementów są porównywalne z pojedynczymi długościami fali i brak użycia wektorowej teorii dyfrakcji, chociażby dla potwierdzenia otrzymanych wyników powinien znaleźć uzasadnienie. Powstrzymam się od cytowania wielu pozycji i w charakterze przykładu wymienię tylko tę jedną [18].

Dodatkowy problem stanowi ocena wydajności dyfrakcyjnej elementów, gdzie wszystkie obliczenia oparte są na skalarnej teorii dyfrakcji. Wydaje się że rzeczywista wydajność dyfrakcyjna będzie jednak odbiegała od postulowanej i że należałoby przy jej omawianiu uwzględnić chociażby heurystyczne podejście tzw. „efekt cienia” i porównanie z dokładnymi wynikami opartymi na wektorowej teorii dyfrakcji, a jeśli nie, to podać powód, dla którego nie jest konieczne wzięcie tej kwestii pod uwagę [19-21].

Na koniec jeszcze trzy uwagi i pytania:

- w czwartym rozdziale na str 36 zawarta jest opinia, że proponowany algorytm „przypomina algorytm Gerchberga-Saxtona”. Przypomina, czy co do zasady jest identyczny?
- Czy zamiast przyjęcia oznaczenia „kołowości” wiązki dla oceny jej symetrii obrotowej, które raczej nie jest spotykane w literaturze optycznej nie byłoby bardziej właściwe odniesienie się do astygmatyzmu pojawiającego się w pozaosiowo ugiętych wiązkach?
- Czy funkcja fazowa kinoformów harmonicznych powstaje jako wynik działania funkcji modulo $2m\pi$ nad funkcją fazową nieprzyosiowej soczewki zawartą w r. niu 6?

Autor w swoim dorobku posiada już siedem prac opublikowanych w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej:

1. K. Anders, A. Jusza, P. Komorowski, P. Andrejuk, R. Piramidowicz, "Short wavelength up-converted emission studies in Er³⁺ and Yb³⁺ doped ZBLAN glasses," J. Lumin. **201**, 427-433 (2018).
2. P. Komorowski, K. Anders, U. Zdulska, R. Piramidowicz, "Erbium doped ZBLAN fiber laser operating in the visible - feasibility study," Phot. Lett. Pol., **9**, 85-87, (2017).
3. M. Surma, P. Komorowski, M. Neneman, A. Siemion, "Chocolate Terahertz Fresnel Lens," Phot. Lett. Pol., **12**, 103-105, (2020).
4. A. Siemion, P. Komorowski, M. Surma, I. Ducin, P. Sobotka, M. Walczakowski, and E. Czerwińska, "Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup," Opt. Express **28**, 715-723 (2020).
5. P. Komorowski, P. Czerwińska, M. Surma, P. Zagrajek, R. Piramidowicz, and A. Siemion, "Three-focal-spot terahertz diffractive optical element-iterative design and neural network approach," Opt. Express **29**, 11243-11253 (2021).
6. P. Komorowski, M. Surma, M. Walczakowski, P. Zagrajek, A. Siemion, "Off-Axis Diffractive Optics for Compact Terahertz Detection Setup," Appl. Sci. **10**, 8594 (2020).
7. P. Komorowski, P. Czerwińska, M. Surma, P. Zagrajek, R. Piramidowicz, and A. Siemion, "Three-focal-spot terahertz diffractive optical element-iterative design and neural network approach," Opt. Express **29**, 11243-11253 (2021).

Ponadto na dorobek publikacyjny autora składa się jeszcze publikacja zawarta w tomie materiałów konferencyjnych, który również jest uwzględniany na stronie Web of Knowledge.

8. A. Jusza, P. Komorowski, J. Olas, K. Anders, and R. Piramidowicz, "UV Luminescence in Ho:ZBLAN Glasses," in 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper ce_p_26.

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Ilość cytowań prac p. mgr inż. Pawła Komorowskiego wg bazy Web of Knowledge wynosi 8, w tym cytowań innych autorów 6, a indeks Hirscha jest równy 2. Najwyżej cytowana z prac, tj. Krzysztof Anders, Anna Jusza, Paweł Komorowski, Paweł Andrejuk, Ryszard Piramidowicz, „Short wavelength up-converted emission studies in Er³⁺ and Yb³⁺ doped ZBLAN glasses”, J. Lumin. **201**, 427-433 (2018) zebrała już 4 cytowania i to pomimo tego, że została opublikowana stosunkowo niedawno, bo w 2018 roku.

Scopus zawiera 10 publikacji autora z 12 cytowaniami zawartymi w 9 cytujących publikacjach, z wartością indeksu Hirscha również h=2.

Z kolei ogólnodostępna baza Scholar Google podaje liczbę wszystkich cytowań równą 11, a indeks Hirscha także równy 2.

