

Załącznik nr 3  
Autoreferat

Agnieszka Siemion

Warszawa, styczeń 2022

## 1 Imię i nazwisko.

Agnieszka Marta Siemion (z d. Fajst)

## 2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne.

- Stopień naukowy: doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki  
Rok uzyskania stopnia: 2012,  
Nazwa i typ instytucji: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki,  
Tytuł: *Jedno-eksperymentalna holografia cyfrowa oparta na zjawisku samoobrazowania*,  
2007 – 2012 – studia doktoranckie,
- Tytuł zawodowy: magister inżynier,  
Rok uzyskania tytułu: 2007,  
Nazwa i typ instytucji: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki,  
Tytuł: *Optyczno-cyfrowy układ holograficzny o niskiej częstotliwości nośnej*,  
2002 – 2007 – studia magisterskie.

## 3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- 2012 – teraz – adiunkt  
Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska,  
Prowadzenie badań naukowych w dziedzinie optyki, optyki dyfrakcyjnej, holografii, optyki THz, noktowizji, termowizji, prowadzenie zajęć dydaktycznych,  
Urlopy:  
2013 – urlop macierzyński (od 9.04.2013 roku do 26.08.2013 roku),  
2011 – urlop macierzyński (od 29.03.2011 roku do 29.08.2011 roku),
- 2014 – 2017 – doradca merytoryczny, zatrudnienie na podstawie umów cywilno-prawnych,  
Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, Polska,  
Konsultacje i weryfikacja treści publikacji pod względem merytorycznym, przetwarzanie danych, konsultowanie i projektowanie układów optycznych.

## 4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

### 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020 poz. 85 z późn. zm.) przedstawiam cykl powiązanych ze sobą tematycznie publikacji naukowych pod wspólnym tytułem:

## „Projektowanie i optymalizacja dyfrakcyjnych elementów optycznych dla zakresu promieniowania terahercowego”.

### 4.2 Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie (z czego wszystkie znajdują się na liście JCR) tworzących wskazane osiągnięcie naukowe obejmuje:

[H1] Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Michał Makowski, Jarosław Suszek, Jarosław Bomba, Adam Czerwiński, Frederic Garet, Jean-Louis Coutaz, Maciej Sypek. *Diffraction paper lens for terahertz optics*. Optics Letters, 37 (20):4320-4322, 2012.

<https://doi.org/10.1364/OL.37.004320>

IF 2012 = 3,385 (IF 2020 = 3,776), punkty ministerialne = 40 (obecnie 140)

Liczba cytowań: 46 (WoS), 52 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- stworzyłam hipotezę badawczą oraz koncepcję badań,
- opracowałam metodologię pomiarów, plan badań i projekt struktur dyfrakcyjnych,
- opisałam układ pomiarowy,
- przygotowałam część ilustracji do manuskryptu, recenzowałam i redagowałam tekst manuskryptu.

Praca H1 została opublikowana w tym samym roku, w którym nastąpiła obrona doktoratu. Należy jednak podkreślić, że sama obrona doktoratu opóźniła się ze względu na urlop macierzyński w trakcie doktoratu. Publiczna obrona odbyła się dnia 20 lutego 2012 roku, natomiast zgłoszenie artykułu H1 do publikacji – dnia 10 lipca 2012 roku. Biorąc pod uwagę fakt, że prace badawcze dotyczące doktoratu zostały skończone dużo przed obroną, a tematyka THz elementów dyfrakcyjnych jest całkowicie różna od tematyki poruszanej w doktoracie - holografii cyfrowej dla zakresu promieniowania widzialnego, pozwoliłam sobie na dołączenie tego artykułu do cyklu publikacji. Uważam, że stanowi on znaczny wkład w logiczną całość przedstawionego tutaj cyklu publikacji i bez tej pracy trudno by było ocenić dalej przedstawione w tym cyklu artykuły.

[H2] Agnieszka Siemion, Mateusz Surma, Paweł Komorowski, Przemysław Zagrajek, Michał Walczakowski, Aneta Melaniuk, Izabela Ducin, Piotr Sobotka, Elżbieta Czerwińska. *Paraffin diffractive lens for sub-terahertz range - simple and cost efficient solution*. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 11(4):396-401, 2021.

<https://doi:10.1109/TTHZ.2021.3063809>

IF = 2,539, punkty ministerialne = 100

Liczba cytowań: 0 – publikacja z 2021 roku

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- stworzyłam hipotezę badawczą oraz koncepcję badań,
- kierowałam projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- opracowałam metodologię badań, plan pomiarów, wstępny projekt i jego optymalizację,
- opisałam układ pomiarowy, zaprojektowałam układ eksperymentalny i zdefiniowałam jego końcową konfigurację,

- napisałam pierwszą wersję manuskryptu, recenzowałam go i redagowałam,
- zdobyłam finansowanie na prowadzone badania.

**[H3]** Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Jarosław Suszek, Adam Kowalczyk, Jarosław Bomba, Artur Sobczyk, Norbert Palka, Przemysław Zagrajek, Andrzej Kołodziejczyk, Maciej Sypek. *THz beam shaping based on paper diffractive optics*. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(4):568-575, 2016a.

<https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2575440>

IF (2016) = 2,940, IF = 3,510, punkty ministerialne = 35 (obecnie 100)

Liczba cytowań: 13 (WoS), 14 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- stworzyłam hipotezę badawczą oraz koncepcję badań,
- kierowałam projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- opracowałam metodologię badań, plan pomiarów, wstępny projekt i jego optymalizację,
- zaprojektowałam elementy dyfrakcyjne,
- opisałam układ pomiarowy, zaprojektowałam układ eksperymentalny i zdefiniowałam jego końcową konfigurację,
- wykonałam doświadczenia w zaprojektowanym układzie eksperymentalnym i zarejestrowałam dane doświadczalne,
- przygotowałam wykresy, analizę wyników i wizualizację danych,
- napisałam pierwszą wersję manuskryptu, recenzowałam go i redagowałam.

**[H4]** Agnieszka Siemion, Paweł Kostrowiecki-Łopata, Adam Pindur, Przemysław Zagrajek, Maciej Sypek. *Paper on designing costless THz paper optics*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016b.

<https://doi.org/10.1155/2016/9615698>

IF (2016) = 1,299, IF = 1,271, punkty ministerialne = 20 (obecnie 40)

Liczba cytowań: 5 (WoS), 6 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- stworzyłam hipotezę badawczą oraz koncepcję badań,
- opracowaniu metodologii badań,
- opracowałam metodologię badań, plan pomiarów, wstępny projekt i jego optymalizację,
- opisałam układ pomiarowy i zdefiniowałam jego końcową konfigurację,
- wykonałam analizę wyników,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- zaplanowałam, recenzowałam i redagowałam tekst manuskryptu.

**[H5]** Mateusz Surma, Izabela Ducin, Przemysław Zagrajek, Agnieszka Siemion. *Sub-terahertz computer generated hologram with two image planes*. Applied Sciences, 9(4):659, 2019.

<https://doi.org/10.1155/2016/9615698>

IF (2019) = 2,474, IF = 2,842, punkty ministerialne = 100

Liczba cytowań: 3 (WoS), 3 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- stworzyłam hipotezę badawczą oraz koncepcję badań,
- zdobyłam finansowanie na prowadzenie badań,
- opracowałam metodologię badań, plan pomiarów, wstępny projekt i jego optymalizację,
- kierowałam projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- opisałam układ pomiarowy, zaprojektowałam układ eksperymentalny i zdefiniowałam jego końcową konfigurację,
- napisałam pierwszą wersję manuskryptu, recenzowałam go i redagowałam.

**[H6]** Agnieszka Siemion, Paweł Komorowski, Mateusz Surma, Izabela Ducin, Piotr Sobotka, Michał Walczakowski, Elżbieta Czerwińska.

*Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup*. Optics Express, 28(1):715-723, 2020

<https://doi.org/10.1364/OE.382272>

IF = 3,669, punkty ministerialne = 140

Liczba cytowań: 4 (WoS), 5 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- kierowałam projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- stworzyłam hipotezę badawczą i koncepcję badań,
- opracowałam metodologię badań, plan badań i wstępny projekt,
- opisałam układ pomiarowy, zdefiniowałam końcową konfigurację układu optycznego,
- wykonałam projekt struktur, analizę wyników i optymalizację projektu,
- napisałam pierwszą wersję manuskryptu, recenzowałam go i redagowałam,
- zdobyłam finansowanie na prowadzone badania.

**[H7]** Paweł Komorowski, Mateusz Surma, Michał Walczakowski, Przemysław Zagrajek, Agnieszka Siemion.

*Off-axis diffractive optics for compact terahertz detection setup*. Applied Sciences, 10(23):8594, 2020.

<https://doi.org/10.3390/app10238594>

IF = 2,842, punkty ministerialne = 100

Liczba cytowań: 2 (WoS), 2 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- kierowałam projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- stworzyłam hipotezę badawczą i koncepcję badań,
- opracowałam metodologię badań, plan pomiarów, wstępny projekt i jego optymalizację,
- wykonałam projekt struktur, zdefiniowałam końcową konfigurację układu optycznego, wykonałam analizę wyników,
- zaplanowałam, recenzowałam i redagowałam tekst manuskryptu,
- zdobyłam finansowanie na prowadzone badania.

**[H8]** Paweł Komorowski, Patrycja Czerwińska, Mateusz Surma, Przemysław Zagrajek, Ryszard Piramidowicz, Agnieszka Siemion. *Three-focal-spot terahertz diffractive optical element - iterative design and*

*neural network approach*. Optics Express, 29(7):11243–11253, 2021

<https://doi.org/10.1364/OE.418059>

IF (2019) = 3,669, punkty ministerialne = 140

Liczba cytowań: 1 (WoS), 1 (Scopus)

Mój udział w przygotowaniu publikacji:

- byłam pomysłodawczynią przeprowadzonych badań,
- zdobyłam finansowanie na prowadzone badania,
- kierowałam projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy,
- nadzorowałam i koordynowałam prace badawcze,
- stworzyłam hipotezę badawczą i koncepcję badań,
- opracowałam metodologię badań, plan pomiarów i wstępny projekt,
- opisałam układ pomiarowy i zdefiniowałam jego końcową konfigurację,
- zaprojektowałam elementy dyfrakcyjne,
- udzielałam konsultacji merytorycznej, zaplanowałam, recenzowałam i redagowałam tekst manuskryptu.

[H9] Agnieszka Siemion.

*Terahertz diffractive optics — smart control over radiation*. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 40(5):477-499, 2019

<https://doi.org/10.1007/s10762-019-00581-5>

IF (2019) = 1,765, punkty ministerialne = 70

Liczba cytowań: 20 (WoS), 22 (Scopus)

[H10] Agnieszka Siemion.

*The magic of optics — an overview of recent advanced terahertz diffractive optical elements*. Sensors, 21(1):100, 2020.

<https://doi.org/10.3390/s21010100>

IF (2019) = 3,031, punkty ministerialne = 100

Liczba cytowań: 2 (WoS), 3 (Scopus)

Liczbowe zestawienie dorobku składającego się na osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 219 ust. 2 Ustawy przedstawiłam w Tabeli 1. Zestawienie uwzględnia: Impact Factor wyszczególnionych artykułów wg daty publikacji, punktację czasopism Ministerstwa Edukacji i Nauki oraz Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego wg daty publikacji oraz liczbę cytowań prezentowanych prac w wybranych bazach bibliograficznych (stan na dzień 3.01.2022 roku).

Prace H1 – H10 wymienione tutaj jako cykl publikacji powiązanych ze sobą tematycznie nie zostały wymienione powtórnie w spisie literatury na końcu autoreferatu.

### 4.3 Opis celu naukowego prac i osiągniętych wyników

Główną motywacją podjętych przeze mnie badań naukowych były następujące aspekty: zmniejszenie grubości elementu optycznego, możliwość tworzenia struktur o dużych średnicach i małych ogniskowych (małe wartości liczby przysłony  $f$  – *number*\*), możliwość wytwarzania wydajnych struktur (materiały mało-

---

\* $f$  – *number* - wartość charakteryzująca soczewki lub obiektywy określona jako stosunek ich długości ogniskowej do średnicy apertury

Tabela 1: Liczbowe zestawienie publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

Praca	IF	Pkt ministerialne	Cytowania WoS	Cytowania Scopus
H1 (2012)	3,385	40 (obecnie 140)	46	52
H2 (2021)	2,539	100	0	0
H3 (2016)	2,940	35 (obecnie 100)	13	14
H4 (2016)	1,299	20 (obecnie 40)	5	6
H5 (2019)	2,474	100	3	3
H6 (2020)	3,669	140	4	5
H7 (2020)	2,842	100	2	2
H8 (2021)	3,669	140	1	1
H9 (2019)	1,765	70	20	22
H10 (2020)	3.031	100	2	3
Razem	27,613	845 (obecnie 1030)	96	108

stratne w używanym paśmie promieniowania THz), możliwość przekierowywania i formowania wiązek terahercowych. Osiągnięcia w tym zakresie zostały zaprezentowane w przedstawionym cyklu publikacji, zatytułowanym:

### **„Projektowanie i optymalizacja dyfrakcyjnych elementów optycznych dla zakresu promieniowania terahercowego”.**

Omówienie uzyskanych przeze mnie wyników przedstawię opisując wszystkie prace naukowe powiązane w cykl publikacji, które można podzielić na następujące zagadnienia:

- wprowadzenie dotyczące historii i projektowania terahercowych dyfrakcyjnych elementów optycznych (również na podstawie H9 i H10),
- użycie różnych materiałów i metod wytwarzania – H1 i H2,
- kształtowanie wiązek terahercowych – H3 i H4 i H5,
- przekierowywanie promieniowania terahercowego – H6, H7, H8,
- iteracyjne metody optymalizacji – oparte na wykorzystaniu hologramów – H5, H6, H7, H8 oraz oparte na sieciach neuronowych – H8.

Chciałam również zwrócić uwagę na pracę pt. „Off-axis metallic diffractive lens for terahertz beams” (Optics Letters, 2011) [1], której jestem pierwszym autorem. Praca ta została opublikowana rok przed obroną doktoratu, jednak jest ściśle powiązana z badaniami prowadzonymi po doktoracie. Tematyka tej publikacji związana jest z dyfrakcyjnymi elementami optycznymi dla promieniowania THz w konfiguracji przekierowującej wiązkę. Uważam, że praca ta jest ważna i istotna jako uzupełnienie cyklu publikacji, dlatego zdecydowałam się na dołączenie informacji o niej. Ze względów formalnych praca nie mogła zostać włączona do zestawu prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

W swoich pracach dotyczących elementów optycznych (w większości przypadków są to elementy dielektryczne pracujące w transmisji) zajmuję się głównie promieniowaniem quasi-monochromatycznym. Dla pasma promieniowania terahercowego występują źródła o bardzo wysokiej koherencji czasowej, z którymi często mam do czynienia w pracach eksperymentalnych. Zwykle są one spolaryzowane liniowo i powodują bardzo wiele niepożądanych interferencji w układach. Z drugiej strony wszelkie pomiary materiałowe



realizowane są za pomocą terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu, która stanowi źródło promieniowania polichromatycznego i umożliwia wyznaczanie pewnych wielkości fizycznych charakteryzujących badane materiały, takich jak np. zespolona przenikalność elektryczna.

Warto podkreślić, że praca H1 oraz praca [1] – zostały wykonane we współpracy z naukowcami z Uniwersytetu Sabaudzkiego w Chambéry (byłam tam dwukrotnie na pobycie naukowym w ramach stypendiów wyjazdowych – 3-miesięcznego w roku 2010 oraz 1-miesięcznego w roku 2014). Prace H2, H3, H4, H5, H6, H7 i H8 wykonane były we współpracy z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. W tym prace H8, H7, H6 i H2 również we współpracy z Instytutem Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej. Natomiast prace H9 i H10 są zaproszonymi przez edytorów artykułami przeglądowymi (Invited Review i Review – Feature paper). Byłam również zaproszona jako „Invited speaker” na konferencję SPIE Optics + Photonics 2020 w San Diego (ze względu na sytuację pandemiczną na świecie konferencja została przeprowadzona zdalnie).

Praca H5, w której jestem ostatnim autorem, zawiera wyniki otrzymane w ramach realizacji pracy magisterskiej mojego dyplomanta mgr. Mateusza Surmy. Natomiast prace H7 i H8 – stanowią fragment zagadnień opisanych w już obronionej z wyróżnieniem rozprawie doktorskiej dr. Pawła Komorowskiego, którego byłam promotorem pomocniczym. Prace H7 i H8 są kontynuacją i rozwinięciem badań opisanych w pracy H6, która jest wynikiem realizacji kierowanego przeze mnie projektu Lider IX, w którym dr P. Komorowski jest wykonawcą.

Prace przedstawione w publikacjach H2, H6, H7, H8 oraz H10 współfinansowano z kierowanego przeze mnie projektu LIDER IX numer LIDER/11/0036/L-9/17/NCBR/2018 pt. „Terahercowe wielozadaniowe dyfrakcyjne urządzenie poprawiające obrazowanie nowotworów skóry” o wartości 1 198 375 PLN przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Dodatkowo, badania opisane w publikacjach H7 i H8 stały się inspiracją do napisania i złożenia wniosku do Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu OPUS 18. Projekt pt. „Optyczny terahercowy układ typu MIMO - algorytmy generacji i badanie funkcjonowania kompaktowych struktur dyfrakcyjnych i hybrydowych” o wartości 1 697 160 PLN został zakwalifikowany do finansowania (numer UMO-2019/35/B/ST7/03909). Obecnie jest on realizowany w konsorcjum z Wojskową Akademią Techniczną, Instytutem Optoelektroniki. Natomiast prace dotyczące fantomu tkanek zdrowych i zmienionych nowotworowo w zakresie promieniowania THz (układ opisany w H6) wykorzystane zostały w pomysł wykorzystującym filtrację przestrzenną do ich obrazowania. Ten nowatorski pomysł został opisany i przyznane zostało finansowanie w ramach projektu FOTECH-1 pt. „Wykorzystanie właściwości spolaryzowanego oświetlenia i metody pola jasnego i pola ciemnego do terahercowego obrazowania fantomu tkanek zdrowych i zmienionych nowotworowo” o wartości 149 730 PLN, Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (ID-UB). We wszystkich trzech grantach (LIDER IX, OPUS 18 i FOTECH-1) jestem kierownikiem.

Warto podkreślić, że prowadzone przeze mnie prace naukowe były realizowane nie tylko we współpracy z opisanymi już Uniwersytetem Sabaudzkim w Chambéry oraz z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ale również z Laboratorium Charlesa Coulomba na Uniwersytecie w Montpellier [2–7], RWTH na Uniwersytecie w Aachen [8], z dawnym Instytutem Optyki Stosowanej im. Maksymiliana Pluty w Warszawie, z Department of Cardiology-University Medical Center Hamburg-Eppendorf w Hamburgu, czy z Instytutem Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN (prace dyplomowe).

Mój rozwój naukowy niewątpliwie wzbogaciły stypendia i wizyty zagraniczne: w Chambéry, w Montpellier, w Aachen, w Wilnie oraz staż w Warszawie w ramach projektu Tekla. Starając się łączyć pracę naukową z praktycznymi zastosowaniami byłam kierownikiem zrealizowanego zlecenia przemysłowego dla PCO S.A.

W wielu przypadkach moi dyplomanci brali udział w prowadzonych przeze mnie badaniach naukowych, a byłam promotorem 17 prac magisterskich oraz 20 inżynierskich, a także promotorem pomocniczym



3 obronionych rozpraw doktorskich. Obecnie jestem również promotorem pomocniczym 2 studentów studiów doktoranckich, którzy studiują na 2 i 3 roku w szkołach doktorskich, a także mentorem doktorantki z Uniwersytetu Warszawskiego w ramach programu Kartezjusz (Descartes).

Warto nadmienić, że równoległe do pracy naukowej zajmuję się poprawą jakości kształcenia. Dbam o jakość zajęć i udało mi się stworzyć 3 nowe przedmioty (Optical Information Processing, Terahertz Technology, Interference and Holography) i napisać 2 skrypty (Optical Information Processing oraz Laboratorium Optyki Falowej).

Dzięki mojemu zaangażowaniu i staraniom w roku 2020 została mi zaproponowana funkcja Prodziekana ds. Studenckich, co bardzo rozwinęło moje działania w sferze organizacyjnej.

Wszystkie te osiągnięcia pozwoliły mi na rozwój naukowy, który udokumentowany jest ponad 60 publikacjami, z którego 10 prac wybrałam jako osiągnięcie naukowe.

Podsumowując, główny cel naukowy prac stanowiących cykl publikacji to opracowanie wydajnych dyfrakcyjnych elementów optycznych dla pasma terahercowego, które nie tylko są płaskie i lekkie, ale również mogą formować wiązkę w sposób w wielu przypadkach nieosiągalny przez klasyczną optykę refrakcyjną czy zwierciadlaną. Warto tutaj też nadmienić, że optyka refrakcyjna i refleksyjna mają istotne ograniczenia spowodowane trudnościami w dowolnym formowaniu brył oraz lusterek. W przypadku optyki dyfrakcyjnej projektowana struktura może mieć prawie dowolny kształt co umożliwia generowanie dużo bardziej skomplikowanych frontów falowych niż podstawowe, takie jak: sferyczne, płaskie, cylindryczne itp.

Osiągnięte wyniki pozwoliły na znaczny rozwój dziedziny dyfrakcyjnych elementów optycznych dla pasma terahercowego. Dzięki prowadzonym badaniom zaczęły powstawać prace i zastosowania wykorzystujące optykę dyfrakcyjną produkowaną z różnych materiałów do zastosowań w układach terahercowych.

## 5 Szczegółowe omówienie osiągnięć

### 5.1 Wprowadzenie

W zależności od definicji możemy różnie określić szerokość pasma terahercowego (THz). Zgodnie z definicją przedstawioną w [9–11] może to być albo promieniowanie w zakresie od 100 GHz do 10 THz lub według autorów [12] promieniowanie z zakresu od 300 GHz do 10 THz. Ze względu na to, że fale milimetrowe (MMW – ang. millimeter wave) i terahercowe są ze sobą ściśle powiązane, MMW można traktować jako część zakresu THz lub jako pasmo sub-THz. MMW definiuje się jako promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości od 30 do 300 GHz i nazywa się je również skrajnie wysokimi częstotliwościami (EHF – ang. extremely high frequencies) [11].

Pasmo promieniowania terahercowego przez wiele lat nazywane było „luką”, albowiem przez długi czas nie istniały wydajne emiterzy i detektory dla promieniowania z tego zakresu częstotliwości, zwłaszcza w porównaniu z bardzo dobrze rozwiniętymi technologiami radiowymi i fonicznymi. Należy jednak podkreślić, że od lat 90-tych ubiegłego wieku nastąpił duży rozwój w dziedzinie źródeł i detektorów THz i można powiedzieć, że przez ostatnie 30 lat ten obszar spektralny jest coraz częściej zgłębianym zakresem promieniowania elektromagnetycznego. Rosnące zainteresowanie tym zakresem częstotliwości związane jest z mnogością jego potencjalnych zastosowań w takich dziedzinach jak np. astronomia, obrazowanie terahercowe w medycynie, biologia, bezpieczeństwo i badania jakości produktów. Wiąże się z nim wielkie nadzieje w przypadku zastosowań telekomunikacyjnych [13], medycznych i biologicznych (np. badanie zawartości wody w substancjach i roślinach, profilaktyka nowotworowa oraz stomatologia) [14–17]. Promieniowanie z tego zakresu znajduje również zastosowanie w nieniszczącym badaniu materiałów w takich dziedzinach jak np. rzeźbiarstwo, malarstwo, przemysł farb i pokryć, badanie kompozytów, a również w zagadnieniach dotyczących bezpieczeństwa np. do wykrywania przerwanych połączeń elektronicznych

na kartach zbliżeniowych czy mikroprocesorach. [18–21]. Bardzo ważny i istotny jest rozwój kompaktowych i dopasowanych do zastosowań elementów optycznych, które umożliwią formowanie pożądaných wiązek terahercowych. W wielu przypadkach nie wystarczy już użycie refrakcyjnych soczewek hemisferycznych, czy innych standardowych refrakcyjnych czy refleksyjnych elementów optycznych. Widząc rozwój technik THz i możliwość ich zastosowania kluczowe wydaje się być projektowanie i wykorzystanie dyfrakcyjnych elementów optycznych aby umożliwić tworzenie optyki o większej wydajności i mniejszych wymiarach.

Współcześnie dostępnych jest wiele rozwiązań bazujących na odmiennych technologiach oraz cechujących się różnymi parametrami działania, warunkami w których możliwe jest z nich korzystanie, kosztem zakupu i eksploatacji czy skomplikowaniem i zaawansowaniem konstrukcji. Spośród najczęściej wykorzystywanych urządzeń emitujących promieniowanie THz można wskazać anteny fotoprzewodzące (PCA – ang. photoconductive antenna), diody Gunna oraz diody IMPATT (ang. impact ionization avalanche transit-time), kwantowe lasery kaskadowe (QCL – ang. quantum cascade laser), karcinotrony (BWO – ang. backward-wave oscillator), lasery na swobodnych elektronach (FEL – ang. free-electron laser), a także generację częstotliwości różnicowej w kryształach nieliniowych. Pierwsze urządzenia umożliwiające detekcję promieniowania THz bazowały na rozwiązaniach znanych z innych zakresów promieniowania. Były to między innymi bolometry (chłodzone i niechłodzone), czujniki piroelektryczne czy opto-akustyczne komórki Golay’a. Obecnie dostępne są również układy bazujące na diodach Schottky’ego, tranzystorach polowych (FET – ang. field effect transistor), zwracając szczególną uwagę na tranzystory heterozłączone HEMT (ang. high-electron-mobility transistor), również znanych jako HFET (ang. heterostructure FET), które wykazują wyjątkową czułość w przypadku pasma promieniowania THz. Technologia wytwarzania nadajników i detektorów promieniowania THz cały czas jest w fazie dynamicznego rozwoju [22–26]. Dzięki temu możliwe staje się indywidualne dobieranie odpowiednich urządzeń emitujących, detekujących a także formujących promieniowanie THz do poszczególnych zastosowań, w sposób pozwalający na ich najlepsze możliwe wykorzystanie, z jednoczesnym uwzględnieniem kwestii ceny, dostępności czy bezawaryjności danych układów.

Należy pamiętać, że zakres promieniowania terahercowego jest pod wieloma względami osobliwy, ponieważ łączy ze sobą odmienne światy optyki i elektroniki. z jednej strony wykorzystuje się w nim metody znane i stosowane w każdej z tych dwóch dziedzin, z drugiej strony jednak rozwiązania w nich stosowane powoli przestają być skuteczne dla częstotliwości THz. Znane z technik mikrofalowych układy oparte na antenach, multipleksery, falowody, sprzęgacze, układy fazowe czy soczewki Luneburga spotykają się więc ze światem lusterek, soczewek refrakcyjnych i dyfrakcyjnych, włókien, pryzmatów i siatek, tworząc unikalną optoelektroniczną mieszankę. W zależności od częstotliwości projektowej stosuje się różne rozwiązania, zbliżając się bardziej do urządzeń optycznych/optoelektronicznych lub wykorzystując komponenty elektroniczne. Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że elementy optoelektroniczne posiadają lepszy stosunek sygnału do szumu od komponentów czysto elektronicznych. Również układy bazujące na optyce dyfrakcyjnej mogą zostać wykorzystane w zakresie częstotliwości terahercowych. Należy podkreślić, że dyfrakcyjne elementy optyczne są lekkie i cienkie, a także umożliwiają realizację elementów o dużej aperturze i małych ogniskowych. Ponadto są one zdolne do silnie pozaosiowego kształtowania wiązki, mogą tworzyć różne rozkłady promieniowania i niemalże dowolnie przekierowywać padające promieniowanie. Wszystkie te cechy są niezwykle atrakcyjne w przypadku zastosowania promieniowania THz w różnych dziedzinach nauki i techniki.

## 5.2 Dyfrakcyjne elementy optyczne ze szczególnym uwzględnieniem pasma promieniowania THz

Optyczne elementy dyfrakcyjne (DOE – ang. diffractive optical element) są pasywnymi urządzeniami wprowadzającymi pewne zdefiniowane opóźnienie fazowe lub pewną modyfikację amplitudy oświetlającej je wiązki promieniowania elektromagnetycznego. Struktury takie mogą zostać opisane poprzez zespoloną funkcję amplitudy (uwzględniającą rzeczywistą amplitudę oraz fazę), na podstawie której projektowany i produkowany jest rzeczywisty element optyczny. Na nim następuje dyfrakcja oświetlającego go promie-

niowania i ukształtowanie jego rozkładu w zadany podczas projektowania sposób. Można wyróżnić dwa główne rodzaje kodowania struktur dyfrakcyjnych - amplitudowe i fazowe. Ten pierwszy polega na blokowaniu części padającego promieniowania i wykorzystuje dyfrakcję na krawędziach elementu dyfrakcyjnego. Ten drugi natomiast wprowadza pewien rozkład opóźnienia fazowego, wynikający z różnic w czasie propagacji promieniowania wewnątrz struktury. Czas ten zależy z kolei od wysokości struktury w danym miejscu, długości fali oraz współczynnika załamania materiału, z którego wykonana jest struktura.

Metody projektowania i wytwarzania struktur dyfrakcyjnych (a także dostępne materiały) zależą od częstotliwości promieniowania, dla którego są one opracowywane. Wiele materiałów, powszechnie wykorzystywanych w urządzeniach pracujących w zakresie promieniowania widzialnego lub podczerwonego, cechuje się relatywnie wysokim współczynnikiem załamania w zakresie terahercowym. Materiały takie jak german, krzem, arsenek galu czy szafir posiadają dla tych częstotliwości współczynnik załamania bliski 3 lub nawet wyższy. Sprawia to, że konieczne staje się stosowanie warstw antyrefleksyjnych redukujących odbicia Fresnela. Istnieje jednak również cała gama materiałów o współczynnikach załamania bliskich 1,5 – mowa tu przede wszystkim o różnych rodzajach polimerów, poliamidów, parafin, papieru, ale też o mniej typowych materiałach, takich jak kamień, sacharoza czy czekolada. Materiałami bardzo często wykorzystywanymi do produkcji terahercowych urządzeń optycznych są polietylen (PE - ang. polyethylene), polietylen dużej gęstości (HDPE – ang. high density polyethylene), politetrafluoroetylen (PTFE – ang. polytetrafluoroethylene; znany również pod nazwą handlową Teflon) czy polimetylopenten (TPX – ang. polymethylpentene). Wykorzystuje się również wiele materiałów dostępnych do druku 3D, takich jak poliamidy (np. PA6 oraz PA12), polistyren wysokoudarowy (HIPS – ang. high impact polystyrene) czy cykliczny kopolimer olefinowy (nazwa handlowa TOPAS).

Bogactwo dostępnych materiałów przezroczystych dla promieniowania THz sprawia, że wykonywanie dyfrakcyjnych elementów optycznych jest łatwo dostępne. Zwłaszcza, jeżeli weźmie się pod uwagę, że charakterystyczne rozmiary elementów struktur dyfrakcyjnych zależą od długości fali, dla której są one projektowane (DWL – ang. design wavelength). W przypadku promieniowania terahercowego są to więc wielkości rzędu pojedynczych milimetrów lub ich ułamków. Zakładając dodatkowo, że element optyczny o bardzo dobrej jakości cechuje się chropowatością rzędu  $\lambda/10$  czy  $\lambda/20$  łatwo dojść do wniosku, że warunki te często mogą być spełnione nawet przez najprostsze techniki druku przestrzennego. Olbrzymia dostępność materiałów oraz łatwość produkcji sprawiają zatem, że dyfrakcyjne elementy optyczne są niezwykle interesującym rozwiązaniem dla częstotliwości terahercowych. Ich wykorzystanie umożliwia wydajne przekierowywanie promieniowania THz w zadane rozkłady, szybkie i tanie prototypowanie elementów optycznych, a także tworzenie lekkich, wytrzymałych i tanich w produkcji struktur.

Historia terahercowych struktur dyfrakcyjnych, metody ich projektowania i wytwarzania, najczęściej wykorzystywane rozkłady fazowe jak również współczesne oraz potencjalne zastosowania zostały szczegółowo opisane w dwóch artykułach przeglądowych H9 i H10.

### **5.3 Wprowadzenie i motywacja prowadzonych badań na tle światowych osiągnięć w dziedzinie terahercowej optyki dyfrakcyjnej**

Jak wiadomo, promieniowanie THz znajduje się pomiędzy promieniowaniem podczerwonym, a częstotliwościami radiowymi i z tego względu w ciągu kolejnych lat rozwiązania wykorzystywane w każdym z zakresów były modyfikowane i przenoszone do zastosowania dla pasma promieniowania THz. W tej części opisane zostaną podejścia różnych grup badawczych do projektowania elementów dyfrakcyjnych z uwzględnieniem czasu publikacji, rodzaju struktury i częstotliwości projektowej. Przedstawiony jest również opis moich osiągnięć w kontekście opisywanego stanu wiedzy w dziedzinie. Dla ułatwienia – prace, w których jestem współautorem zostały wyróżnione w tekście poprzez **pogrubienie i podkreślenie**.

Istnieje cała grupa rozwiązań opisujących płytki strefowe Fresnela (FZP\*), które zostały opisane i zwerfikowane eksperymentalnie w 1985 dla częstotliwości 35 GHz [27], oraz dla częstotliwości 140 GHz w roku 1987 [28] oraz 1991 [29]. Należy podkreślić, że płytki strefowe zintegrowane z antenami cieszyły się dużym powodzeniem w przypadku fal milimetrovych – w 1992 i 1993 ich użycie opisane zostało dla częstotliwości 11,1 GHz [30] [31], w 1992 dla 95 GHz (wykonane zostały z Rexolite'u) [32], a w 1995 roku dla częstotliwości 60 GHz [33]. W 1992 roku została zaprojektowana płytka strefowa dla częstotliwości 230 GHz, która była zintegrowana z dielektrycznym podłożem (z topionej krzemionki ang. fused silica) [34], co już można uznać za zakres sub-THz.

W latach 2000–2012 opisanych zostało wiele płytek strefowych zaprojektowanych dla anten dla promieniowania milimetrovego – poniżej 100 GHz: dla 11 GHz i 30 GHz [35], 35 GHz [36] [37], a także przedstawiające same obliczenia teoretyczne zapoczątkowane przez Jamesa Wiltse'go i grupę Hristo Hristova [38–43]. W pewnych pracach przedstawione zostały rozważania dotyczące materiałów optycznych wykorzystywanych dla fal milimetrovych, i stąd też zastosowanych dla THz. Opisano materiały takie jak szafir, krzem, polistyren, polietylen, teflon (PTFE), kwarc [44] (dla kwarcu opisane zostały same rozważania teoretyczne), rexolit [32, 41, 45], TPX [43], czy metal [42], także wykorzystany w pracach [1, 46] powstałych we współpracy z Uniwersytetem Sabaudzkim w Chambéry w związku z moim 3-miesięcznym pobylem badawczym. Warto podkreślić, że wspomniana praca [1] z 2011 roku opisuje dyfrakcyjną strukturę wykonaną z metalu, skupiającą wiązki poza osią optyczną. Tworzy ona pozaosiowy element dyfrakcyjny. Ciekawym użyciem metalu było opisane w roku 2020 zaprojektowanie i wytworzenie siatki dyfrakcyjnej o zmiennym okresie dla częstotliwości terahercowych wykonanej z drukowanego w 3D uchwytu sprężynowego i metalowych pasków [47], która umożliwiała zmianę kąta ugięcia padającej wiązki. W roku 2019 zaproponowana została odbiciowa siatka dyfrakcyjna wykonana za pomocą druku 3D i jego metalizacji [48] użyta w mikroskopie THz. Jako ciekawostkę warto dodać, że za pomocą takiej techniki można także wykonać dobrej jakości zwierciadła terahercowe [49].

Dla porównania dopiero w **2017 roku** została opisana quasi-spiralna antena (analogiczna do płytek strefowych) wykonana dla pasma podczerwieni (25–31 THz), a dla pasma THz zostały przedstawione jedynie **symulacje numeryczne**, podczas gdy **już w 2014 i 2015 grupa badawcza z WF PW z moim udziałem** opublikowała prace dotyczące **projektowania i weryfikacji eksperymentalnej** struktur dyfrakcyjnych dla pasma sub-terahercowego i terahercowego. Opisane zostały kinofomy wyższych rzędów [50], hiperboliczne soczewki dyfrakcyjne [51], elementy typu fan-out [3] czy optymalizacja projektowania soczewek o dużej aperturze numerycznej [4]. Podobnie, w **2016 roku** zostały opublikowane dwie prace **H3 i H4** opisujące zaawansowane elementy dyfrakcyjne formujące krzywe ogniskowe o różnych kształtach. Opisane tutaj prace stanowią oryginalne podejście, które umożliwiło zastosowanie i wykonanie terahercowej optyki dyfrakcyjnej. **Prace [1] oraz H1 były niewątpliwie nowatorskie względem światowego rozwoju optyki terahercowej.**

Przedstawione do tej pory artykuły to podejście do pasma THz od strony fal milimetrovych (promieniowanie mikrofalowe). W przypadku struktur dla zakresu THz warto zauważyć, że w roku 2002 powstała pierwsza publikacja opisująca binarną strukturę dyfrakcyjną [52] zaprojektowaną dla promieniowania o częstotliwości powyżej 0,3 THz (czyli THz, a nie sub-THz lub MMW). Wykonana ona została z krzemu. Następnie w tym samym roku została zaproponowana struktura posiadająca wiele stopni fazy [53], również wykonana z krzemu. Natomiast w roku 2005 został przeprowadzony pierwszy pomiar terahercowej siatki dyfrakcyjnej za pomocą układu terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (THz-TDS, ang. Terahertz Time Domain Spectroscopy) [54] w grupie z Chambéry, w której zaczęłam swoje badania dotyczące THz elementów optycznych. Bardziej zaawansowana wielo-stopniowa optymalizowana siatka dyfrakcyjna dla zakresu promieniowania THz została wykonana i użyta w spektroskopii fourierowskiej [55].

---

\*FZP - ang. Fresnel Zone Plates, są to binarne elementy dyfrakcyjne, amplitudowe lub fazowe, formujące padający na nie front falowy zgodnie z przeznaczeniem elementu



Warto również przeanalizować rozwój optyki dyfrakcyjnej dla pasma promieniowania terahercowego patrząc na ten zakres od strony pasma promieniowania podczerwonego.

Trzeba podkreślić, że w literaturze opisywane były płytki strefowe Fresnela projektowane również dla wyższych częstotliwości terahercowych – 1 THz i powyżej. W 2002 roku grupa badawcza związana z Davidem Cummingiem skupiła się na opisie wytwarzania płytek strefowych z krzemu dla częstotliwości 1 THz o 2-, 4- i 8-miu poziomach fazy [52, 53], w 2004 roku opisała ona wytwarzanie (bez weryfikacji eksperymentalnej) tego typu elementów dyfrakcyjnych [56], natomiast w 2007 roku opisała trawienie w krzemie struktury, która została odcisnięta w polipropylenie w postaci „stempla” i zaprojektowana dla częstotliwości 2 THz [57]. W roku 2013 trawienie w krzemie pozwoliło uzyskać aż 16 poziomów fazy i wykonana została taka struktura zaprojektowana dla częstotliwości 2,52 THz [58]. Kolejnym zespołem opisującym optykę dyfrakcyjną byli naukowcy powiązani z Borisem Knyazevem, ich prace w tej dziedzinie pojawiły się w 2007 roku i opisywały płytkę strefową Fresnela i kinoform wykonany z metalu jako odbiciowy dyfrakcyjny element optyczny (do użycia z laserem na swobodnych elektronach - FEL) [59], następnie w 2010 wykonali płytkę strefową z PP i HDPE, podchodząc do projektowania od strony obliczeń metodami geometrycznymi [60, 61]. Rok później grupa zaproponowała użycie płytki Fresnela do bardzo prostego obrazowania [62]. Płytki strefowe Fresnela zostały wykonane z PP i HRFZSI (ang. High Resistivity Float Zone Silicon) dla 2,3 THz [63] oraz z krzemu dla 2,13 THz [64, 65]. W roku 2020 naukowcom z tej grupy udało się uzyskać strukturę kinoformową [66] za pomocą ablacji laserowej.

Obie te grupy skupione były bardziej na opisie metody produkcji elementów w krzemie z wykorzystaniem trawienia lub ablacji laserowej, niż na samym elemencie dyfrakcyjnym. Poza tymi grupami powstała również w 2010 roku praca opisująca amplitudową płytkę i pinholę\*, która użyta jest jako filtr. W rozwiązaniu tym różne częstotliwości skupiają się na różnych odległościach i w ten sposób następuje filtracja, a sama płytka projektowana była dla częstotliwości 1 THz i tego promieniowania przechodziło najwięcej [67]. W 2013 roku została zaprojektowana i wytworzona wirtualna płytka strefowa (rozkład plazmy elektronowej na płycie krzemu) dla 1 THz [68], którą można przestraszać. Opisane tutaj były plamki ogniskowe również dla fali o długości 0,25 mm; 0,300 mm i 0,375 mm (co odpowiada 1,20, 1,00 oraz 0,80 THz).

Alternatywne podejście (już po 2012 roku) zaproponowała grupa z Wilna projektująca płytki strefowe z metalu jak struktury binarne oraz z metalu z wyciętymi otworami w kształcie krzyżyków [69, 70] dla 0,76 THz. Zaproponowali oni również płytkę strefową wykonaną metodą ablacji laserowej zintegrowaną na czipie [71] również dla 0,76 THz oraz wielo-poziomowe fazowe płytki strefowe dla częstotliwości 0,58 THz [72–74], co jest stosunkowo niską wartością jak na dyfrakcyjne elementy optyczne wykonane z krzemu, oraz strukturę generującą wiązkę Bessela [75]. W roku 2019 zaproponowali binarną strukturę amplitudową w postaci płytki strefowej Fresnela (Soreta) dla częstotliwości aż 4,7 THz [76]. Podobna struktura, ale fazowa wykonana z polimeru dla promieniowania o częstotliwości 1 THz została opisana w pracy [77].

**Pierwsze próby przekierowywania wiązki** oparte na obliczeniach takich jak w opisywanej pracy mojego autorstwa [1] (rok 2011) były opisane w innej pracy **dopiero w 2015 jako projekt płytki strefowej Fresnela** dla 0,76 THz, której rozkład wyświetlany był z projektora typu DLP (ang. Digital Light Processing) na krzemie o wysokiej rezystywności i przesuwany poprzecznie do osi optycznej [78]. Za pomocą wyświetlacza DLP przesuwany jest wyświetlany rozkład natężenia odpowiadający elementowi dyfrakcyjnemu i dzięki temu możliwe jest sterowanie wiązką w sposób dynamiczny [79].

**Prace [1] i H1 powstały odpowiednio w 2011 i 2012 roku** i opisywały strukturę przekierowującą promieniowanie i płytkę strefową Fresnela zaprojektowaną zarówno z przybliżeniem przyosiowym, jak i bez niego, co ma duże znaczenie w przypadku małych długości ogniskowych i dużych średnic elementów. Osiąganie małych plamek ogniskowych jest wyzwaniem, które realizowane było za pomocą dwustronnej struktury dyfrakcyjnej z korekcją tworzonej fazy [80, 81], za pomocą metamateriałowych soczewek [82–84]

\*pinhola - otwór filtrujący, czyli mały kołowy otwór, w klasycznej optyce światła widzialnego przeważnie ma on średnicę rzędu kilkunastu, kilkudziesięciu mikrometrów, służący do formowania wiązki sferycznej rozbieżnej

oraz dzięki użyciu krzemowej maski i metody próbkowania skompresowanego (ang. compressed sensing) [85].