Wspomniana poprzednio najwyżej cytowana praca jest wymieniana tu 5 razy, tyle samo co druga praca autora: A. Siemion, P. Komorowski, M. Surma, I. Ducin, P. Sobotka, M. Walczakowski, and E. Czerwińska, "Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup," Opt. Express **28**, 715-723 (2020).

Jak widać z powyższego, dorobek publikacyjny doktoranta jest bogaty i różnorodny. W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska p. mgr inż. Pawła Komorowskiego p.t. "Multipleksacja promieniowania THz z wykorzystaniem nie-poosiowych optycznych struktur dyfrakcyjnych" zawiera rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego i tym samym spełnia wymogi ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2014 r. poz. 1852, z 2015 r. poz. 249.) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Bibliografia:

1. M. Sypek, "Light propagation in the Fresnel region. New numerical approach," Opt. Commun. **116**, 43-48 (1995).
2. M. Sypek, C. Prokopowicz, and M. Gorecki, "Image multiplying and high-frequency oscillations effects in the Fresnel region light propagation simulation," Opt. Eng. **42**, 3158-3164 (2003).
3. M. Sypek, "Modelowanie zjawiska skalarnej propagacji światła w optyce dyfrakcyjnej", Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa (2008).
4. Tomasz Kozacki, Konstantinos Falaggis, and Malgorzata Kujawinska, "Computation of diffracted fields for the case of high numerical aperture using the angular spectrum method," Appl. Opt. **51**, 7080-7088 (2012).
5. Tomasz Kozacki and Konstantinos Falaggis, "Angular spectrum-based wave-propagation method with compact space bandwidth for large propagation distances," Opt. Lett. **40**, 3420-3423 (2015).
6. Tomasz Kozacki and Konstantinos Falaggis, "Angular spectrum method with compact space-bandwidth: generalization and full-field accuracy," Appl. Opt. **55**, 5014-5024 (2016).
7. J. Sochacki, "Non-paraxial relations of equivalence between an arbitrary refracting surface of revolution and the phase transmittance function," Opt. Commun. **87**, (1992), 84-86.



8. S. Sinzinger and M. Testorf, "Transition between diffractive and refractive micro-optical components," *Appl. Opt.* **34**, 5970-5976 (1995).
9. M. Testorf, "On the zero-thickness model of diffractive optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A* **17**, 1132-1133 (2000).
10. P. J. Valle, J. E. Oti, V. F. Canales, and M. P. Cagigal, "Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses," *Opt. Express* **13**, 2782-2792 (2005).
11. F. Gori, M. Santarsiero, S. Vicalvi, R. Borghi, G. Cincotti, E. Di Fabrizio, and M. Gentili, "Analytical derivation of the optimum triplicator," *Opt. Commun.* **157**, 13-16 (1998).
12. Riccardo Borghi, Gabriella Cincotti, and Massimo Santarsiero, "Diffractive variable beam splitter: optimal design," *J. Opt. Soc. Am. A* **17**, 63-67 (2000).
13. J. Otón, M. S. Millán, E. Pérez-Cabré, "Diseño de lentes programables en una pantalla pixelada de cristal líquido nemático," *Opt. Pura Apl.* **38**, 47-56 (2005).
14. C. Iemmi, J. Campos, J. C. Escalera, O. López-Coronado, R. Gimeno, and M. J. Yzuel, "Depth of focus increase by multiplexing programmable diffractive lenses," *Opt. Express* **14**, 10207-10219 (2006).
15. L. A. Romero, M. S. Millán, E. Pérez-Cabré "Lente programable multifocal: Combinación coaxial y multieje," *Opt. Pura Apl.* **43**, 101-112 (2010).
16. A. Márquez, C. Iemmi, J. Campos, and M. J. Yzuel, "Achromatic diffractive lens written onto a liquid crystal display," *Opt. Lett.* **31**, 392-394 (2006).
17. María S. Millán, Joaquín Otón, and Elisabet Pérez-Cabré, "Chromatic compensation of programmable Fresnel lenses," *Opt. Express* **14**, 6226-6242 (2006).
18. S. D. Mellin and G. P. Nordin, "Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design," *Opt. Express* **8**, 705-722 (2001).
19. G. J. Swanson, Tech. Rep. 914 Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1991.
20. Uriel Levy, Emanuel Marom, David Mendlovic, Thin element approximation for the analysis of blazed gratings: simplified model and validity limits, *Opt. Commun.* **229**, 11-21 (2004).
21. Oliver Sandfuchs, Robert Brunner, Daniel Pätz, Stefan Sinzinger, and Johannes Ruoff, "Rigorous analysis of shadowing effects in blazed transmission gratings," *Opt. Lett.* **31**, 3638-3640 (2006).

ul. Szachowa 1

04-894 Warszawa

tel.: [+48 22] 512 81 00

fax: [+48 22] 512 86 25

e-mail: info@il-pib.pl

www.il-pib.pl

Zbigniew Jaroszewicz