W tym miejscu należy przedstawić inne (niż płytki strefowe) ciekawe struktury optyczne opisane w literaturze:

- 1996 – spiralna struktura zaprojektowana dla 0,1 THz wykonana jako element fazowy [86],
- 2003 – struktura typu axicon skupiająca promieniowanie w odcinek ogniskowy wzdłuż osi optycznej [87] (bez weryfikacji eksperymentalnej),
- 2004 – struktura w kształcie stożka (aksikon), ale z płaskimi strefami [88] (bez weryfikacji eksperymentalnej),
- 2009 – refrakcyjny i dyfrakcyjny axicon tworzący wiązkę Bessela [89] zaprojektowany dla 0,94 THz jako struktura fazowa o 32 poziomach (bez weryfikacji eksperymentalnej),
- 2012 – struktura analogiczna do kinoformy wyższego rzędu, zaprojektowana dla 1,5 mm 0,75 mm, 0,5 mm i 0,375 mm (co odpowiada 0,20, 0,40, 0,60 oraz 0,80 THz) [90] (bez weryfikacji eksperymentalnej),
- 2013 – soczewka skupiająca połączona z axiconem tworząca wiązkę besselowską dla 0,5 mm (co odpowiada 0,60 THz) [91] (bez weryfikacji eksperymentalnej),
- 2014
  - struktura w kształcie stożka [92] podobna do struktury opisanej w pracy [88],
  - generacja wiązek tworzących wiry optyczne za pomocą spiralnych płytek fazowych zaprojektowanych dla częstotliwości 2 i 4 THz wykonanych z materiału Tsurupica [93],
- 2015
  - różne axicony generujące wiązki besselowskie dla częstotliwości 0,3 THz, płytki fazowe wykonane techniką druku 3D z polimeru [94],
  - struktura spiralna wykorzystywana do generacji wiązki besselowskiej wykonana z krzemu [95] opisana jako struktura potencjalnie mogąca zostać użyta do generacji plazmonów,
- 2016
  - soczewki, których strefy obliczone zostały ze wzoru Fresnela, na podstawie fraktali i ciągu Fibonacciego wykonane z PA6 dla częstotliwości 0,625 THz [96],
  - struktura generująca wiązkę Airy, wykonana metodą druku 3D [97],
  - 2 elementy optyczne do tworzenia wiązek tworzących wiry optyczne wykonane metodą druku 3D z polimeru Vero White Plus dla częstotliwości 0,3 THz [98],
  - struktura spiralna, wykonana metodą druku 3D dla 375 i 700 GHz, projektowanie uwzględniało różne odległości polimeru tworzącego spiralę, co pozwalało zmieniać współczynnik załamania kolejnych struktur [99],
  - elementy dyfrakcyjne formujące różne kształty krzywych ogniskowych, a także soczewkę skupiającą promieniowanie w linię skierowaną pod pewnym kątem względem głównej osi optycznej - prace **H3** i **H4**,
- 2018 – binarny spiralny axicon wykorzystany do wiązek tworzących wiry optyczne [100],

- 2019
  - hologram komputerowy generujący obrazy w dwóch płaszczyznach **H5**,
  - struktury spiralne, które mogą generować wiązki bezdyfrakcyjne [101],
  - dwie struktury dyfrakcyjne, generujące wiązkę Airy [102],
  - struktury optymalizowane pod względem wysokości poziomów fazy, aby umożliwić szeroko-pasmową pracę elementów dyfrakcyjnych będących skupiającymi i cylindrycznymi soczewkami [103, 104],
  - dyfrakcyjna sieć neuronowa realizująca filtrację zdefiniowanych częstotliwości [105],
- 2020
  - użycie struktur o zwiększonej głębi ostrości do skupiania achromatycznego promieniowania [106],
  - struktura spiralna generująca wiązkę Bessela [107],
  - struktury generujące wiry optyczne, struktury posiadały bazowy kształt axiconu i były podzielone na 1, 2 lub 4 strefy w których występowała dodatkowa modulacja fazy [108],
  - struktury dyfrakcyjne realizujące podział wiązki na 3 plamki ogniskowe (symetryczne i asymetryczne) optymalizowane metodami iteracyjnymi i za pomocą sieci neuronowych **H8**,
  - hologram komputerowy działający poosiowo wykorzystujący sieci neuronowe do optymalizacji kształtu struktury [109] – **opublikowany po H8**.

**Wszystkie opisane w tej części struktury projektowane były analitycznie** – podobnie jak struktury opisywane w pracach **H1, H2, H3, H4** oraz [1]. Biorąc pod uwagę rozwój dziedziny terahercowej optyki dyfrakcyjnej, opisywane przez mnie rozwiązania są **nowatorskie, a także konkurencyjne w porównaniu z opisaną literaturą światową**.

Dodatkowo na początku 2019 roku zaproponowałam projektowanie terahercowych elementów dyfrakcyjnych metodami iteracyjnymi tworząc hologram opisany w pracy H5 i nieprzyosiowe elementy przekierowujące promieniowanie projektowane iteracyjnie – opisane w pracach H6, H7 i H8. Artykuł H8 opisuje też projektowanie i optymalizację terahercowych struktur dyfrakcyjnych **z wykorzystaniem sieci neuronowych, co nie było nigdy wcześniej zaproponowane w literaturze**.

Jak już wcześniej wspomniałam, projektowanie terahercowych elementów dyfrakcyjnych nieodłącznie wiąże się z określeniem ich metody wytwarzania i materiału z jakiego zostaną one wykonane. Zacznę od komentarza dotyczącego materiału, ponieważ w pracy H1 zastosowany został papier jako materiał fazowy. Posiada on bardzo podobne właściwości optyczne dla pasma THz jak szkło dla pasma widzialnego. Użycie papieru do wytworzenia struktur dyfrakcyjnych zostało opisane w pracach **H1 (2012), H3 i H4 (obie 2016)**. W roku 2017 wytworzona została siatka dyfrakcyjna ze skompresowanej masy papierowej [110], natomiast w roku 2018 wykonane zostały papierowe macierze soczewek Fresnela [111]. W pracy **H1 z 2012 roku** opisana została dyfrakcyjna soczewka skupiająca (płytką strefowa Fresnela, fazowa binarna) wyprodukowana z użyciem całkowicie **nowatorskiego** podejścia do tworzenia THz elementów dyfrakcyjnych. Do tej pory produkowane one były w zasadzie przeważnie za pomocą metody toczenia z użyciem np. Teflonu (PTFE) lub HDPE lub trawienie w krzemie, a w pracy **H1 zaproponowałam użycie cięcia laserowego**, co zainspirowało grupę naukowców z WF PW i nie tylko do poszukiwań alternatywnych metod produkcji terahercowych elementów optycznych, a również stosowania nietypowych materiałów [112–114] oraz [115]. Siatka dyfrakcyjna piło-kształtna została wyprodukowana z żywicy metodą druku 3D w roku 2013 [116] oraz 2014 [117] (razem z refrakcyjną soczewką asferyczną). W 2015 roku opisane zostały siatki dyfrakcyjne i soczewki wykonane metodą druku 3D [118], **soczewka hiperboliczna skupiająca promieniowanie w długi odcinek w poprzek osi optycznej** [51] oraz różnego rodzaju axicony [94].



W kolejnym roku nastąpiła kontynuacja i rozwój wykorzystania metod druku 3D dla dyfrakcyjnej optyki produkowanej dla pasma THz [96–98]. W roku 2018 opisane zostały właściwości optyczne podstawowych filamentów używanych w druku 3D [119,120]. **Warto podkreślić, że w moich pracach H2, H9 i H10, a także [115, 121, 122] przedstawione są właściwości optyczne różnorodnych materiałów nie tylko związanych z drukiem 3D, które mogą być wykorzystane do produkcji terahercowych elementów optycznych.**

Podsumowując, moją zasadniczą motywacją było zwrócenie uwagi na możliwość różnorodnego zastosowania i wykorzystania struktur dyfrakcyjnych dla pasma promieniowania terahercowego. Użycie nieszablonowych materiałów, takich jak **pionierski papier**, spowodowało rozwój optyki dyfrakcyjnej w tym paśmie promieniowania elektromagnetycznego i poszukiwanie nowych materiałów optycznych w tej dziedzinie.

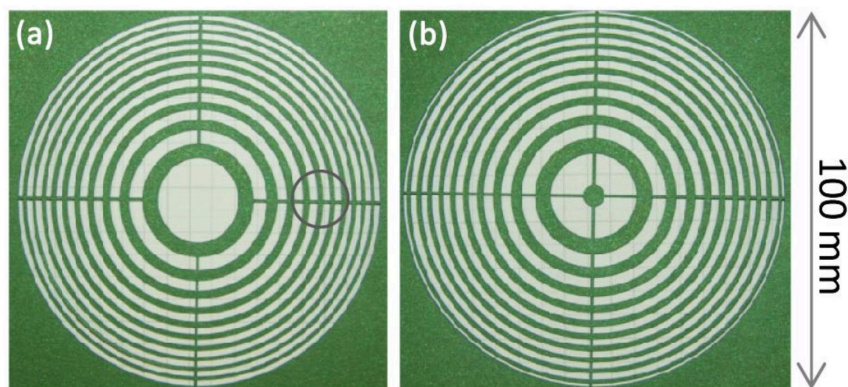
Biorąc pod uwagę opisane przeze mnie rozwiązania i porównanie ich z literaturą światową chciałam podkreślić, że **głównym celem naukowym prac stanowiących cykl publikacji jest opracowanie wydajnych dyfrakcyjnych elementów optycznych dla pasma terahercowego**, które nie tylko są płaskie i lekkie, ale mogą formować wiązkę w sposób w wielu przypadkach nieosiągalny przez klasyczną optykę refrakcyjną czy zwierciadlaną.

Wszystkie rysunki przedstawione w rozdziale 5 pochodzą z publikacji stanowiących cykl, tworzący osiągnięcie naukowe.

**[H1] Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Michał Makowski, Jarosław Suszek, Jarosław Bomba, Adam Czerwiński, Frederic Garet, Jean-Louis Coutaz, Maciej Sypek, „Diffractive paper lens for terahertz optics”, Optics Letters, 37 (20):4320–4322, 2012.**

Praca H1 została zgłoszona do publikacji pół roku po obronie doktoratu, która była opóźniona ze względu na urlop macierzyński. Zakres tematyczny pracy H1 jest istotny w przypadku określenia dorobku habilitacyjnego oraz jest zupełnie odmienny od tematyki doktoratu (holografia cyfrowa z użyciem zjawiska samo-obrazowania dla światła widzialnego).

W pracy H1 zaprojektowana została skupiająca soczewka dyfrakcyjna zarówno z uwzględnieniem przy-



Rysunek 1: Soczewki dyfrakcyjne wykonane z papieru i zaprojektowane z użyciem przybliżenia przyosiowego (a) oraz bez niego (b).

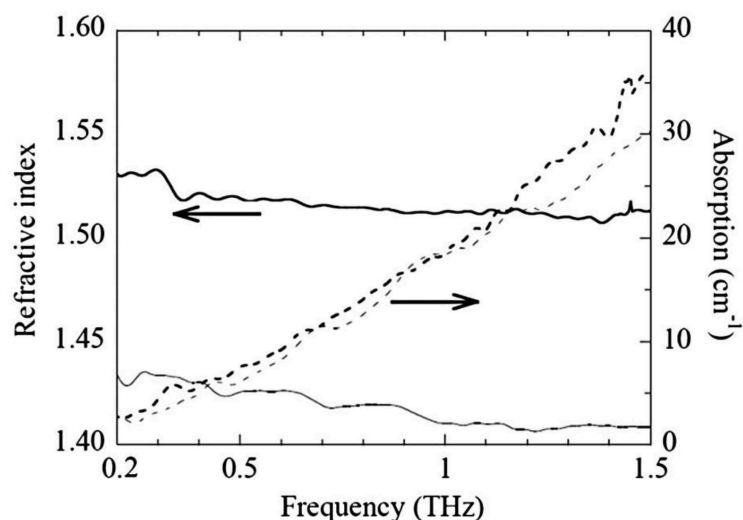
bliżenia przyosiowego, jak i dla przypadku dużych kątów ugięcia promieniowania (Rys. 1). Ten drugi przypadek jest niezwykle istotny, gdy liczba przysłony ( $f$  – number,  $F\#$ ) przyjmuje wartość równą 1 lub mniejszą. Soczewki zostały wyprodukowane z papieru za pomocą technologii cięcia laserowego. Użycie materiału dielektrycznego jakim jest papier było przełomowe jeżeli chodzi o dalsze poszukiwania alterna-

tywnych materiałów do produkcji terahercowych elementów optycznych.

Unikalne właściwości promieniowania terahercowego sprawiają, że wiele niemetalicznych materiałów jest w tym zakresie co najmniej częściowo przezroczystych (np. papier  $\alpha = 2,39 \text{ cm}^{-1}$  dla 0,3 THz). Pozwala to na wykorzystanie takich materiałów do wytwarzania elementów optycznych dla zakresu promieniowania THz. Obecnie powszechnie stosuje się do ich wytwarzania wyższe związki organiczne w postaci polimerów czy poliamidów [123]. W omawianym cyklu publikacji przedstawiono jednakże badania udowadniające, że niektóre nieszablonowe materiały (zazwyczaj nie kojarzone z zastosowaniami w optyce) mogą również zostać wykorzystane do wytworzenia wydajnych i tanich terahercowych struktur optycznych. Jest to opisywany w tej pracy papier, ale także parafina, która została opisana w pracy H2, czy inne materiały opisane w H10. W pierwszej kolejności nowe, dotąd nieznanne materiały muszą zostać przebadane z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. Technika ta pozwala na określenie między innymi parametrów optycznych danego materiału, jakimi są współczynnik absorpcji i współczynnik załamania (Rys. 2). Poprawne przygotowanie próbek oraz analiza otrzymanego sygnału (aby obliczyć potrzebne wartości współczynników załamania i absorpcji) są kluczowe, albowiem na ich podstawie obliczany jest finalny kształt zaprojektowanego elementu.

W pracy wykazano, iż papier cechuje się współczynnikiem załamania umożliwiającym stosunkowo łatwą manipulację fazą przechodzącego przez niego promieniowania. Jednocześnie jest to materiał, który nie będzie posiadał dużych odbić Fresnela, ponieważ jego współczynnik załamania ma wartość zbliżoną do 1,5. Papier posiada wystarczająco niski współczynnik absorpcji, żeby umożliwić nisko-stratne działanie cienkich struktur dyfrakcyjnych.

Zastosowanie nietypowych materiałów do produkcji struktur optycznych wiąże się również z wykorzystaniem różnych metod ich wytwarzania. Metody omawiane w ramach niniejszego cyklu publikacji obejmują wycinanie laserowe, druk przestrzenny (3D) oraz wypełnianie form. W tej pracy wycinanie laserowe zostało wykorzystane do wytworzenia papierowej soczewki zakodowanej w postaci fazowej binarnej płytki strefowej Fresnela. Metoda ta pozwala na uzyskanie ostrych krawędzi struktury oraz precyzyjną kontrolę szerokości stref. Opublikowane wyniki wykazały jej poprawne działanie dla częstotliwości projektowej (0,26 THz) oraz jej dwukrotności.



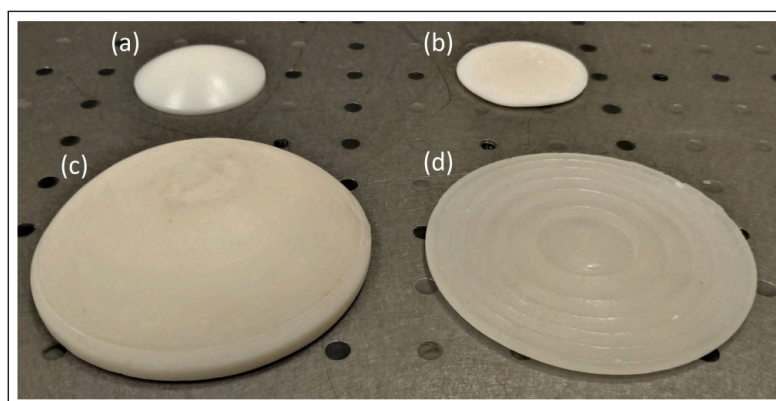
Rysunek 2: Współczynnik absorpcji (linie przerywane) oraz współczynnik załamania (linie ciągłe) dla dwóch rodzajów papierów. Papier użyty do produkcji soczewek zaznaczony jest szarym kolorem. Pomiary zostały wykonane w układzie terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu.

W pracy H1 nowatorskie było zaprojektowanie skupiającej soczewki dyfrakcyjnej o liczbie

przysłony równiej 1 z wykorzystaniem podejścia przyosiowego i nieprzyosiowego. Soczewki te zostały wyprodukowane z użyciem nowego, dotąd niestosowanego materiału do produkcji terahercowych elementów optycznych (papieru) oraz cięcia laserowego jako techniki wytwarzania. Ich weryfikacja eksperymentalna została przeprowadzona w goniometrycznym układzie terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu.

[H2] Agnieszka Siemion, Mateusz Surma, Paweł Komorowski, Przemysław Zagrajek, Michał Walczakowski, Aneta Melaniuk, Izabela Ducin, Piotr Sobotka, Elżbieta Czerwińska, „Paraffin diffractive lens for sub-terahertz range – simple and cost efficient solution”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 11(4):396–401, 2021.

W pracy H2 zaproponowane zostało użycie alternatywnego, nieużywanego do tej pory materiału do produkcji terahercowych elementów optycznych. Materiał ten to parafina, która charakteryzuje się bardzo niską wartością współczynnika tłumienia w dużym zakresie częstotliwości promieniowania THz. Dodatkowo zaproponowana została metoda produkcji form za pomocą szybko rozwijającej się technologii druku 3D. Aby uzyskać odpowiednie parametry wykonanej struktury dyfrakcyjnej zaproponowane zostało dodatkowo jej projektowanie w formie kinoformu wyższego rzędu (Rys. 3). Rozwiązanie takie pozwala na zwiększenie rozmiarów poszczególnych stref z zachowaniem takiej samej wydajności dyfrakcyjnej. W celu uniknięcia strat związanych z tłumieniem w przypadku grubszych struktur zaproponowany został odpowiedni materiał do produkcji terahercowych elementów optycznych – w tym przypadku parafina.



Rysunek 3: Zdjęcie soczewek porównywanych w artykule H2 – trzy elementy refrakcyjne i jeden dyfrakcyjny. (a) refrakcyjna soczewka z HDPE kupiona komercyjnie o ogniskowej  $f = 75 \text{ mm}$ , (b) refrakcyjna soczewka z parafiny o takiej samej ogniskowej jak soczewka z HDPE, (c) refrakcyjna soczewka z parafiny o ogniskowej  $f = 100 \text{ mm}$  oraz (d) dyfrakcyjna soczewka z parafiny o ogniskowej  $f = 100 \text{ mm}$ , zaprojektowana jako kinoform wyższego rzędu. Istotna jest różnica grubości soczewki (c) i (d).

Poszukiwanie odpowiednich materiałów, aby umożliwić nisko-stratne działanie cienkich struktur dyfrakcyjnych, wydaje się kluczowe. Warto podkreślić, że w przypadku niektórych rodzajów parafin, niski współczynnik absorpcji ( $\alpha = 0,40 \text{ cm}^{-1}$  dla 0,3 THz) okazuje się nawet konkurencyjny w porównaniu do polimerów powszechnie wykorzystywanych w druku 3D (np. PLA  $\alpha = 1,66 \text{ cm}^{-1}$  czy PETG  $\alpha = 1,39 \text{ cm}^{-1}$  dla 0,3 THz).

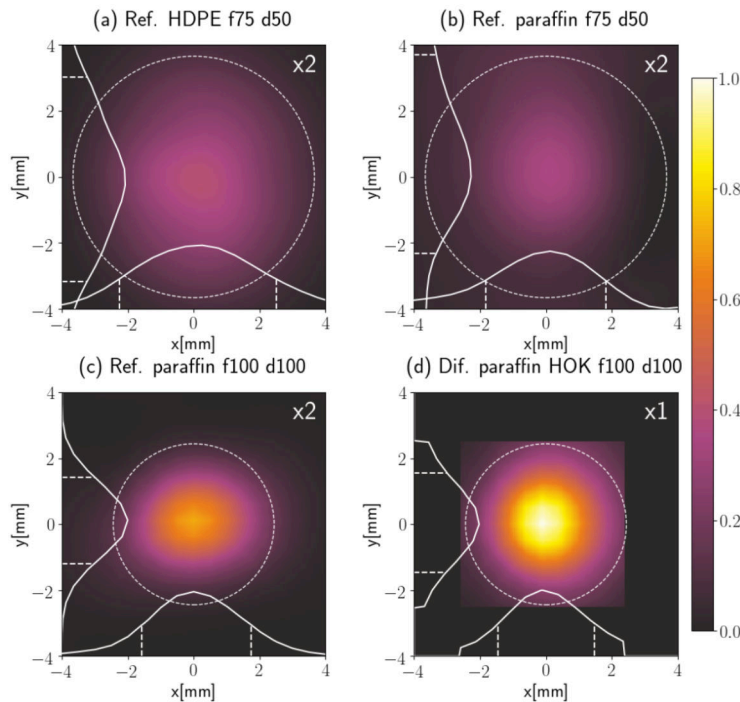
Druk przestrzenny umożliwia bezpośrednie wytwarzanie trójwymiarowych struktur dyfrakcyjnych dla zakresu THz. Można wyróżnić trzy główne metody druku 3D: drukowanie z termoplastów (FDM – ang. fused deposition modeling lub FFF – ang. fused filament fabrication), stereolitografię (SLA – ang. stereolithography apparatus) oraz spiekanie laserowe proszków (SLS – ang. selective laser sintering). Każda

z metod powiązana jest z pewnym zbiorem materiałów jej dedykowanych. Nie wszystkie metody i dostępne materiały są jednak odpowiednie do druku struktur terahercowych. Niemożliwe jest wydrukowanie struktur z popularnych bardzo przezroczystych dla promieniowania THz polimerów, takich jak np. PTFE [124]. Konieczne staje się więc zwrócenie uwagi na inne, łatwo dostępne materiały o lepszych parametrach optycznych w zakresie THz, jak np. PA12 ( $\alpha = 0,83 \text{ cm}^{-1}$  dla 0,3 THz), BendLay ( $\alpha = 0,24 \text{ cm}^{-1}$  dla 0,3 THz) i TOPAS ( $\alpha = 0,09 \text{ cm}^{-1}$  dla 0,3 THz) w przypadku metody FDM, czy PA12 w przypadku metody SLS [51, 125]. Największym ograniczeniem wytwarzania struktur terahercowych metodami druku 3D jest rozmiar detali struktury, który zależy od częstotliwości promieniowania, dla którego są one projektowane. Powyżej częstotliwości ok. 0,6 THz wiele materiałów wykorzystywanych do druku 3D zaczyna mocno absorbować promieniowanie elektromagnetyczne. Co więcej, rozdzielczość druku 3D przestaje być wystarczająca (gdyż rozmiar najmniejszych detali struktur jest wprost proporcjonalny do długości fali promieniowania). Rozwiązania zaproponowane w ramach omawianego cyklu habilitacyjnego i opisane w tej pracy umożliwiają pokonanie tych ograniczeń. Zastosowanie kinoformów wyższych rzędów (ang. HOK – high order kinoform) pozwala na zwiększenie najmniejszych detali struktur, tak aby były one możliwe do wyprodukowania technikami druku przestrzennego, natomiast wykorzystanie drukowanych form napełnianych roztopionymi materiałami (np. parafiną) umożliwi połączenie zalet druku 3D oraz dobrych terahercowych parametrów optycznych konkretnych materiałów.

Kinoformy wyższych rzędów różnią się od zwykłych struktur dyfrakcyjnych zakresem wprowadzanego opóźnienia fazowego, które to zmienia się od 0 do naturalnej wielokrotności  $2\pi$ , a nie w przedziale  $0 - 2\pi$ . Sprawia to, że strefy struktury oraz jej detale są odpowiednio większe (proporcjonalnie do tej wielokrotności, oznaczającej rząd kinoformu). Ujmując to inaczej, częstotliwość promieniowania, dla której projektowana jest struktura staje się odpowiednią harmoniczną podstawowej częstotliwości danej struktury (dla której obserwuje się zakres zmian fazy od 0 do  $2\pi$ ). Wadą takiego rozwiązania jest również proporcjonalne do rzędu kinoformu zwiększenie grubości struktury, a przez to i jej strat absorpcyjnych. Jednakże, w przypadku relatywnie cienkich struktur dyfrakcyjnych i jednocyfrowych rzędów kinoformu nie stanowi to znaczącego ograniczenia. Zwłaszcza w przypadku zastosowania nisko-tłumiących materiałów, jak zostało to opisane w niniejszej pracy (Rys. 3).

Nowatorska metoda wytwarzania form metodami druku 3D, a następnie wypełniania ich i studzenia, pozwala na wykorzystanie znacznie szerszej gamy materiałów. Jednym z najbardziej obiecujących materiałów jest opisywana w tej pracy parafina. Cechuje się ona nie tylko znakomitymi parametrami optycznymi w zakresie THz, ale także wystarczającą wytrzymałością mechaniczną, odpowiednią temperaturą topnienia [126] oraz dużą dostępnością i niską ceną. Proces wytwarzania struktur dyfrakcyjnych tą metodą rozpoczyna się od wydrukowania formy, będącej negatywem projektowanego elementu, wzbogaconej o podwyższone ścianki, utrzymujące płynny materiał wewnątrz. Następnie roztopiona parafina wlewana jest do formy, powoli studzona i ostatecznie oddzielana od formy. W ramach badań przebadano różne rodzaje parafin pod względem terahercowych parametrów optycznych badanych w układzie terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. Porównane zostały z innymi materiałami przezroczystymi dla promieniowania THz. Istotne są również różne metody druku form, studzenia materiału oraz jego oddzielania. Wykorzystanie zoptymalizowanej metody druku form pozwoliło na wytworzenie dyfrakcyjnej soczewki parafinowej o małej liczbie przysłony, dużej wydajności oraz małym tłumieniu, co jest bardzo trudne do otrzymania w przypadku optyki refrakcyjnej. Wydajność struktury dyfrakcyjnej została porównana z soczewką refrakcyjną o takich samych wartościach odległości ogniskowej oraz apertury (Rys. 4).



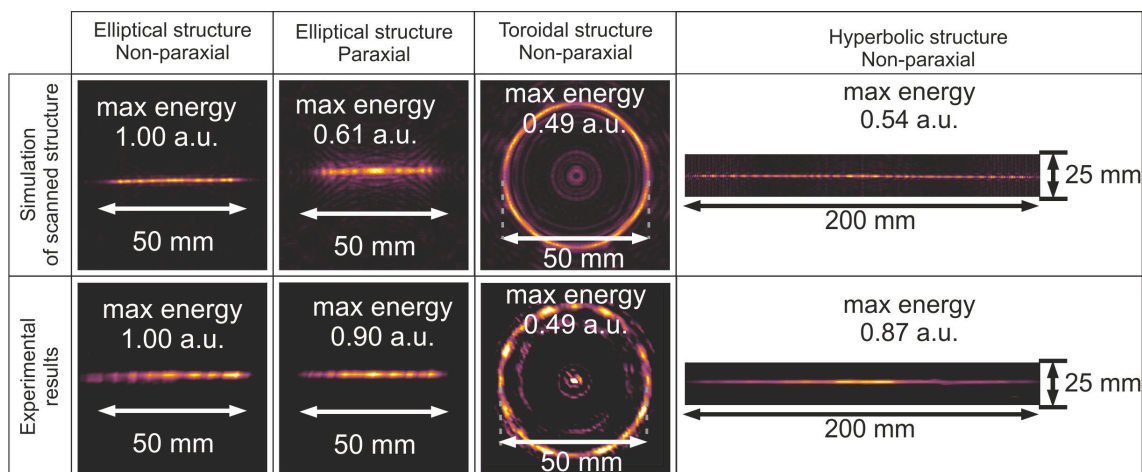


Rysunek 4: Porównanie rozkładu natężenia promieniowania w ogniskach mierzonych dla częstotliwości 150 GHz. Zarejestrowane dane zostały znormalizowane do najwyższej wartości spośród wszystkich skanów – w tym przypadku odpowiada to soczewce dyfrakcyjnej (d). Natężenia ognisk tworzonych przez soczewki refrakcyjne (a), (b) i (c) zostały pomnożone przez dwa dla lepszej widoczności. Kropkowane okręgi określają teoretyczny limit dyfrakcyjny określony jako średnica dysku Airy’ego.

W pracy **H2** nowatorskie było zaproponowanie użycia do produkcji terahercowych dyfrakcyjnych elementów optycznych materiału płynnego o bardzo dobrych parametrach optycznych dla zakresu THz, jakim jest parafina, wytworzenie terahercowego elementu dyfrakcyjnego za pomocą wypełnienia formy wykonanej metodą druku 3D, zaprojektowanie elementu dyfrakcyjnego w postaci kinofornu wyższego rzędu, aby najmniejsze detale zaprojektowanej struktury umożliwiały produkcję z wykorzystaniem metod druku 3D.

**[H3] Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Jarosław Suszek, Adam Kowalczyk, Jarosław Bomba, Artur Sobczyk, Norbert Palka, Przemysław Zagrajek, Andrzej Kołodziejczyk, Maciej Sypek, „THz beam shaping based on paper diffractive optics”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(4):568–575, 2016**

W pracy H3 przedstawione zostały terahercowe struktury dyfrakcyjne formujące rozkłady promieniowania o różnych kształtach. Zaprojektowane struktury generują różne kształty krzywych ogniskowych, a także mogą utworzyć różnego rodzaju odcinki ogniskowe. Ze względu na różnorodność rozkładów jakie mogą zostać uformowane za pomocą terahercowej optyki dyfrakcyjnej istnieje wiele możliwości ich zastosowania, zarówno w biologii, medycynie, tomografii, obrazowaniu ze zwiększoną głębią ostrości, jak i telekomunikacji, czy wielu innych. Projektowanie i wytwarzanie tego typu elementów dyfrakcyjnych zdecydowanie ułatwia rozwój wielu dziedzin nauki związanych z technikami terahercowymi i pozwala na projektowanie i tworzenie zaawansowanych układów optycznych. Dodatkowym aspektem jest możliwość wykorzystania techniki cięcia laserowego oraz wykorzystania odpowiedniego materiału do produkcji takich struktur, które mogą zostać wykorzystane między innymi do szybkiego prototypowania, a potem do konkretnych zastosowań.



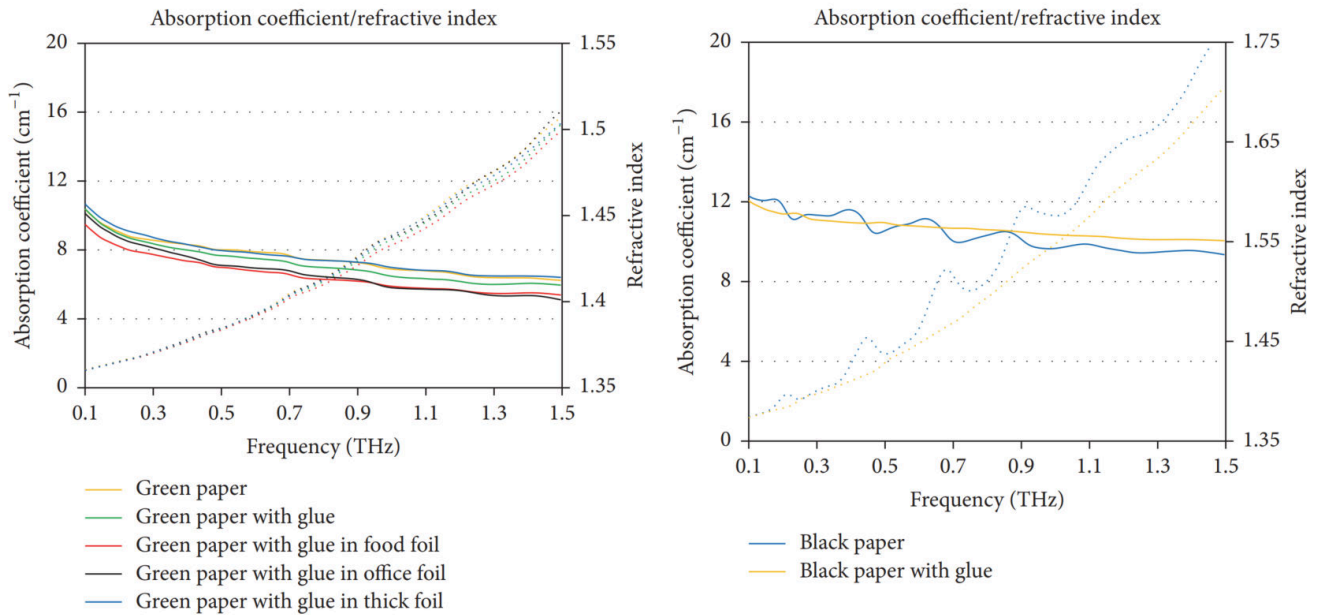
Rysunek 5: Wyniki symulacji zeskanowanych wyprodukowanych struktur (górny wiersz) oraz zarejestrowane wyniki eksperymentalne (dolny wiersz) dla struktury eliptycznej zaprojektowanej z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia przybliżenia przyosiowego, struktury toroidalnej oraz hiperbolicznej. Wszystkie wartości natężenia porównano z natężeniem struktury eliptycznej zaprojektowanej w podejściu nieprzyosiowym, znormalizowanej do 1 a.u. Widoczna jest duża zgodność symulacji komputerowych z wynikami eksperymentalnymi.

W pracy H3 przedstawione zostały binarne fazowe elementy optyczne formujące wiązki terahercowe w konkretne zadane kształty - różnej długości i rodzaju odcinki ogniskowe czy okręgi (Rys. 5). Publikacja ta dotyczy struktur wytwarzanych z papieru. Zaprojektowano, wytworzono oraz przebadano struktury nazywane soczewkami eliptycznymi, hiperbolicznymi, toroidalnymi oraz stożkowymi. Struktury takie skupiają promieniowanie odpowiednio w odcinek prostopadły do osi optycznej, ale mniejszy od średnicy elementu dyfrakcyjnego, w odcinek prostopadły do osi optycznej, ale większy od średnicy elementu dyfrakcyjnego, w okrąg w płaszczyźnie ogniskowej lub w odcinek ogniskowy powstający pod pewnym zadanym kątem względem osi propagacji promieniowania. Wszystkie te struktury zostały wytworzone poprzez laserowe wycinanie z arkusza papieru (jak opisano w podrozdziale 5.3). Wyniki eksperymentalne uzyskane poprzez skanowanie rastrowe przestrzeni za oświetlonymi strukturami zostały porównane z symulacjami teoretycznymi wykazując wysoką zgodność z założeniami. Przeanalizowane i porównane zostały również różne metody projektowe - w przybliżeniu przyosiowym oraz nieuwzględniające tego przybliżenia. Na wybranych przykładach wskazane zostały ograniczenia przybliżenia przyosiowego i pokazana została konieczność wykorzystania dokładniejszych metod symulacji przy strukturach o niskim stosunku odległości ogniskowej do średnicy.

W pracy **H3 nowatorskie było**: zaprojektowanie terahercowych struktur formujących padające promieniowanie w **rozkłady o różnych kształtach** w zależności od typu struktury; wykorzystanie metod umożliwiających projektowanie z zastosowaniem podejścia nieprzyosiowego i możliwość uzyskania dzięki temu elementów o **dużych kątach ugięcia dla pasma promieniowania THz**, wykorzystanie **metody cięcia laserowego** do produkcji terahercowych elementów optycznych oraz optymalizacja kształtu struktur w celu umożliwienia ich produkcji.

[H4] Agnieszka Siemion, Paweł Kostrowiecki-Łopata, Adam Pindur, Przemysław Zagrajek, Maciej Sypek. „Paper on designing costless THz paper optics”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016

W pracy H4 opisana została procedura projektowania terahercowych elementów optycznych z uwzględnieniem ich produkcji za pomocą cięcia laserowego i druku 3D z użyciem papieru (jeden rodzaj papieru



Rysunek 6: Wartości współczynników załamania oraz absorpcji dla papieru, z którego wykonana została struktura, dla różnych konfiguracji: z użyciem kleju lub bez, z umieszczeniem papieru wewnątrz różnych folii (lewy wykres). Analogiczny pomiar dla papieru sklejonego oraz takiego pomiędzy którymi utworzyły się przerwy powietrzne, co wywołało efekt podobny do rezonansu (prawy wykres).

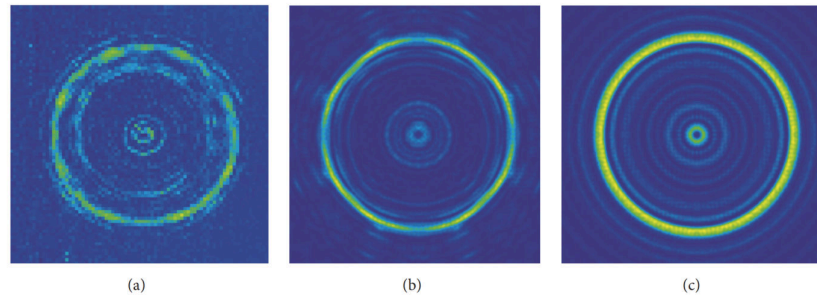
został opisany jako materiał możliwy do wykorzystania w produkcji terahercowych elementów optycznych w pracy H1). Tutaj wyniki symulacji komputerowych i wyniki eksperymentalne zostały zaprezentowane dla soczewki toroidalnej. W pracy H3 przedstawione zostały struktury formujące różne kształty ognisk. W pracy H4 różnego rodzaju papier używany do cięcia laserowego lub druku 3D (Rys. 6) został przebadany za pomocą terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (TDS). W artykule przedstawione zostały zależności współczynnika załamania oraz współczynnika absorpcji dla papieru otrzymanego za pomocą różnych technik druku 3d i różnych kierunków wydruku, co pozwoliło stwierdzić, że ewentualna dwójłomność drukowanego materiału ma marginalną wartość. Okazało się jednak, że bardzo istotne okazuje się odpowiednie sklejenie poszczególnych warstw papieru, aby nie wywołać efektu podobnego do rezonansu wynikającego z wielokrotnych odbić na tworzących się granicach ośrodków (Rys. 6). W pracy H4 przeprowadzone zostały symulacje ilustrujące oświetlenie w rzeczywistym układzie optycznym i z uwzględnieniem rzeczywistego rozkładu wydrukowanego elementu. Warto podkreślić, że uzyskana została bardzo dobra zgodność symulacji komputerowych z wynikami eksperymentalnymi.

W publikacji H4 zostało poruszone zagadnienie wpływu elementów stabilizujących strukturę na jej działanie. Jednym z kluczowych problemów do rozwiązania przy wytwarzaniu binarnych struktur dyfrakcyjnych jest podtrzymanie fragmentów wprowadzających opóźnienie fazowe. Omawiana w publikacji struktura toroidalna, skupiająca promieniowanie w pierścieni, składa się z koncentrycznych pierścieni, wprowadzających naprzemiennie opóźnienie fazowe  $\pi$  oraz 0. Strefy te odpowiadają odpowiednio ustalonej grubości papieru lub pustej przestrzeni. Kolejne papierowe pierścienie są więc zawieszane w powietrzu i muszą być odpowiednio podtrzymane. W proponowanym projekcie rozwiązano to za pomocą czterech cienkich, papierowych linii przechodzących przez środek struktury. Zbadany został wpływ elementów stabilizujących strukturę na jej działanie przy różnych warunkach oświetlenia, co zostało również potwierdzone w badaniach eksperymentalnych.

Szczegółowo zostały przebadane różne rodzaje papieru jako materiału wprowadzającego odpowiednie opóźnienie fazowe, a jednocześnie charakteryzującego się niskim tłumieniem. Dzięki użyciu terahercowej



spektroskopii w dziedzinie czasu możliwe było wyznaczenie zarówno współczynnika załamania, jak i współczynnika absorpcji badanych materiałów w zakresie częstotliwości od 0,1 THz do 1,5 THz. Wprowadzenie odpowiedniego opóźnienia fazowego wiąże się z odpowiednią grubością struktury obliczoną również na podstawie konkretnej wartości współczynnika załamania, a co za tym idzie konieczne jest użycie kilku/kilkunastu arkuszy wykonanych z papieru. z tego względu przeanalizowany został wpływ zastosowania kleju oraz zilustrowany i opisany został efekt, jaki wprowadzają niepożądane warstwy powietrza obecne w takiej strukturze (Rys. 6).



Rysunek 7: Wyniki eksperymentalne (a) w porównaniu z wynikami symulacji skanowanej struktury (b) i przypadku idealnego, czyli symulacji odtworzenia struktury bez połączeń pomiędzy strefami (c).

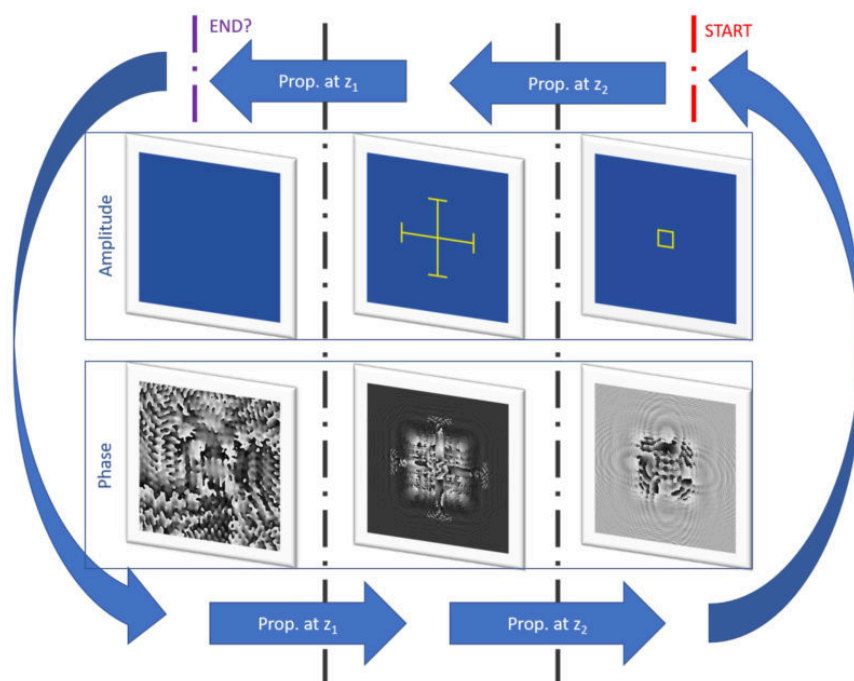
Praca opisuje szereg symulacji komputerowych pozwalających na jak najwierniejsze odwzorowanie warunków eksperymentalnych oraz umożliwia porównanie z idealnymi warunkami projektowymi. Na szczególną uwagę zasługuje fakt bardzo dużej zgodności wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji zawierającej rzeczywiste parametry układu pomiarowego (Rys. 7). Pozwala to na projektowanie dedykowanych terahercowych elementów optycznych z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów danego układu optycznego.

W pracy **H4 nowatorskie było określenie optymalnego sposobu produkowania terahercowych dyfrakcyjnych elementów optycznych** z papieru z uwzględnieniem **rzeczywistych parametrów układu i rzeczywistych możliwości produkcji struktur**. Dodatkowo na etapie projektowania uwzględniony został wpływ optycznych parametrów materiałowych, takich jak współczynnik załamania i współczynnik absorpcji dla różnego rodzaju papierów, które zostały wyznaczone w układzie terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu i odpowiednio zinterpretowane. **Nowatorskie jest też podejście uwzględniające parametry rzeczywistego układu optycznego** do projektowania dedykowanych terahercowych dyfrakcyjnych elementów optycznych.

**[H5] Mateusz Surma, Izabela Ducin, Przemysław Zagrajek, Agnieszka Siemion. „Sub-terahertz computer generated hologram with two image planes”. Applied Sciences, 9(4):659, 2019**

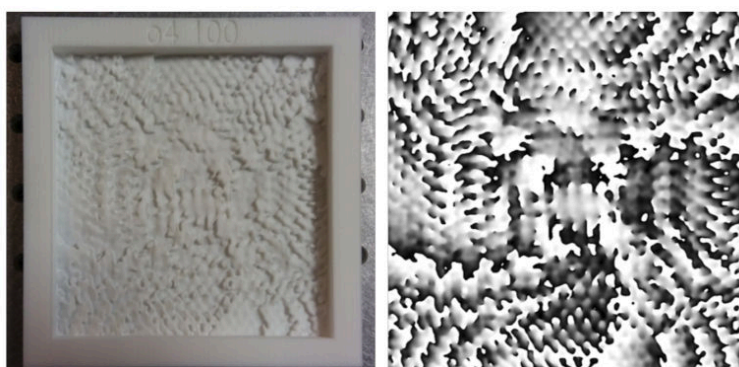
Ogromną dowolność kształtowania rozkładów pola daje iteracyjne projektowanie elementów. Metoda ta polega na naprzemiennej propagacji promieniowania między płaszczyzną wejściową układu (strukturą) a wyjściową (płaszczyzną ogniskową), w trakcie którego zachowywana jest informacja o fazie promieniowania. Jednocześnie w obydwu płaszczyznach wymuszany jest odpowiedni rozkład amplitudy promieniowania (odpowiednio rozkład wiązki oświetlającej w płaszczyźnie wejściowej oraz docelowy, zaprojektowany rozkład natężenia w płaszczyźnie wyjściowej). Podobne algorytmy znane są w literaturze jako algorytm Gerchberga-Saxtona [127] lub ping-pong [128]. Podejście takie pozwala na znaczne uniezależnienie się od rozkładu amplitudy oświetlającej (w porównaniu do pojedynczej propagacji wstecznej) oraz na zaprojektowanie struktury pozwalającej na dobre odwzorowanie niemalże dowolnego rozkładu natężenia promieniowania (Rys. 8). Metoda ta oraz jej modyfikacje były wykorzystane do zaprojektowania również innych

terahercowych elementów dyfrakcyjnych omawianych w niniejszym cyklu publikacji H5-H8.



Rysunek 8: Schemat iteracyjnej metody projektowania hologramu syntetycznego (symulacji numerycznej). „Prop” oznacza propagację na określoną odległość.

W publikacji H5 postawiony został kolejny krok dotyczący zaawansowanego kształtowania wiązek terahercowych i został zaprojektowany oraz wykonany terahercowy hologram syntetyczny o dwóch płaszczyznach obrazowych. Zaprojektowana struktura wytwarza obraz w kształcie krzyża w płaszczyźnie bliższej do struktury oraz kwadrat w dalszej. Rozmiar hologramu był mały względem długości fali (około 57 długości fali). Pierwszy z obrazów był zaprojektowany tak, aby był on większy niż apertura hologramu w efekcie powodując pracę w zakresie pozaosiowym. Kwadrat rozmiarem mieścił się w cieniu struktury.

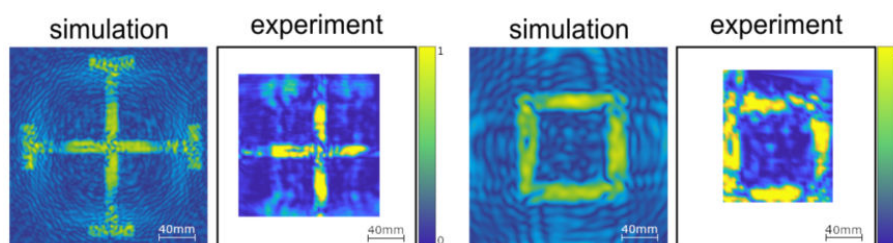


Rysunek 9: Wyprodukowany hologram z poliamidu PA12 metodą spiekania laserowego (po lewej) i jego rozkład fazowy (po prawej), gdzie kolor czarny oznacza przesunięcie fazowe  $0\pi$ , a biały  $2\pi$ .

Do obliczenia rozkładu fazy hologramu (Rys. 9) wykorzystano zmodyfikowaną wersję algorytmu ping-pong, w którym zdefiniowano płaszczyznę hologramu oraz dwie płaszczyzny obrazowe, między którymi przeprowadzana była propagacja. Konkretnie pożądane rozkłady amplitudy były w odpowiednich miejscach wymuszane w algorytmie, aby wynikowy rozkład fazy jak najwydajniej przekierowywał padające promieniowanie w konkretne kształty. Proces iteracyjny miał na celu optymalizację kształtu rozkładu fazowego,

aby otrzymać dwa zadane obrazy w dwóch różnych płaszczyznach za hologramem, które charakteryzować się będą większym kontrastem i mniejszym poziomem szumu tła niż obraz pochodzący z hologramu zakodowanego za pomocą klasycznej propagacji wstecznej.

Struktura została wykonana z wykorzystaniem druku 3D w technologii spiekania laserowego (SLS) z materiału PA12 (Rys. 9). Wyniki eksperymentalne zostały otrzymane z wykorzystaniem skanowania rastrowego w dwóch konfiguracjach: z oświetleniem wiązką rozbieżną oraz z oświetleniem falą w przybliżeniu płaską. Do oświetlenia struktury użyto źródła promieniowania monochromatycznego o częstotliwości 0,17 THz. Dane eksperymentalne zostały porównane z symulacjami. Wykonana struktura zgodnie z symulacjami pozwalała na jednoczesne wyświetlanie dwóch obrazów w dwóch różnych odległościach za hologramem (Rys. 10). Szczegóły pierwszego obrazu występujące poza obrysem struktury odtwarzały się nieco zniekształcone. Publikacja ta potwierdziła możliwość wykonywania skomplikowanych struktur dyfrakcyjnych w technologii druku 3D oraz otworzyła ścieżkę do prac związanych z formowaniem wiązek o bardziej skomplikowanym kształcie. Praca ta również udowodniła, że możliwe jest formowanie wiązek terahercowych do postaci rozkładów zmieniających się jednocześnie w 3 wymiarach.



Rysunek 10: Porównanie wyników symulacji komputerowych z uwzględnieniem rzeczywistego oświetlenia z wynikami eksperymentalnymi. Zrekonstruowane zostały dwa obrazy w dwóch różnych płaszczyznach z jednego hologramu. Przedstawione wartości natężenia są znormalizowane.

Tworzenie terahercowych elementów optycznych jest szczególnie ze względu na fakt, że posiadają one małe apertury w porównaniu do długości fali promieniowania, dla których są one projektowane. Fakt ten wiąże się z występowaniem dużych efektów dyfrakcyjnych, które obecne są w strefie bliskiej Fresnela, a w takiej się w tym przypadku znajdujemy. Dodatkowo mały stosunek średnicy apertury względem ogniskowej bądź odległości, w jakiej powstaje obraz, sprawia, że konieczne jest projektowanie z uwzględnieniem dużych kątów ugięcia wiązek terahercowych w układzie.

**W pracy H5 nowatorskie było zaprojektowanie terahercowego hologramu syntetycznego odtwarzającego obraz w dwóch płaszczyznach, a dodatkowo uzyskanie obrazu większego od apertury hologramu dla promieniowania terahercowego, dla którego już sama apertura wprowadza wiele ograniczeń ze względu na jej rozmiar w stosunku do długości fali. Co więcej zostało zaproponowane zaprojektowanie i wykonanie struktury w taki sposób, że możliwe było uzyskanie poprawnego eksperymentalnego odtworzenia dwóch płaszczyzn obrazowych z hologramu, który miał aperturę mniejszą niż 60 długości fali.**

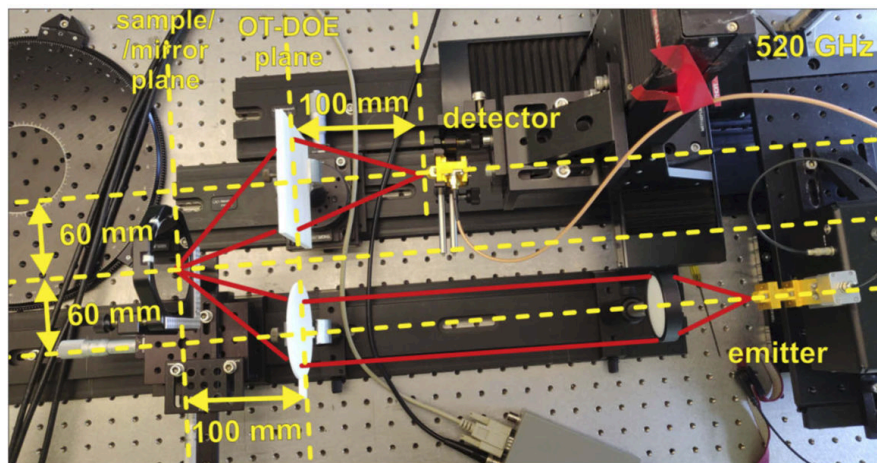
**[H6] Agnieszka Siemion, Paweł Komorowski, Mateusz Surma, Izabela Ducin, Piotr Sobotka, Michał Walczakowski, Elżbieta Czerwińska. „Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup”. *Optics Express*, 28(1):715–723, 2020**

W pracy H6 zaproponowany został układ optyczny wykorzystujący specjalnie zaprojektowane struktury dyfrakcyjne przekierowujące promieniowanie terahercowe poza oś optyczną, a następnie zbierające promieniowanie odbite od próbki i skupiające je na detektorze. Zastosowanie optyki dyfrakcyjnej, a nie zwierciadlanej czy refrakcyjnej w tego typu układzie pozwala na jego zdecydowaną miniaturyzację i możliwość zbliżenia się do badanej próbki. Nowatorska konfiguracja układu obrazującego została uzupełniona



iteracyjnym projektem dedykowanych terahercowych struktur dyfrakcyjnych.

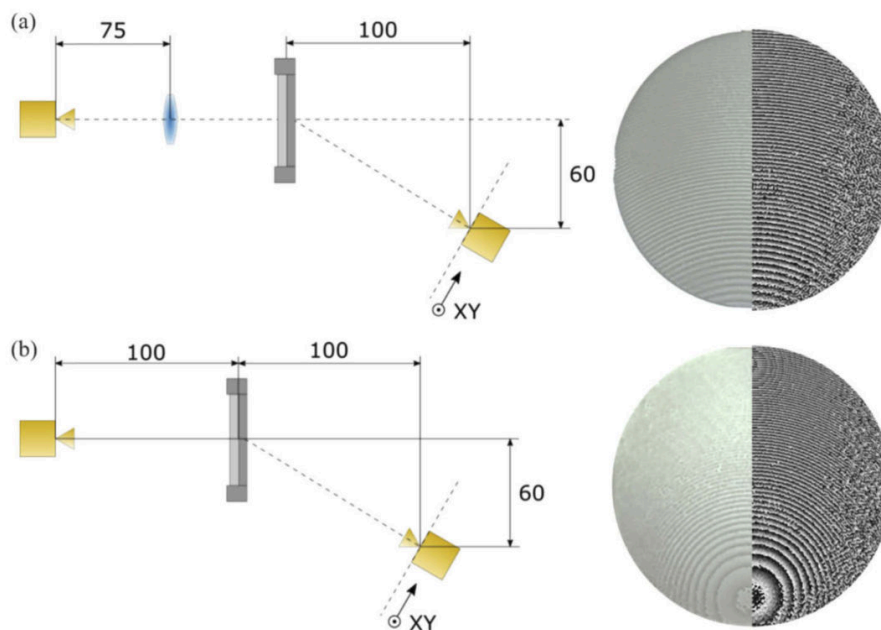
Opisując pierwszą strukturę z pracy [1] (nie dołączonej do cyklu publikacji, ale bardzo istotnej w prowadzonych przeze mnie badaniach) można powiedzieć, że szczególnym kształtowaniem rozkładu natężenia promieniowania terahercowego jest jego przekierowanie w plamkę ogniskową zlokalizowaną nie-poosiowo. Podejście takie odsłania szereg unikalnych własności oraz potencjalnych zastosowań. W pierwszej kolejności należy zauważyć, że struktury dyfrakcyjne projektowane są dla konkretnej długości fali i tylko przy oświetleniu promieniowaniem o odpowiadającej jej częstotliwości będą działały z pełną wydajnością (w pewnych przypadkach, może to zostać również osiągnięte dla wiązek o częstotliwościach harmonicznych w stosunku do podstawowej, jak kinoformy wyższego rzędu). Oznacza to, że jedynie promieniowanie o zadanej częstotliwości zostanie całkowicie przekierowane we właściwe położenie. Struktura dyfrakcyjna tego typu będzie więc działać jako filtr zarówno przestrzenny, jak i częstotliwościowy i może np. umożliwić odseparowanie sygnału terahercowego od szerokopasmowego szumu termicznego [1]. Struktury tego typu mogą zostać również zastosowane w wielu układach i urządzeniach wymagających uzyskania wysokiej gęstości mocy promieniowania terahercowego w ustalonym punkcie przestrzeni. Zastosowanie skupiających nie-poosiowo struktur dyfrakcyjnych w systemach obrazujących pozwala na redukcję wymiarów geometrycznych głowicy skanującej i niwelację aberracji optycznych wynikających z nie-poosiowego działania elementów optycznych opisanych w tej pracy (Rys. 11) i wykorzystanej w rozszerzonej formie również w pracy H7.



Rysunek 11: Układ eksperymentalny ilustrujący zaproponowaną konfigurację odbiciową. Obie struktury zostały specjalnie zaprojektowane do pracy w takiej konfiguracji.

W pracy H6 zaprojektowano soczewki dla częstotliwości 520 GHz, o średnicy 100 mm, skupiające promieniowanie w odległości 100 mm za płaszczyzną struktury oraz 60 mm od głównej osi układu (Rys. 11). Były to struktury fazowe, zakodowane w postaci kinoformu. W artykule H6 omówiona została koncepcja układu oraz metody projektowania i optymalizacji struktur. W pierwszej kolejności zaprojektowano element dyfrakcyjny przekierowujący falę płaską w zadaną plamkę ogniskową. Został on następnie wydrukowany przestrzennie z poliamidu PA12 metodą selektywnego spiekania proszków (SLS). Weryfikacja eksperymentalna wykazała nie tylko poprawne działanie zaprojektowanej struktury, ale też możliwość detekcji różnic we współczynniku załamania materiałów na różnych próbkach (również zbliżonych pod względem parametrów optycznych do ludzkiej skóry) (Rys. 12).

Warto podkreślić, że struktura opisana w pracy [1] została zaprojektowana korzystając z równania analitycznego większej soczewki, z której wycięty został boczny fragment. Natomiast w pracy H6 wykorzystana została iteracyjna metoda projektowania terahercowych elementów optycznych, aby zapewnić poza-osiove skupianie i wymusić mały rozmiar plamki ogniskowej. Dzięki iteracyjnemu sposobowi projektowania elementu dyfrakcyjnego staje się on zoptymalizowany ze względu na powstający rozkład promieniowania,



Rysunek 12: Schemat układu wykorzystywanego do charakteryzowania struktur emitera (a) i detektora (b). Po lewej stronie przedstawiono schematy wykonanych układów optycznych do weryfikacji poprawności działania obu elementów. Po prawej przedstawione są zdjęcia wykonanych elementów wraz z ich zaprojektowanymi mapami opóźnienia fazowego (gdzie czerni i biel odpowiadają przesunięciu fazowemu 0 i  $2\pi$  wprowadzonemu przez dany element).

a także uwzględnia wpływ rozkładu oświetlającego frontu falowego. W pracy H6 opisany został terahercowy układ optyczny pracujący w konfiguracji odbiciowej do badania próbek posiadających fragmenty o różnych współczynnikach załamania (docelowo służący do różnicowania zdrowych tkanek skóry oraz tych ze zmianami nowotworowymi). Różne wartości strat fresnelowskich sprawiają, że odbija się od nich różna ilość światła i dzięki temu możliwe jest rozróżnienie obszarów wykonanych z różnych materiałów. W układzie zaprojektowanym i opisanym w artykule H6 została również zaproponowana metoda przeprowadzania testów rozdzielczości z użyciem materiału odbijającego i materiału o współczynniku załamania ok. 1,5.

W pracy H6 nowatorskie było zaproponowanie układu optycznego wykorzystującego struktury dyfrakcyjne w celu miniaturyzacji objętości elementów optycznych i ich efektywnych ogniskowych. Nowatorskie było zaprojektowanie układu optycznego, dla którego jest możliwe jak największe zbliżenie się do badanej próbki. Projektowanie struktur skupiających poza-osiovo metodami iteracyjnymi pozwoliło na zapewnienie dobrych parametrów plamki ogniskowej.

**[H7] Paweł Komorowski, Mateusz Surma, Michał Walczakowski, Przemysław Zagrajek, Agnieszka Siemion. „Off-axis diffractive optics for compact terahertz detection setup”. Applied Sciences, 10(23):8594, 2020**

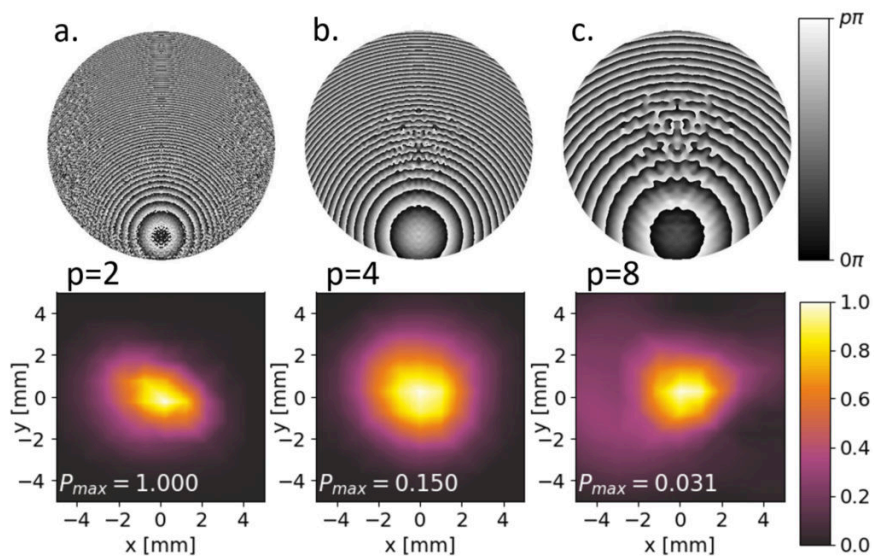
W pracy H7 przedstawiona została optymalizacja działania terahercowych struktur dyfrakcyjnych skupiających nie-poosiowo, dedykowanych konkretnemu zastosowaniu – urządzeniu obrazującemu nowotwory skóry u człowieka opisanemu również w pracy H6 (gdzie omówiona została konfiguracja układu i iteracyjne projektowanie terahercowych struktur dyfrakcyjnych).

Praca H7 dotyczy natomiast możliwości wykorzystania zalet druku 3D również dla innych częstotliwości terahercowych oraz materiałów, a także dalszej optymalizacji struktury poprzez uzyskanie przekierowania

promieniowania z punktu w punkt (a nie jak w pracy H6 z wykorzystaniem dodatkowego kolimatora). W ramach publikacji H7 przeanalizowano alternatywne możliwości projektowania soczewek pozaosiowych i wykazano możliwość znaczącej poprawy wielkości i kształtu ogniska przy wykorzystaniu iteracyjnych algorytmów optymalizacyjnych. Pokazano również, że zastosowanie kinoformów wyższych rzędów pozwala na zwiększenie rozmiarów stref soczewki i jej najmniejszych detali (Rys. 13), przy jednoczesnym utrzymaniu parametrów geometrycznych plamki ogniskowej (procedura opisana w pracy H2). Metoda ta pozwala z jednej strony na zastosowanie metod druku 3D o mniejszej rozdzielczości, ale szybszych i tańszych, a z drugiej umożliwia ich wykorzystanie również dla wyższych częstotliwości (ponad 0,5 THz) – wykorzystane zostały badania opisane w pracy H2 w konkretnym terahercowym układzie optycznym.

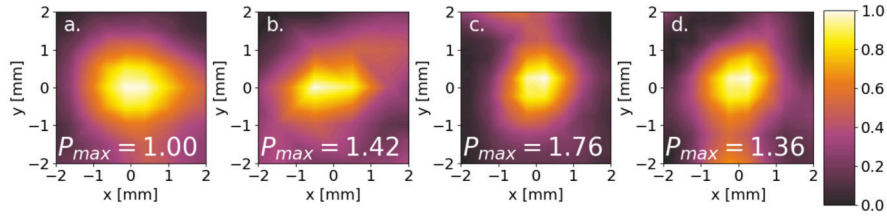
W dalszej kolejności pokazano również możliwość wykorzystania unikalnej techniki polegającej na druku przestrzennym form, będących negatywem struktury, a następnie wypełnieniu ich uplastycznionym materiałem (w tym przypadku parafiną). Takie podejście umożliwia połączenie zalet druku przestrzennego z dobrymi parametrami optycznymi mniej typowych materiałów (opisanych wcześniej w pracy H2). W artykule H7 pokazano, że niepoosiowe soczewki wykonane z różnych rodzajów parafin pozwalają na uzyskanie plamek ogniskowych o zbliżonych parametrach geometrycznych, ale wyższej mocy promieniowania w porównaniu do ogniska uzyskanego za soczewką drukowaną bezpośrednio z PA12 (Rys. 14). Również w pracy H7 została określona zależność wiążąca kołowość plamek ogniskowych oraz odchylenie wiązki względem długości ogniskowej.

W pracy H7 nowatorskie było wykorzystanie metod opisanych we wcześniejszych artykułach tworzących cykl w dedykowanym terahercowym układzie optycznym. Nowatorską była optymalizacja parametrów układu odbiciowego na podstawie symulacji komputerowych określających kształt struktury dyfrakcyjnej oraz **określenie zależności pomiędzy możliwością skracania odległości ogniskowej przy zachowaniu tej samej odległości ogniskowej, a parametrami geometrycznymi wiązki (wielkość i kołowość).**



Rysunek 13: Porównanie map opóźnień fazowych (górny rząd) przedstawiających kinoformy: (a) pierwszego, (b) drugiego oraz (c) czwartego rzędu. Zarejestrowane rozkłady natężenia w płaszczyznach ogniskowych zostały znormalizowane (dolny rząd). Wszystkie obrazy natężenia są znormalizowane do jedności, podczas gdy maksymalna moc wykryta dla każdej struktury w odniesieniu do wartości zarejestrowanej dla kinoformu pierwszego rzędu (a) jest oznaczona jako  $P_{max}$ .





Rysunek 14: Pozaosiowe ogniska uzyskane dla: (a) soczewki z poliamidu PA12, (b) soczewki z przezroczystej parafiny, (c) soczewki z białej parafiny i (d) soczewki wykonanej z ponownie użytej parafiny. Wszystkie obrazy są znormalizowane do jedności, podczas gdy maksymalna moc wykryta dla każdej struktury w odniesieniu do soczewki z PA12 jest oznaczona jako  $P_{max}$ .

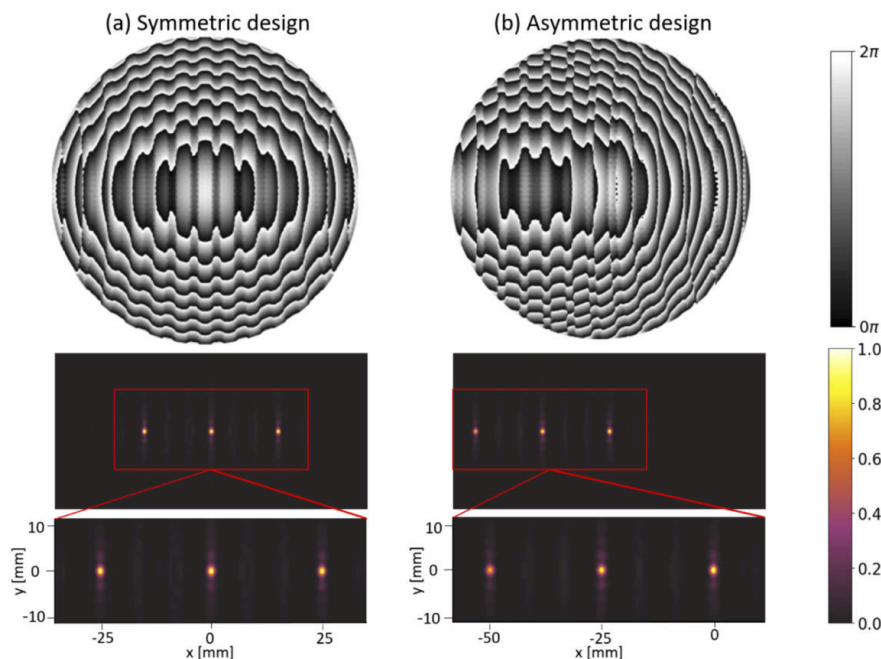
[H8] Paweł Komorowski, Patrycja Czerwińska, Mateusz Surma, Przemysław Zagrajek, Ryszard Piramidowicz, Agnieszka Siemion. „Three-focal-spot terahertz diffractive optical element – iterative design and neural network approach”. *Optics Express*, 29(7):11243–11253, 2021

Konfiguracja wykorzystująca nie-poosiowe przekierowywanie promieniowania THz opisane w publikacjach H6 i H7, a także publikacji [1] odnosiła się do zastosowań w obrazowaniu medycznym oraz do swojego rodzaju filtracyjnego działania i poza-osiowego skupiania konkretnej długości fali w przypadku komór kriostatów.

Natomiast w publikacji H8 iteracyjna metoda projektowania została wykorzystana do generacji soczewek trój-ogniskowych mogących znaleźć zastosowanie w dziedzinie telekomunikacji. Rozważano struktury skupiające promieniowanie w trzy punkty ogniskowe znajdujące się w jednej płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny struktury w symetrycznym i asymetrycznym rozkładzie względem osi optycznej (Rys. 15). Elementy te mogą znaleźć zastosowanie w systemach, w których celowe jest zwiększenie szybkości transmisji danych (np. tomografia terahercowa). Różne odległości poszczególnych ognisk od środka struktury przekładają się na różne czasy przelotu promieniowania, co pozwala na rozróżnienie sygnałów propagujących się w różnych szczelinach czasowych. Struktury realizujące obydwa rozkłady punktów zostały zoptymalizowane z wykorzystaniem algorytmu iteracyjnego i wytworzone z materiału PA12 metodą druku przestrzennego, spiekania laserowego. Weryfikacja eksperymentalna wykazała działanie zgodne z przewidywaniami teoretycznymi, wskazując również ograniczenia metody pomiarowej. Więcej uwagi zostało poświęcone strukturze asymetrycznej, ze względu na różne czasy przelotu promieniowania między środkiem struktury a wszystkimi ogniskami, a więc strukturze, która może znaleźć większy potencjał aplikacyjny. Co więcej, asymetryczny rozkład plamek ogniskowych jest efektywnie możliwy do uzyskania jedynie poprzez iteracyjną optymalizację. Wyznaczenie kształtu struktury na podstawie analitycznych równań teoretycznych jest niewystarczające.

Dla opisywanej w pracy H8 struktury trójogniskowej pokazano dodatkowo nowatorską metodę optymalizacji bazującą na splotowej dyfrakcyjnej sieci neuronowej (Rys. 16). Metoda splotu, często wykorzystywana w automatycznej analizie obrazów, tutaj została wykorzystana do symulacji propagacji promieniowania. Optymalizacja struktur przebiega poprzez uczenie sieci, bazujące na wstecznej propagacji błędów. Warto tu zwrócić uwagę na ciekawą zbieżność pojęciową i koncepcyjną między wsteczną propagacją błędów w sieci neuronowej, a wsteczną propagacją promieniowania w algorytmie iteracyjnym. W tym pierwszym przypadku informacja przekazywana na wejście układu jest jednak szersza i uwzględnia różnicę pomiędzy uzyskanym a docelowym rozkładem natężenia, a nie jedynie o rozkładzie docelowym. Podejście takie pozwala na zaprojektowanie unikalnych map fazowych, niemożliwych do uzyskania innymi metodami, które jednak pozwalają na przekierowanie promieniowania w ustalone rozkłady natężenia w sposób zbliżony, a niejednokrotnie lepszy, niż struktury projektowane metodami klasycznymi (również z wykorzystaniem algorytmu iteracyjnego). W pracy H8 zjawisko to zostało również zaobserwowane na przykładzie struktur





Rysunek 15: Rozkład fazowy obliczonych DOE (górny panel) i rozkłady natężenia w płaszczyźnie ogniskowej - symulacja komputerowa (panel środkowy). Rozkład fazowy wprowadzony przez struktury zakodowane jest w skali szarości, gdzie czarny odpowiada przesunięciu fazowemu 0, a biały przesunięciu o  $2\pi$ . W rozkładzie natężenia powstałych ognisk kolor czarny odpowiada minimalnemu, natomiast jasność maksymalnemu natężeniu, znormalizowanemu do jedności. Środkowy panel jest w skali z soczewkami i ilustruje geometrię utworzonych plamek ogniskowych. Dolny panel przedstawia powiększone obszary ogniska zaznaczone czerwonym prostokątem na środkowym panelu.

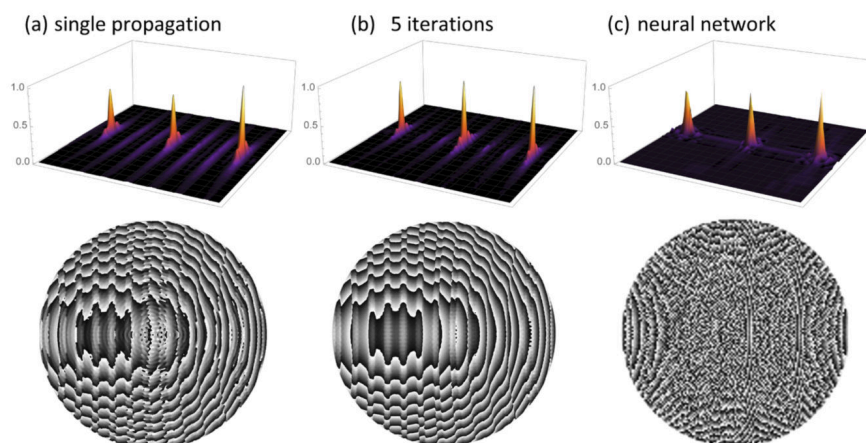
dyfrakcyjnych o bardzo odmiennych kształtach, lecz realizujących zbliżone zadania. Przedstawione zostały wyniki optymalizacji kształtu struktury z wykorzystaniem sieci neuronowej.

W pracy **H8 nowatorskie było** wykorzystanie terahercowych struktur dyfrakcyjnych tworzących 3 plamki ogniskowe **do celów telekomunikacyjnych (multipleksacja)**, wykorzystanie struktury o **asymetrycznym rozkładzie plamek ogniskowych**, aby móc rozróżnić 3 sygnały pod względem czasowym oraz zaproponowanie algorytmu projektowania struktur formujących 3 plamki ogniskowe z wykorzystaniem **sieci neuronowej**.

**[H9] Agnieszka Siemion. „Terahertz diffractive optics – smart control over radiation”. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 40(5):477–499, 2019**

Praca H9 jest zaproszonym przez edytora artykułem przeglądowym w bardzo uznanym w dziedzinie terahercowej czasopiśmie „Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves”. Edytorem czasopisma jest Prof. Martin Koch z Philipps Universität Marburg. Publikacja stanowi podsumowanie osiągnięć naukowych w dziedzinie terahercowej optyki dyfrakcyjnej z podziałem na rodzaje elementów, ale także na czas powstania publikacji. Publikacja ilustruje podstawowe elementy dyfrakcyjne, ale także elementy bardziej zaawansowane, jak terahercowe hologramy oraz struktury meta-materiałowe.

W pracy H9 opisałam proces projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych z uwzględnieniem różnych rodzajów kodowania obliczonych rozkładów fazowych i analizą ich wydajności dyfrakcyjnych (Rys. 17). Po zdefiniowaniu zakresu częstotliwości, które brałam pod uwagę i określeniu co to są dyfrakcyjne elementy optyczne, następuje opis pierwszych elementów będących płytkami strefowymi Fresnela. Kolejno



Rysunek 16: Wykresy 3D rozkładu natężenia w płaszczyźnie ogniskowej (panel górny) i mapy opóźnień fazowych (panel dolny) opisujące trzy różne struktury zaprojektowane przy użyciu: (a) pojedynczej propagacji, (b) iteracyjnej optymalizacji metodą splotową opartej na algorytmie Gerchberga-Saxtona (GS) i (c) podejścia do optymalizacji z użyciem sieci neuronowej. Wpływ apertury kołowej przejawia się w besselow-skim kształcie punktów (prawie na poziomie szumu w przypadku struktury optymalizowanej z użyciem sieci neuronowej).

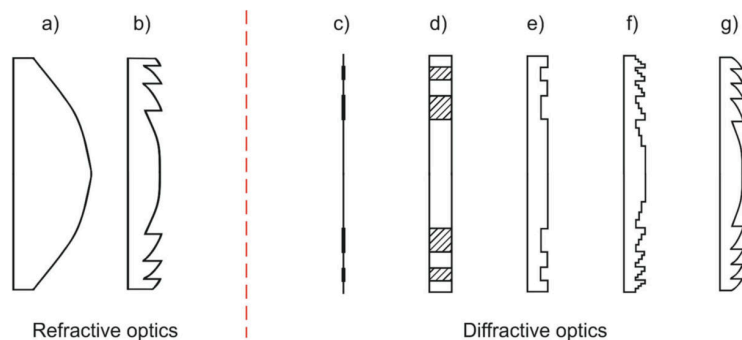
opisałam siatki dyfrakcyjne i różne dodatkowe efekty z nimi związane, jak np. efekt cienia, jak również różne ich zastosowania.

W kolejnej części pracy usystematyzowałam nazewnictwo i określiłam podział na typy elementów dyfrakcyjnych, którego używałam w dalszej części pracy. Wyjaśniona i zilustrowana została różnica pomiędzy elementami refrakcyjnymi i dyfrakcyjnymi oraz opisane zostały różne grupy terahercowych elementów dyfrakcyjnych tworzonych na przełomie kolejnych lat. Uwzględnione zostały macierze soczewek jako swojego rodzaju oddzielna grupa elementów dyfrakcyjnych, a następnie dość szczegółowo opisane zostały zaawansowane terahercowe elementy dyfrakcyjne, takie jak na przykład elementy tworzące wiązki bezdyfrakcyjne lub wiry optyczne.

Warto podkreślić, że w zakresie promieniowania terahercowego możliwe jest również dynamiczne wyświetlanie pożądanego rozkładu pola, co zostało opisane w części dotyczącej terahercowych przestrzennych modulatorów światła (w tym miejscu bardziej zasadne byłoby użycie słowa promieniowanie, jednak angielska nazwa spatial light modulator jest tłumaczona z użyciem wyrazu światło). Z tematem tym wiąże się częściowo kolejna grupa elementów dyfrakcyjnych, jakimi są terahercowe hologramy. W tym rozdziale opisane zostały różne metody projektowania terahercowych hologramów generowanych komputerowo.

Na końcu zdecydowałam się na opisanie również nieco bardziej ekscentrycznej metody projektowania płaskich elementów. Wiele zespołów badawczych opisuje elementy optyczne projektowane w postaci meta-materiałów albo struktur sub-falowych, które ze względu na zasadę działania różnią się od optyki dyfrakcyjnej, nie mniej jednak stanowią bardzo interesującą i obiecującą grupę płaskich elementów optycznych.

Podsumowując, warto zauważyć, że rozwój i możliwe zastosowania promieniowania THz w przemyśle, czy życiu codziennym będą możliwe tylko, gdy uda się zaprojektować wydajne i dedykowane układy optyczne. Nie będą one jednak działały bez odpowiednich emiterów i detektorów, ale także bez odpowiedniej optyki. Widać również ten trend w ilości publikacji dotyczących coraz bardziej zaawansowanych terahercowych elementów optycznych (w wielu przypadkach dyfrakcyjnych, a także meta-materiałowych) gdzie istotne są ich niewielkie grubości.



Rysunek 17: Soczewki refrakcyjne (a, b) i dyfrakcyjne (c–g). Soczewki refrakcyjne projektowane są używając biegu promieni (ang. ray tracing) i uwzględniają jedynie zjawisko refrakcji. Soczewki dyfrakcyjne mają za zadanie utworzyć zadany rozkład fazy po przejściu przez element, a zatem projektowane są z użyciem podejścia falowego. Od lewej: (a) soczewka refrakcyjna, (b) Soczewka Fresnela (nie używana w zakresie promieniowania THz), (c) Płytkę strefową Fresnela – binarna amplitudowa, (d) płaska płytka strefowa z dwoma materiałami dielektrycznymi – struktura utworzona z dwóch materiałów o różnych współczynnikach załamania, co odpowiada fazowej siatce binarnej, (e) płytka fazowa binarna, (f) wielostopniowa fazowa płytka strefowa, (g) kinoform (soczewka dyfrakcyjna Fresnela). Struktura (b) i (g) różnią się znacząco, pierwsza jest projektowana z uwzględnieniem biegu promieni, druga uwzględniając teorię falową i dyfrakcję.

Stopień zaawansowania proponowanych bezpośrednio przeze mnie, ale także przez zespół naukowy, razem z którym prowadzę badania, rozwiązań dotyczących dyfrakcyjnej optyki terahercowej na tle rozwiązań proponowanych w danym czasie przez inne ośrodki badawcze jest wysoki. W pracach przedstawionych zarówno w cyklu publikacji, jak i w pozostałych pracach mojego zespołu, w których brałam udział opisane zostało wiele nowatorskich rozwiązań, co zostało docenione przez głównego edytora czasopisma „Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves” i zakończyło się przygotowaniem niniejszego zaproszonego artykułu przeglądowego. W pracy **H9 przedstawiłam nowatorskie podejście do opisu terahercowych elementów optycznych, które są elementami dyfrakcyjnymi**. Terahercowe elementy dyfrakcyjne początkowo były głównie opisywane jedynie jako fragmenty anten, a z czasem zaczęły ewoluować w odrębne struktury. W pracy H9 pogrupowałam osiągnięcia naukowe według podziału właściwego elementom dyfrakcyjnym, uwzględniając ich proces projektowania, pełnionej funkcji i stopnia zaawansowania formowania wiązki padającej. **Wyróżniłam też dwie dodatkowe grupy** nie będące elementami dyfrakcyjnymi – **przestrzenne modulatory promieniowania** (SLM – ang. spatial light modulator) oraz **struktury sub-falowe i metamateriały**, które odpowiednio formują fronty falowe, ale nie są ściśle optycznymi elementami dyfrakcyjnymi. Warto podkreślić, że typowo dyfrakcyjne podejście do optyki terahercowej nie było rozważane, a jedynie stosowane w ograniczonych zakresach.

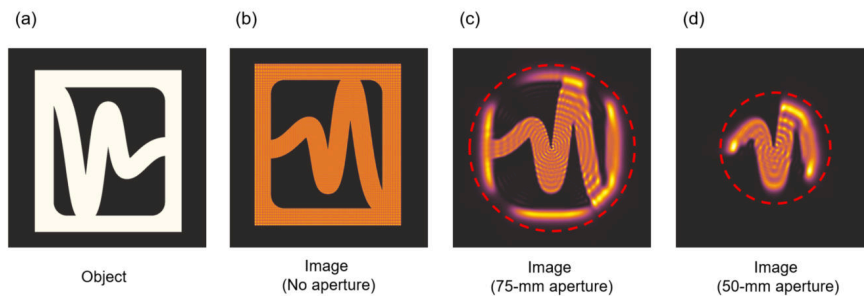
**[H10] Agnieszka Siemion. „The magic of optics – an overview of recent advanced terahertz diffractive optical elements”. Sensors, 21(1):100, 2020**

Praca H10 jest zaproszonym artykułem przeglądowym dotyczącym projektowania terahercowych elementów optycznych. Edytor wydania specjalnego, Prof. Ginataras Valušis z Centrum Nauk Fizycznych i Technologii (FTMC) w Wilnie, zaproponował mi napisanie tego artykułu z podkreśleniem nowatorskich trendów bardzo szybko rozwijającej się terahercowej optyki dyfrakcyjnej i jej cech charakterystycznych związanych z konkretnym zakresem używanych częstotliwości. Dodatkowo warto podkreślić, że praca H10 została wyróżniona jako „Feature paper”.

Praca H10 podzielona jest na kilka części dotyczących kolejno poruszanych zagadnień, takich jak cechy

charakterystyczne procesu produkcji elementów optycznych dla tego zakresu promieniowania, projektowanie klasycznych elementów dyfrakcyjnych, omówienie zagadnień związanych z projektowaniem takich elementów dla zakresu promieniowania THz. Następnie omówione zostały elementy skupiające padające na nie promieniowanie, kolejno opisane zostały elementy formujące wiązki bezdyfrakcyjne oraz takie przekierowujące padające promieniowanie również poza główną oś optyczną. Kolejna część opisuje algorytmy optymalizacyjne i podejście wykorzystujące sieci neuronowe, a na końcu znajduje się podsumowanie i wnioski.

W pracy poruszona jest problematyka dotycząca projektowania terahercowych elementów optycznych, co stanowi ogromne wyzwanie ze względu na zakres będący połączeniem dwóch nakładających się na siebie światów fizycznych (optyki i elektroniki). Z jednej strony musimy walczyć z ogromnymi efektami dyfrakcyjnymi wynikającymi z małych rozmiarów apertury w porównaniu z długością fali analizowanego promieniowania (Rys. 18). Jednocześnie często musimy walczyć z niepożądanymi interferencjami w układzie powodowanymi przez bardzo koherentne źródła promieniowania, a równocześnie zmagamy się z bardzo szerokim zakresem częstotliwości THz emitowanych np. w systemach terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu, wielokrotnie przewyższającym zakres częstotliwości promieniowania widzialnego. Korzystając z różnych terahercowych materiałów optycznych, prostoty i dostępności technik produkcyjnych i stosunkowo dużych długości fali – terahercowe dyfrakcyjne elementy optyczne mogą odnaleźć wiele zastosowań.



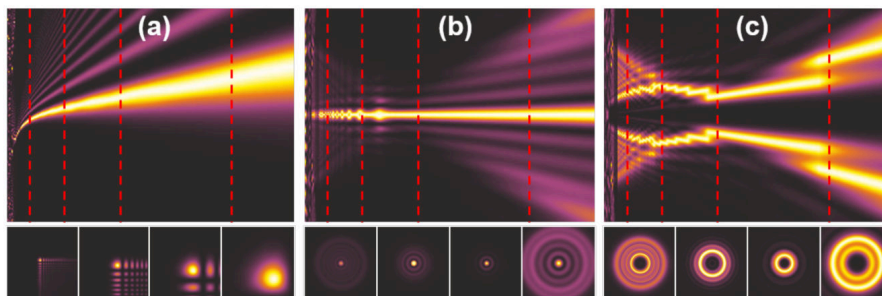
Rysunek 18: (a) Przykładowy obiekt wykorzystywany w symulacjach dla promieniowania o częstotliwości 0,3 THz. (b) Obraz uzyskany w układzie obrazującym 4f zakładając brak apertury soczewek, tylko wielkość macierzy obliczeniowej. (c) Obraz uzyskany w układzie obrazującym 4f przy założeniu apertury soczewki ograniczonej do 75 mm (oznaczona czerwoną linią przerywaną) (d) Obraz uzyskany w układzie obrazującym 4f przy założeniu apertury soczewki ograniczonej do 50 mm (oznaczona czerwoną linią przerywaną). Obrazy są odwrócone we wszystkich przypadkach. Prezentowany obszar odpowiada kwadratowej powierzchni 90 mm x 90 mm wyciętej z macierzy obliczeniowej o rozmiarze 204,8 mm x 204,8 mm.

W części dotyczącej klasycznego projektowania elementów dyfrakcyjnych podkreślam, że sama metoda projektowania, oparta na skalarnej teorii dyfrakcji, może być łatwo przeskalowana dla różnych zakresów częstotliwości - optycznych, mikrofalowych, podczerwonych, ultrafioletowych, terahercowych. Każdy z tych zakresów jednak zdecydowanie różni się ze względu na dostępność materiałów posiadających odpowiednie współczynniki załamania i absorpcji dla danego zakresu promieniowania. Rozpatrując szeroki zakres spektralny promieniowania THz musimy zdawać sobie sprawę z możliwości produkcyjnych różnych technologii umożliwiających wytworzenie terahercowych elementów dyfrakcyjnych. W zakresie terahercowym można rozróżnić dwa bieguny: pierwszy, wykorzystujący technologię druku 3D i różne materiały polimero-podobne, a drugi, wykorzystujący bardziej zaawansowane techniki wytwarzania oparte na krzemie (takie jak trawienie czy ablacja). W przypadku krzemu należy pamiętać o strukturach antyrefleksyjnych ze względu na duży współczynnik załamania tego materiału. Te dwie grupy metod produkcji są dwoma różnymi podejściami, które mogą się wzajemnie przenikać dzięki zastosowaniu przezroczystych materiałów (bez dyspersji w zakresie terahercowym) wraz z projektowaniem elementów jako kinoformy wyższego rzędu. Jest to bardzo interesujące rozwiązanie, które może zostać rozszerzone na wyższe rzędy kinoformów, a tym samym na wyższe częstotliwości terahercowe. Jedynym istotnym ograniczeniem w tym przypadku jest przezroczy-



stość stosowanego materiału dla całego zakresu rozważanych częstotliwości. Dodatkowo, niezwykle istotna staje się rozdzielczość i dokładność konkretnych technik produkcji, aby móc wyprodukować dobrej jakości elementy optyczne.

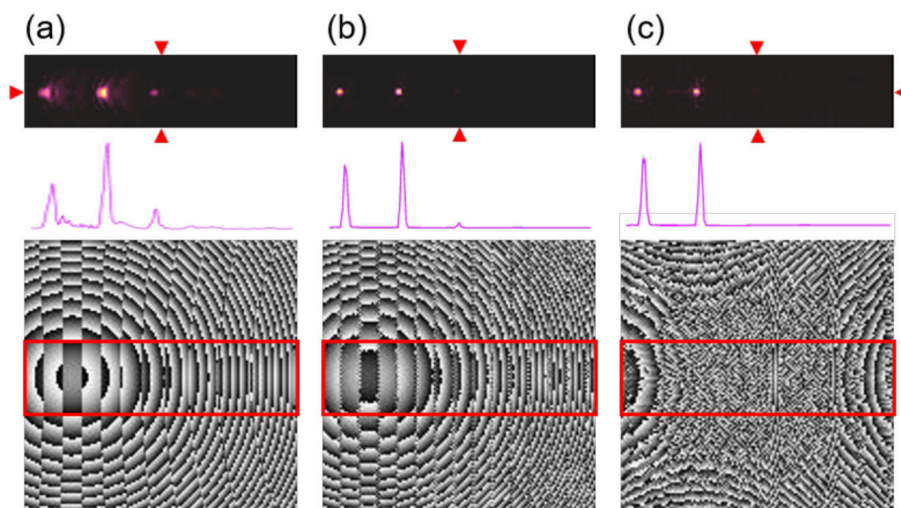
Kolejne części opisują najnowocześniejsze osiągnięcia terahercowej optyki dyfrakcyjnej, której ogromna przewaga nad rozwiązaniami refrakcyjnymi polega na możliwości realizacji struktur o dużych aperturach, krótkich odległościach ogniskowych z jednoczesnym zachowaniem małych grubości elementów. Takie elementy mogą pozwolić na zastosowanie systemu do obrazowania lub skanowania, w którym obrazowanie z płaszczyzny do płaszczyzny musi być wykonywane przez układ optyczny. Metody skanowania rastrowego nigdy nie pokonają szybkości natychmiastowego formowania obrazu w całej płaszczyźnie. Dużą zaletą opisywanych elementów dyfrakcyjnych jest możliwość formowania padającego promieniowania w zadane kształty (Rys. 19). Co więcej, projektowanie elementów dyfrakcyjnych umożliwi również poprawne funkcjonowanie elementów poza osią optyczną, a także możliwości tworzenia bardziej skomplikowanych struktur optycznych lub ogniskowych, a także przekierowywaniu padającego promieniowania. Terahercowe struktury dyfrakcyjne realizujące takie różnorodne funkcje zostały opisane i zilustrowane w pracy H10 z omówieniem różnic pomiędzy nimi, ich zalet oraz ograniczeń (Rys. 19).



Rysunek 19: Rozkłady natężenia opisujące: (a) wiązkę Airy, (b) wiązkę Bessela i (c) wiązkę generującą wiry optyczne. Górny panel ilustruje propagację wzdłuż osi optycznej – płaszczyzna  $yz$ , natomiast dolny panel odpowiada przekrojom  $xy$  w odległościach za elementem optycznym oznaczonymi czerwonymi przerywanymi liniami. Struktura dyfrakcyjna znajduje się na lewej krawędzi rozkładów  $yz$ .

Cały rozdział pracy H10 został poświęcony metodom optymalizacji używanym przy projektowaniu terahercowych elementów dyfrakcyjnych. Całą różnorodność rozwiązań optycznych oferowanych przez optykę dyfrakcyjną można wzbogacić i udoskonalić, wykorzystując algorytmy optymalizujące oraz projektowanie z wykorzystaniem sieci neuronowych oraz głębokiego uczenia lub systemów optycznych opartych na sztucznej inteligencji. Opisane tutaj zostały różne podejścia do optymalizowania kształtu projektowanych elementów. Szczególnym przypadkiem jest tutaj użycie sieci neuronowych, które do tej pory w dziedzinie terahercowej używane były do tworzenia np. układów rozróżniających obraz wyświetlony na wejściu czy zaprojektowania filtra spektralnego. W pracy H10 przedstawiłam symulacje komputerowe, które zilustrowały różnice w otrzymanym rozkładzie natężenia oraz w kształcie struktury dyfrakcyjnej w zależności od projektowania danego elementu metodą analitycznego wyliczenia jego kształtu, metodą iteracyjną oraz metodą używającą sieć neuronową (Rys. 20). Zastosowanie sieci neuronowych do projektowania zoptymalizowanego rozkładu fazy elementu dyfrakcyjnego zostało opisane po raz pierwszy w pracy H10, a następnie w pracy H8 zostały przeprowadzone symulacje innego elementu również z wykorzystaniem optymalizacji z użyciem sieci neuronowych oraz weryfikacja eksperymentalna wykonanej struktury.

Praca H10 jest publikacją przeglądową i w pewnym sensie instruktażową, albowiem opisuje charakterystykę projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych właśnie dla zakresu promieniowania THz. **Wszystkie zamieszczone w pracy symulacje zostały wykonane bezpośrednio na potrzeby tej publikacji.** Warto podkreślić, że mimo przeglądowego charakteru pracy, zawiera ona również **element nowatorskości w postaci pierwszych wyników symulacji komputerowych optymalizujących**



Rysunek 20: Porównanie różnych metod projektowania DOE — (a) teoretyczne równania soczewek pozaosiowych z przesunięciem 25 mm i 50 mm, (b) algorytm iteracyjny i (c) optymalizacja rozkładu fazowego z użyciem sieci neuronowej. Obliczone rozkłady fazowe struktur dyfrakcyjnych są pokazane jako obraz w skali szarości (dolny panel) odpowiadający wprowadzeniu opóźnienia fazy od 0 (czarny) do  $2\pi$  (biały). Na górnym panelu znajdują się odtworzone rozkłady natężenia w płaszczyznach ogniskowych elementów. Zrekonstruowany obszar miał taką samą wielkość jak struktura, ale tutaj został ograniczony do obszaru zaznaczonego czerwonymi prostokątami na mapach opóźnienia fazowego. Przekroje wzdłuż osi poziomej przecinające główną oś optyczną (zaznaczone czerwonymi trójkątami) pokazano na środkowym panelu.

**kształt struktury algorytmem opartym o sieć neuronową.** Praca zawiera również zmierzone parametry optyczne wielu materiałów, które nie były do tej pory opublikowane w literaturze. Pomiary te wykonane były techniką terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. **Warto również podkreślić, że praca H10 została wyróżniona jako „Feature paper”.**

## 5.4 Podsumowanie i wnioski

W pracach stanowiących podstawę niniejszego wniosku habilitacyjnego szczegółowo zbadałam możliwości projektowania struktur dyfrakcyjnych dla pasma terahercowego, w tym opracowałam metody formowania wiązek terahercowych w różne predefiniowane kształty. Zaproponowałam alternatywne i nowatorskie metody wytwarzania elementów dyfrakcyjnych dla pasma promieniowania THz. W ramach prac zawartych w niniejszym wniosku habilitacyjnym przeprowadziłam spójne i szeroko zakrojone badania dotyczące przekierowania promieniowania terahercowego poza oś optyczną. Zaproponowane zostały przede mną różne metody projektowania struktur dyfrakcyjnych skupiających promieniowanie poza osią optyczną - takie jak wykorzystanie rozwiązań analitycznych dla przypadków uwzględniających duże kąty ugięcia, propagacja wstecz, metody iteracyjne, czy optymalizacja kształtu za pomocą sieci neuronowych.

**Najważniejsze wnioski płynące z tych badań można zawrzeć w następujących punktach:**

- projektowanie terahercowych elementów dyfrakcyjnych wiąże się z uwzględnieniem propagacji w strefie bliskiej Fresnela, w której obserwujemy ogromny wpływ dyfrakcji,
- projektowane terahercowe elementy dyfrakcyjne mają małe apertury jeżeli porównujemy je do długości fali promieniowania, a co za tym idzie ilość informacji zakodowana w danym elemencie jest niewspółmiernie mniejsza niż w przypadku analogicznych elementów projektowanych dla światła widzialnego,

- wytwarzanie terahercowych elementów dyfrakcyjnych nie jest już ściśle powiązane tylko z trawieniem, bądź ablacją, albowiem dzięki projektowaniu elementów jako kinofornie wyższego rzędu możemy wykorzystywać w szerokim zakresie częstotliwości druk 3D, a także odlewanie, wycinanie laserowe czy toczenie,
- efektywne działanie terahercowych elementów dyfrakcyjnych wiąże się z materiałami o odpowiednich parametrach optycznych, dlatego warto szukać nowych materiałów - jak np. zaproponowana parafina, która ma mniejszy współczynnik absorpcji niż wiele materiałów wykorzystywanych do druku 3D, co pozwala zwiększyć ilość przechodzącego przez dany element promieniowania, a jednocześnie umożliwia dalsze korzystanie z prostej metody druku 3D do wyprodukowania formy, która może zostać wypełniona płynnym materiałem.

Publikacje H1–H10 przedstawiają wyniki interdyscyplinarnych prac, poświęconych projektowaniu i wytwarzaniu terahercowych dyfrakcyjnych elementów optycznych dedykowanych do konkretnych układów optycznych i zastosowań. Prace te dokumentują rozwój moich zainteresowań naukowych dotyczących w szczególności projektowania i optymalizowania terahercowych układów optycznych z wykorzystaniem optyki dyfrakcyjnej.

**Do najważniejszych osiągnięć opisanych w cyklu publikacji H1–H10, które stanowią podstawę wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego zaliczam:**

- zaproponowanie zastosowania materiałów fazowych (takich jak różnego rodzaju papiery, parafiny, woski, poliamidy używane do druku 3D) pozwalających na efektywną i opłacalną kosztowo produkcję terahercowych dyfrakcyjnych elementów optycznych – H1, H2 i H10,
- użycie nowych metod do produkcji terahercowych elementów dyfrakcyjnych, takich jak druk 3D, wycinanie laserowe, spiekanie laserowe czy wypełnianie form materiałami płynnymi – H1, H2, H5, i H7,
- zaproponowanie użycia struktur kształtujących wiązki terahercowe w różne kształty ogniskowe (nie tylko pojedyncza plamka ogniskowa na osi optycznej soczewki) – H3, H4 i H5,
- zastosowanie iteracyjnych hologramów generowanych komputerowo do kształtowania wiązek terahercowych – H5,
- zaproponowanie i rozwój terahercowych struktur przekierowujących wiązkę poza oś optyczną w celu stworzenia kompaktowego układu do badania próbek w konfiguracji odbiciowej – H6 i H7,
- zaproponowanie i rozwój terahercowych struktur dzielących promieniowanie na wiele plamek ogniskowych i przekierowujących wiązkę poza oś optyczną, do zastosowań w układach telekomunikacyjnych – H8,
- zaproponowanie zastosowania metod iteracyjnych wykorzystujących zmodyfikowany algorytm typu *ping-pong* do przekierowywania terahercowych wiązek i skupiania ich poza osią optyczną – H5, H6 i H7,
- zaproponowanie metod optymalizacji kształtu transmitancji fazowych terahercowych elementów dyfrakcyjnych za pomocą sieci neuronowych, gdzie propagacja realizowana była metodą splotową, a optymalizacja struktury następowała poprzez uczenie sieci neuronowych – H8.

Jednocześnie publikacje H9 i H10 są zaproszonymi publikacjami przeglądowymi. Praca H10 została wybrana przez Edytorów jako „**Feature paper**”.

Rezultaty przeprowadzonych przeze mnie prac stanowią znaczący wkład w rozwój dziedziny terahercowej optyki dyfrakcyjnej. Co więcej, prace te pokazują, że tematyka poświęcona przekierowywaniu i kształtowaniu terahercowych frontów falowych jest istotna, a także stanowi potrzebne i nowatorskie podejście



do możliwości użycia dedykowanej optyki dyfrakcyjnej do zastosowań obejmujących pasmo promieniowania THz. W szczególności istotne jest zrozumienie i wyjaśnienie cech charakterystycznych promieniowania THz i projektowanych dla niego dyfrakcyjnych elementów optycznych. W pracy H10 podkreślona została specyfika projektowania tego typu struktur, albowiem relatywnie duża długość fali w porównaniu z rozmiarami układów i elementów optycznych sprawia, że znajdujemy się w bliskiej strefie dyfrakcyjnej Fresnela, gdzie istotnym zjawiskiem są efekty dyfrakcyjne. Pole świetlne znacząco zmienia swój kształt wraz z odległością propagacji, a często cały element optyki terahercowej jest wielkości, która odpowiada jedynie kilkudziesięciu długościom fali. Zapisanie relatywnie dużej ilości informacji w tak małej powierzchni elementu w stosunku do długości fali stanowi ogromne wyzwanie projektowe.

Dodatkowo trzeba uwzględnić możliwości produkcji terahercowych elementów optycznych, które wydają się być dużo bardziej dostępne i mniej skomplikowane w stosunku do ich odpowiedników dla światła widzialnego, promieniowania podczerwonego czy ultrafioletowego. Należy jednak zdawać sobie sprawę z faktu, że zakres promieniowania terahercowego jest zdecydowanie szerszy niż np. światła widzialnego, a co za tym idzie wymaga różnych metod produkcji, a tym samym projektowania, dla różnych jego fragmentów. Poprawne wykonanie terahercowych elementów optycznych wiąże się z odpowiednim projektowaniem, a także doбором materiałów, metod produkcji oraz poprawnym przygotowaniem plików.

## **5.5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

Staże i wyjazdy naukowe:

1. 15/09/2010 – 15/12/2010  
IMEP-LAHC, Uniwersytet Sabaudzki w Chambery, Francja  
3-miesięczne stypendium w ramach Centrum Studiów Zaawansowanych – badania dotyczące optyki dyfrakcyjnej dla promieniowania THz.  
Dzięki temu wyjazdowi możliwe było powstanie pierwszych badań w dziedzinie dyfrakcyjnej optyki terahercowej. Pobyt ten zakończył się wspólnymi publikacjami: H1 oraz [1, 46, 50, 129], a także wystąpieniem konferencyjnym [130].
2. 01/09/2014 – 31/09/2014  
IMEP-LAHC, Uniwersytet Sabaudzki w Chambery, Francja  
1-miesięczne stypendium TeraMIR COST-STSM pt. „Material characterization for sophisticated optics for GaN HEMT detectors and emitters”.  
Drugi wyjazd przyczynił się do dalszego rozwoju w dziedzinie projektowania zaawansowanych elementów optycznych dla pasma promieniowania THz. Dotyczył on również analizy materiałów możliwych do zastosowania w terahercowych elementach optycznych.
3. 15/03/2008 – 15/09/2008  
Orteh Sp. z o. o., Warszawa  
Realizacja projektu Tekla (<http://staze.teklaplus.pl> - oryginalna strona nie istnieje - link prowadzi do wpisu Internetowego Archiwum Wayback Machine) – rozwój nowej metody tworzenia hologramów zabezpieczających (tzw. „białe hologramy” podobne do tych umieszczonych na kartach kredytowych i banknotach).
4. 24/02/2020 – 13/03/2020  
Instytut Optoelektroniki, Centrum Nauk Fizycznych i Technologii, Saulėtekio Ave. 3, LT-10257 Wilno, Litwa

Wizyta studyjna i wspólne badania finansowane w ramach projektu PROM PW2.

Dzięki tej wizycie rozpoczęła się bardzo owocna współpraca naukowa, która zaowocowała zdobyciem wspólnego grantu w ramach ID-UB – FOTECH-1 pt. „Wykorzystanie właściwości spolaryzowanego oświetlenia i metody pola jasnego i pola ciemnego do terahercowego obrazowania fantomu tkanek zdrowych i zmienionych nowotworowo (Bright and Dark-Field Polarization Resolved Terahertz Imaging of the healthy and cancer tissue phantom)”, opublikowaniem trzech artykułów – [131–133] oraz złożeniem wspólnego wniosku w ramach polsko-litewskiego konkursu DAINA-2.

Współpraca naukowa:

1. 2007 – teraz  
Ortech Sp. z o.o., ul. Franciszka Iłskiego 25, 04-479 Warszawa, Polska  
Projektowanie hologramów, dokumentacje, prowadzenie szkoleń, projektowanie optyki.
2. 2007– teraz  
Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska  
Konsultowanie i projektowanie układów optycznych, wspólne prowadzenie badań naukowych, wspólne publikacje i wspólnie realizowany grant OPUS 18 (NCN).
3. 2020 – teraz  
Instytut Optoelektroniki, Centrum Nauk Fizycznych i Technologii, Saulėtekio Ave. 3, LT-10257 Wilno, Litwa  
Projektowanie optyki i układów optycznych, pomiary, współpraca naukowa.
4. 2010 – 2015  
Instytut Mikroelektroniki, Elektromagnetyzmu i Fotoniki - Laboratorium Mikrofali i Charakteryzacji - IMEP-LaHC, Uniwersytet Sabaudzki (Université Savoie Mont Blanc)  
Projektowanie optyki i układów optycznych, pomiary, wspólne publikacje.
5. 2017 – 2020  
Fizyka eksperymentalna EUV (Experimental Physics of EUV), Uniwersytet RWTH w Aachen, Niemcy  
Współpraca naukowa dotycząca iteracyjnego projektowania masek do naświetlania dla pasma EUV i optymalizacji kształtu naświetlanej maski w zależności od parametrów rezysty i możliwości technicznych naświetlarki. Współpraca ta zakończyła się wyróżnioną pracą dyplomową magisterską i artykułem naukowym [8].

W roku 2017 byłem kierownikiem podczas realizacji komercyjnego zlecenia zamówionego przez PCO S.A. – studium wykonalności pt. „Wielospektralna termalna kamera plenoptyczna”.

## 5.6 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

### 5.6.1 Osiągnięcia organizacyjne:

Od roku 2020 pełnię funkcję **Prodziekana ds. studenckich** na Wydziale Fizyki PW.

W roku 2020 byłem członkiem kolegium elektorów do wyboru Rektora Politechniki Warszawskiej w kadencji 2020–2024, co świadczy o zaufaniu społeczności akademickiej Wydziału Fizyki PW do mojej osoby.

W latach 2015–2020 byłam **Pełnomocnikiem Dziekana ds. studenckich praktyk zawodowych**. Zaprojektowałam i wdrożyłam system komputerowy do obsługi praktyk, który usprawnia pracę zarówno pracownikom, jak i studentom. Co roku otrzymywałam list gratulacyjny za bardzo dobre wykonywanie powierzonych mi na tym stanowisku obowiązków.

Od 2017 roku jestem **Kierownikiem Laboratorium Informatyki Optycznej** na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

W Laboratorium Informatyki Optycznej prowadzone są następujące zajęcia laboratoryjne:

1. Podstawy Fotografii (3 ćwiczenia po 5 godzin, 4 grupy 2-osobowe),
2. Fotografia cyfrowa (3 ćwiczenia po 5 godzin, 4 grupy 2-osobowe),
3. Techniki obrazowania 3D (3 ćwiczenia po 5 godzin, 4 grupy 2-osobowe),
4. Laboratorium Fizyki II (1 ćwiczenie projektowe 15 godzin, 3 grupy 2-osobowe),
5. Laboratorium Optyki Falowej (12 ćwiczeń po 4 godziny, 3 grupy 2-osobowe),
6. Laboratory of Wave Optics (12 ćwiczeń po 4 godziny, 3 grupy 2-osobowe),
7. Laboratorium Informatyki Optycznej (7 ćwiczeń po 6 godzin, 3 grupy 2-osobowe),
8. Komputerowe Metody Optyki (7 ćwiczeń po 4 godziny, 3 grupy 2-osobowe),
9. Metody Optyczne w Medycynie (5 ćwiczeń po 5 godzin, 3 grupy 2-osobowe),
10. **Optical Information Processing\*** (7 ćwiczeń po 6 godzin, 3 grupy 2-osobowe),
11. **Interference and holography\*** (4 ćwiczenia po 3-4 godziny, 3 grupy 2-osobowe),
12. Laboratorium specjalistyczne (1 ćwiczenie projektowe 15 godzin, 3 grupy 2-osobowe).

### 5.6.2 Osiągnięcia dydaktyczne:

W roku 2021 otrzymałam **medal Komisji Edukacji Narodowej**.

Dodatkowo należy wspomnieć, że zostałam nagrodzona **nagrodą indywidualną stopnia I Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne** w 2019 roku.

W latach 2015/2016 oraz 2018/2019 otrzymałam nagrodę indywidualną Rektora PW za wyróżniające prowadzenie zajęć dydaktycznych.

Zawsze dbałam o jakość prowadzonych zajęć oraz ich wysoki poziom merytoryczny, co zostało docenione przez studentów, albowiem **otrzymałam pięć razy nagrodę Złotej Kredy** (przyznawaną przez Samorząd Studentów PW na podstawie ankiet wypełnianych przez uczestników zajęć):

1. W roku 2010 za wyróżniające się prowadzenie zajęć laboratoryjnych/ćwiczeń za rok akademicki 2009/2010,

---

\*Zajęcia należące do moich przedmiotów autorskich. Zajmuję się koordynacją wszystkich zajęć oraz dbam o odpowiednie kształcenie kadry akademickiej prowadzącej zajęcia laboratoryjne.

2. W roku 2015 za wyróżniające się prowadzenie zajęć laboratoryjnych/ćwiczeń za rok akademicki 2014/2015,
3. W roku 2016 za wyróżniające się prowadzenie zajęć laboratoryjnych/ćwiczeń za rok akademicki 2015/2016,
4. W roku 2019 za najlepiej prowadzone zajęcia w języku angielskim,
5. W roku 2020 za najlepiej prowadzone zajęcia w języku angielskim (częściowo zdalnie).

Zajęcia dydaktyczne ze studentami prowadziłam od 2008 roku, będąc jeszcze w trakcie studiów doktoranckich. Podczas zatrudnienia na stanowisku adiunkta (**od 2012 roku**) **przeprowadziłam ponad 2 800 godzin dydaktycznych** w ramach następujących przedmiotów głównie dla studentów Wydziału Fizyki:

1. Podstawy Fotografii (laboratoria), I stopień, j. polski,
2. Fotografia cyfrowa (laboratoria), I stopień, j. polski,
3. Techniki obrazowania 3D (laboratoria), I stopień, j. polski,
4. Laboratorium Optyki Falowej (laboratoria), I stopień, j. polski,
5. Laboratory of Wave Optics (laboratoria), II stopień, j. angielski,
6. Laboratorium Informatyki Optycznej (laboratoria), II stopień, j. polski,
7. Komputerowe Metody Optyki (laboratoria), II stopień, j. polski,
8. Metody Optyczne w Medycynie (laboratoria), II stopień, j. polski,
9. Optyka fourierowska (ćwiczenia), I stopień, j. polski,
10. **Optical Information Processing\*** (wykład, ćwiczenia, laboratoria), II stopień, j. angielski,
11. **Interference and holography\*** (wykład, laboratoria), II stopień, j. angielski dla studentów Wydziału Mechatroniki,
12. **Terahertz Technology\*** (wykład, projekt), I i II stopień, j. angielski.

W roku 2016 opracowałam program nauczania na nowo otwartym kierunku anglojęzycznych studiów magisterskich „**Photonics**” dotyczący przedmiotu „**Optical Information Processing**”. Jest to przedmiot, który posiada najwięcej punktów ECTS podczas całych anglojęzycznych studiów magisterskich na kierunku Photonics (7 ECTS), ponieważ składa się on z wykładu (30 godzin), specjalnie ułożonych i dopasowanych programowo ćwiczeń (15 godzin) oraz serii zajęć laboratoryjnych (45 godzin). Opracowałam materiały wykładowe i ćwiczeniowe, które odpowiednio odnoszą się do zajęć laboratoryjnych. Opracowałam 7 instrukcji opatrzonej odpowiednim komentarzem i ilustracjami (oraz wyszczególnieniem zadań do zrealizowania podczas zajęć). Przygotowałam 7 zajęć laboratoryjnych dopasowując odpowiedni sprzęt oraz zapewniając studentom możliwość konstruowania każdego z układów samodzielnie. Dzięki szczegółowemu opisowi teoretycznemu i wyprowadzeniu kluczowych zależności studenci mogą w pełni zrozumieć fizykę danego zjawiska i zaprojektować i wykonać poprawnie działający układ optyczny. Prowadziłam cały cykl zajęć samodzielnie zapewniając spójność przekazywanej wiedzy i dbając o jak najwyższy poziom zajęć.

W roku 2019 wydany został skrypt mojego autorstwa pt. „**Optical Information Processing**” (Oficina Wydawnicza Politechniki Warszawskiej), opisujący ćwiczenia laboratoryjne wykonywane



podczas opisywanego przedmiotu.

Byłam **promotorem 22 prac inżynierskich oraz 17 prac magisterskich** (do 31.12.2021 roku).

Dbam o poprawę jakości i poziomu prac dyplomowych umożliwiając studentom współpracę między różnymi jednostkami naukowymi, aby mogli poszerzać swoją wiedzę i zdobywać nowe umiejętności dzięki pracy również w innych zespołach naukowych:

1. Prace magisterskie we współpracy z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (dr inż. Przemysław Zagrajek jako promotor zewnętrzny) od 2016 roku do teraz,
2. Praca magisterska we współpracy z Forschungszentrum Jülich i RWTH Aachen (prof. Larissa Juschkina jako promotor zewnętrzny),
3. Praca magisterska dotycząca analizy przezroczystości mózgowi wykonana we współpracy z Instytutem Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN (dr Monika Pawłowska) w 2016 roku,
4. Opiekun ze strony wydziału pracy realizowanej w dawnym Instytucie Optyki Stosowanej im. Maksymiliana Pluty (promotor: prof. Zbigniew Jaroszewicz),
5. Promotor pomocniczy pracy zrealizowanej we współpracy z Department of Cardiology-University Medical Center Hamburg-Eppendorf (promotor: dr inż. Paweł Kuklik),
6. Praca magisterska realizowana we współpracy z Wydziałem Elektroniki i Technik Informacyjnych PW (opiekun ze strony WEiTI: mgr. inż. Krzysztof Anders).

#### **Promotor pomocniczy w przypadku doktoratów:**

1. mgr. inż. Jarosława Bomby, tytuł: „Struktury antyrefleksyjne dla promieniowania terahercowego wykonane w technologii druku 3D”, obrona: 10 października 2019 roku,
2. mgr. inż. Karoliny Liebert, tytuł: „Struktury dyfrakcyjne zmniejszające aberracje chromatyczne w zakresie terahercowym”, obrona: 11 września 2020 roku,
3. mgr. inż. Pawła Komorowskiego, tytuł: „Multipleksacja promieniowania THz z wykorzystaniem niepoosiowych optycznych struktur dyfrakcyjnych”, obrona: 9 czerwca 2021 roku,
4. mgr. inż. Mateusza Surmy, III rok w Szkole Doktorskiej, pozytywny wynik oceny śródkresowej,
5. mgr. inż. Mateusza Kałuży, II rok w Szkole Doktorskiej.

W roku 2020 wydany został skrypt pt. „Laboratorium Optyki Falowej”, którego jestem jednym z trzech współautorów.

Warto również wspomnieć, że w 2020 roku został opublikowany artykuł opisujący soczewkę dyfrakcyjną zaprojektowaną i wytworzoną w ramach projektu naukowego studentów wykonanego na podstawie mojego autorskiego przedmiotu „Terahertz Technology” – [115].

W ramach indywidualnego podejścia do studentów i dbania o ich rozwój naukowy zdecydowałam się zostać **opiekunką naukową w ramach Indywidualnej Opieki Naukowej (ION) dla Anety Melaniuk i Patrycji Czerwińskiej**. A. Melaniuk w związku z udziałem w badaniach naukowych zaproponowanych przeze mnie mojej grupie badawczej jest współautorką publikacji – H2 i [122]. P. Czerwińska bierze aktywny udział w prowadzonym przeze mnie projekcie naukowym OPUS 18 i jest współautorką

następującej pracy naukowej [134]. Byłam również **opiekunką naukową Macieja Grochowicza w Indywidualnym Planie Studiowania (IPS)** – co zaowocowało wyjazdem M. Grochowicza do RWTH Aachen, napisaniem wspólnej pracy magisterskiej obronionej z wyróżnieniem i wspólną publikacją międzynarodową – [8].

### 5.6.3 Osiągnięcia dotyczące popularyzacji nauki:

Biorę udział w wielu akcjach dbających o kształcenie młodzieży poza-akademickiej, jak na przykład wykłady na Festiwalu Mikołajkowym dla uczniów szkół średnich i szkół podstawowych, udział w Dniach Otwartych (<https://www.youtube.com/watch?v=qidJx3azfZM>), współpraca z politechnicznym Biurem ds. Promocji i Informacji (<https://www.youtube.com/watch?v=pF6hqurxN50&feature=youtu.be> czy <https://www.youtube.com/watch?v=q40or4Y4nPA&feature=youtu.be>). Biorę udział w Drzwiach Otwartych organizowanych stacjonarnie oraz zdalnie, a także pomagam promować fizykę i nauki ścisłe wśród młodszych dzieci – np. eksperyment wykonany w cyklu „Przecinek i Kropka” <https://www.facebook.com/FizykaPW/posts/4823255824416391/>, realizowanym przez Dariusza Aksamita.

W ramach promocji projektów naukowych realizowanych w ramach Inicjatywy Doskonałości - Uczelni Badawczej nagrałam pierwszy z cyklu podcast pt. „Terahercowe obrazowanie tkanek nowotworowych” – [https://open.spotify.com/episode/7f20DbzvQ1pzjUI1T5P6ZG?si=TE214pXvTy2P1G2GfM\\_oqg&nd=1](https://open.spotify.com/episode/7f20DbzvQ1pzjUI1T5P6ZG?si=TE214pXvTy2P1G2GfM_oqg&nd=1). Aktywnie wspieram i promuję rolę kobiet w nauce, np. uczestnicząc w akcjach „Dziewczyny na Politechniki”, czy „Girls In Tech Poland” (<https://www.youtube.com/watch?v=oMQJWsbuPbw>).

## 5.7 Inne ważne informacje dotyczące kariery zawodowej.

### 5.7.1 Otrzymane nagrody i wyróżnienia

1. Nagroda zespołowa stopnia II przyznawana przez Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w latach 2019–2020,
2. Zespołowa nagroda I-go stopnia przyznawana przez Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w 2009, 2010 i 2014 rok,
3. Najczęściej pobierany artykuł w Optics Letters opublikowany w październiku 2012 roku – „Diffractive paper lens for terahertz optics”,
4. Zaproszony wykład na konferencji naukowej w Dubaju – A. Siemion, „Beam shaping of THz radiation”, EMN Dubai Meeting, 14-15.11.2016, Dubai, Zjednoczone Emiraty Arabskie,
5. Zaproszona publikacja naukowa: A. Siemion, et al., „Paper on Designing Costless THz Paper Optics,” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2016, Article ID 9615698, (2016),
6. **zaproszona publikacja przeglądowa H9:** „Terahertz diffractive optics – smart control over radiation” w czasopiśmie Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves – Springer,
7. **Zaproszone wystąpienie konferencyjne** – SPIE Optics + Photonics 2020 Digital Forum pt. „Terahertz diffractive optics: different way of thinking”,
8. **Zaproszona publikacja przeglądowa oznaczona jako artykuł istotny (Feature Paper – Review) w specjalnym wydaniu „Terahertz Imaging and Sensors” w czasopiśmie Sensors (IF = 3.275) H10** – „The Magic of Optics–An Overview of Recent Advanced Terahertz Diffractive Optical Elements”.

### 5.7.2 Funkcje pełnione w otrzymanych grantach

1. **Kierownik projektu LIDER IX finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju** pt.: „Terahercowe wielozadaniowe dyfrakcyjne urządzenie poprawiające obrazowanie nowotworów skóry” o budżecie 1 198 375 PLN,
2. **Kierownik projektu OPUS 18 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki** pt.: „Optyczny terahercowy układ typu MIMO – algorytmy generacji i badanie funkcjonowania kompaktowych struktur dyfrakcyjnych i hybrydowych” o budżecie 1 697 160 PLN,
3. **Kierownik projektu FOTECH-1 finansowanego przez Politechnikę Warszawską** w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (ID–UB) o budżecie 149 730 PLN,
4. Kierownik grantu dziekańskiego (na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej):
  - (a) zespołowego pt. „Zastosowanie powłok antyrefleksyjnych w optyce terahercowej” w 2014,
  - (b) zespołowego pt. „Kinoformowa i binarna terahercowa soczewka eliptyczna.” w 2015,
  - (c) zespołowego pt. „Terahercowe siatki Dammana do projektowania elementów typu fan-out” w 2016,
  - (d) indywidualnego pt. „Optymalizacja wydajności terahercowych elementów dyfrakcyjnych o niezaniębnej wartości współczynnika absorpcji materiału.” w 2017.
5. Kierownik projektu zamawianego wykonanego dla PCO S.A. pt. „Studium wykonalności dla wielospektralnej termalnej kamery plenooptycznej” w 2017,
6. Podczas studiów doktoranckich – Stypendystka grantu promotorskiego No N N519 659540.

### 5.7.3 Poszerzanie kompetencji dydaktycznych

Kurs pt. „Prowadzenie dydaktyki w języku obcym” – język angielski na poziomie biegłości językowej C1 (operational proficiency – Advanced) – Prowadzony w terminie 10.10.2019–13.02.2020 dla nauczycieli akademickich PW podnoszący kompetencje dydaktyczne w zakresie prowadzenia dydaktyki w języku obcym.

### 5.8 Inne

1. Wyróżnienie w kategorii Młody Inżynier w 26. edycji Plebiscytu Czytelników „Przeglądu Technicznego” o tytuł Złotego Inżyniera 2019. W wydaniu plebiscytowym opublikowany został mój krótki artykuł dotyczący znaczenia prowadzonych przeze mnie badań.
2. Laureatka Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju 2020 – 5 Forum Inteligentnego Rozwoju.
3. W 2012 roku, tłumacz książki E. Hecht „Optics” z j. angielskiego na j. polski dla Polskiego Wydawnictwa Naukowego PWN S.A.

## Literatura

- [1] Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Michał Makowski, Maciej Sypek, Emilie Hérault, Frédéric Garet, and Jean-Louis Coutaz. Off-axis metallic diffractive lens for terahertz beams. *Optics letters*, 36(11):1960–1962, 2011.
- [2] Nina Dyakonova, Dominique Coquillat, Frederic Teppe, Wojciech Knap, Jaroslaw Suszek, Agnieszka Siemion, Maciej Sypek, Dmytro B But, Pavel Sai, Ivan Yahniuk, et al. Terahertz vision using field effect transistors detectors arrays. In *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, pages 711–714. IEEE, 2018.
- [3] Karolina Liebert, Martyna Rachoń, Agnieszka Siemion, Jarosław Suszek, Dmytro But, Wojciech Knap, and Maciej Sypek. THz Beam Shaper Realizing Fan-Out Patterns. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(8):1019–1030, 2017.
- [4] Martyna Rachon, Karolina Liebert, Agnieszka Siemion, Jarosław Bomba, Artur Sobczyk, Wojciech Knap, Dominique Coquillat, Jarosław Suszek, and Maciej Sypek. Geometrical aberration suppression for large aperture sub-THz lenses. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(3):347–355, 2017.
- [5] Wojciech Knap, Maciej Sypek, Dmytro But, Dominique Coquillat, Jarosław Suszek, Krzesimir Szkudlarek, Agnieszka Siemion, Grzegorz Cywiński, Nina Dyakonova, and Frederic Teppe. Terahertz imaging with arrays of plasma field effect transistors detectors. In *2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, pages 1–2. IEEE, 2016.
- [6] Wojciech Knap, Dmytro B But, Nina Dyakonova, Dominique Coquillat, Frederic Teppe, Jarosław Suszek, Agnieszka M Siemion, Maciej Sypek, Krzesimir Szkudlarek, Grzegorz Cywiński, et al. Terahertz imaging with GaAs and GaN plasma field effect transistors detectors. In *2016 MIXDES-23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, pages 74–77. IEEE, 2016.
- [7] Wojciech Knap, Benoit Moulin, Maciej Sypek, Dominique Coquillat, Grzegorz Cywiński, Jarosław Suszek, Moncef Triki, Dmytro But, Agnieszka Siemion, Krzesimir Szkudlarek, et al. Plasma field effect transistors arrays for amplitude and polarization imaging in THz range. In *Materials Science and Condensed Matter Physics*, pages 45–45, 2016.
- [8] Valerie Deuter, Maciej Grochowicz, Sascha Brose, Jan Biller, Serhiy Danylyuk, Thomas Taubner, Agnieszka Siemion, Detlev Grützmacher, and Larissa Juschkina. Computational proximity lithography with extreme ultraviolet radiation. *Optics express*, 28(18):27000–27012, 2020.
- [9] Daniel Headland, Yasuaki Monnai, Derek Abbott, Christophe Fumeaux, and Withawat Withayachumnankul. Tutorial: Terahertz beamforming, from concepts to realizations. *Apl Photonics*, 3(5):051101, 2018.
- [10] Jean-Louis Coutaz, Frederic Garet, and Vincent P Wallace. *Principles of Terahertz time-domain spectroscopy: an introductory textbook*. CRC Press, 2018.
- [11] Robin Boquet, Nicolas Breuil, Laurent Chusseau, Jean-Louis Coutaz, Paul Crozat, Jean Demaison, Lionel Duvillaret, Guilhem Gallot, Frederic Garet, Jean-Francois Lampin, et al. *Optoélectronique térahertz*, 2008.
- [12] Xi-Cheng Zhang and Jingzhou Xu. *Introduction to THz wave photonics*, volume 29. Springer, 2010.
- [13] Jacek Marczewski. Digital communication–optical vs. THz links. *Opto-Electronics Review*, pages 176–181, 2020.



- [14] Donald D Arnone, Craig M Ciesla, Alessandra Corchia, Shunji Egusa, Michael Pepper, J Martyn Chamberlain, Colin Bezzant, Edmund H Linfield, Reece Clothier, and Nanacy Khammo. Applications of terahertz (THz) technology to medical imaging. In *Terahertz Spectroscopy and Applications II*, volume 3828, pages 209–219. International Society for Optics and Photonics, 1999.
- [15] Martin Koch. Bio-medical applications of THz imaging. In *Sensing with terahertz radiation*, pages 295–316. Springer, 2003.
- [16] K Humphreys, JP Loughran, M Gradziel, W Lanigan, T Ward, JA Murphy, and C O’Sullivan. Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering. In *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, volume 1, pages 1302–1305. IEEE, 2004.
- [17] Calvin Yu, Shuting Fan, Yiwen Sun, and Emma Pickwell-MacPherson. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date. *Quantitative imaging in medicine and surgery*, 2(1):33, 2012.
- [18] Iban Amenabar, Fagúndez Lopez, and Alberto Mendikute. In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(2):152–169, 2013.
- [19] Yu Heng Tao, Anthony J Fitzgerald, and Vincent P Wallace. Non-contact, non-destructive testing in various industrial sectors with terahertz technology. *Sensors*, 20(3):712, 2020.
- [20] Norbert Palka and Danuta Miedzińska. Detailed non-destructive evaluation of UHMWPE composites in the terahertz range. *Optical and Quantum Electronics*, 46(4):515–525, 2014.
- [21] Tetsuo Fukuchi, Norikazu Fuse, Maya Mizuno, and Kaori Fukunaga. Improvement of Measurement Resolution of Depth Distribution in Cross-Sectional Imaging Using Terahertz Wave. *Electronics and Communications in Japan*, 99(6):41–50, 2016.
- [22] Robert Bogue. Sensing with terahertz radiation: A review of recent progress. *Sensor Review*, 2018.
- [23] Reza Safian, Galia Ghazi, and Nafiseh Mohammadian. Review of photomixing continuous-wave terahertz systems and current application trends in terahertz domain. *Optical Engineering*, 58(11):110901, 2019.
- [24] Nathan M Burford and Magda O El-Shenawee. Review of terahertz photoconductive antenna technology. *Optical Engineering*, 56(1):010901, 2017.
- [25] Kiarash Ahi. Review of GaN-based devices for terahertz operation. *Optical Engineering*, 56(9):090901, 2017.
- [26] Fedir Sizov. Terahertz radiation detectors: the state-of-the-art. *Semiconductor Science and Technology*, 33(12):123001, 2018.
- [27] James C Wiltse. The Fresnel zone-plate lens. In *Millimeter wave technology III*, volume 544, pages 41–48. International Society for Optics and Photonics, 1985.
- [28] Donald N Black and James C Wiltse. Millimeter-wave characteristics of phase-correcting Fresnel zone plates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 35(12):1122–1129, 1987.
- [29] James E Garrett and James C Wiltse. Fresnel zone plate antennas at millimeter wavelengths. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 12(3):195–220, 1991.

- [30] L Leyten and MHAJ Herben. Vectorial far-field analysis of the fresnel-zone plate antenna: A comparison with the parabolic reflector antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 5(2):49–56, 1992.
- [31] LCJ Baggen, CJJ Jeronimus, and MHAJ Herben. The scan performance of the fresnel-zone plate antenna: A comparison with the parabolic reflector antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 6(13):769–774, 1993.
- [32] Paul F Goldsmith. Zone plate lens antennas for millimeter and submillimeter wavelengths. 1992.
- [33] Hristo D Hristov and Mathieu HAJ Herben. Millimeter-wave Fresnel-zone plate lens and antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 43(12):2779–2785, 1995.
- [34] Mark A Gouker and Glenn S Smith. A millimeter-wave integrated-circuit antenna based on the Fresnel zone plate. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 40(5):968–977, 1992.
- [35] James C Wiltse. Stepped conical zone plate antenna. In *Photonic and Quantum Technologies for Aerospace Applications III*, volume 4386, pages 85–93. International Society for Optics and Photonics, 2001.
- [36] James C Wiltse. Bandwidth characteristics for the stepped conical-zoned antenna. In *Photonic and Quantum Technologies for Aerospace Applications IV*, volume 4732, pages 59–69. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [37] David R Reid and Glenn S Smith. A full electromagnetic analysis of grooved-dielectric Fresnel zone plate antennas for microwave and millimeter-wave applications. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 55(8):2138–2146, 2007.
- [38] James C Wiltse. Large-angle zone plate antennas. In *Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications V*, volume 5104, pages 45–57. International Society for Optics and Photonics, 2003.
- [39] James C Wiltse. Zone plate designs for terahertz frequencies. In *Terahertz for Military and Security Applications III*, volume 5790, pages 167–179. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [40] Lyubomir P Kamburov, Hristo D Hristov, and Rodolfo Feick. Optimum design of millimeter-wave double-dielectric Fresnel zone-plate lens and antenna. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 25(2):301–316, 2004.
- [41] Jose M Rodriguez, Hristo D Hristov, and Walter Grote. Fresnel zone plate and ordinary lens antennas: Comparative study at microwave and terahertz frequencies. In *Microwave Conference (EuMC), 2011 41st European*, pages 894–897. IEEE, 2011.
- [42] Hristo D Hristov. Terahertz harmonic operation of microwave fresnel zone plate lens and antenna: Frequency filtering and space resolution properties. *International journal of antennas and propagation*, 2011, 2011.
- [43] Hristo D Hristov, Jose M Rodriguez, and Walter Grote. The grooved-dielectric Fresnel zone plate: An effective terahertz lens and antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(6):1343–1348, 2012.
- [44] James C Wiltse. Diffraction optics for terahertz waves. In *Terahertz for Military and Security Applications II*, volume 5411, pages 127–135. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [45] David R Reid and Glenn S Smith. Design of phase-correcting zone plate antennas for microwave and millimeter-wave applications using a full electromagnetic analysis. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*, pages 1505–1508. IEEE, 2007.

- [46] Emilie Hérault, Jean-Louis Coutaz, Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Michał Makowski, and Maciej Sypek. Prism-like behavior at terahertz frequencies of a 2D metallic grid with a varying periodicity. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32(4):403–406, 2011.
- [47] Johannes M Seifert, Gorette G Hernandez-Cardoso, Martin Koch, and Enrique Castro-Camus. Terahertz beam steering using active diffraction grating fabricated by 3D printing. *Optics Express*, 28(15):21737–21744, 2020.
- [48] Benedikt Hampel, Marco Tollkühn, Ilya Elenskiy, Michael Martens, Denis Kajevic, and Meinhard Schilling. Josephson Cantilevers for THz Microscopy of Additive Manufactured Diffractive Optical Components. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5):1–4, 2019.
- [49] Daniel B Fullager, Serang Park, Clark Hovis, Yanzeng Li, Jesse Reese, Erin Sharma, Susanne Lee, Christopher Evans, Glenn D Boreman, and Tino Hofmann. Metalized Poly-methacrylate Off-Axis Parabolic Mirrors for Terahertz Imaging Fabricated by Additive Manufacturing. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 40(3):269–275, 2019.
- [50] Jarosław Suszek, Agnieszka Siemion, Narcyz Błocki, Michał Makowski, Adam Czerwiński, Jarosław Bomba, Adam Kowalczyk, Izabela Ducin, Karol Kakarenko, Norbert Pałka, et al. High order kinoforms as a broadband achromatic diffractive optics for terahertz beams. *Optics Express*, 22(3):3137–3144, 2014.
- [51] Jaroslaw Suszek, Agnieszka Siemion, Marcin S Bieda, Narcyz Błocki, Dominique Coquillat, Grzegorz Cywiński, Elżbieta Czerwińska, Marta Doch, Adam Kowalczyk, Norbert Palka, et al. 3-D-printed flat optics for THz linear scanners. *IEEE transactions on Terahertz Science and Technology*, 5(2):314–316, 2015.
- [52] Steven Wang, Tao Yuan, Edward D Walsby, Richard J Blaikie, Steven M Durbin, David RS Cumming, Juan Xu, and Xi-Cheng Zhang. Characterization of T-ray binary lenses. 27(13):1183–1185, 2002.
- [53] Edward D Walsby, Simon Wang, Juan Xu, T Yuan, Richard Blaikie, Steven M Durbin, Xi-Cheng Zhang, and David RS Cumming. Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 20(6):2780–2783, 2002.
- [54] Jean-Louis Coutaz, Frédéric Garet, Eric Bonnet, Alexander V Tishchenko, Olivier Parriaux, and Maksim Nazarov. Grating diffraction effects in the THz domain. *Acta Phys. Pol. A*, 107:26–37, 2005.
- [55] Qiu-jie Yang, Jing-guo Huang, Zhen-yang Xiao, Zhi-ming Huang, Rong Shu, and Zhi-ping He. Terahertz dispersion using multi-depth phase modulation grating. *Optics express*, 27(9):12732–12747, 2019.
- [56] Edward D Walsby, Steven M Durbin, David RS Cumming, and Richard J Blaikie. Analysis of silicon terahertz diffractive optics. *Current Applied Physics*, 4(2-4):102–105, 2004.
- [57] Edward D Walsby, Jesse Alton, Christopher Worrall, Harvey E Beere, David A Ritchie, and David RS Cumming. Imprinted diffractive optics for terahertz radiation. *Optics Letters*, 32(9):1141–1143, 2007.
- [58] Shimul C Saha, Chong Li, Yong Ma, James P Grant, and David RS Cumming. Fabrication of multilevel silicon diffractive lens at terahertz frequency. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 3(4):479–485, 2013.

- [59] VS Cherkassky, AV Fanova, LA Merzhievsky, SA Zhigach, YU Jeong, HJ Cha, NG Gavrilov, BA Knyazev, GN Kulipanov, IA Polskikh, et al. Diffraction Optical Elements And Optical Systems With A High Power Monochromatic Terahertz Source. 2007.
- [60] VM Vedernikov, PM Dutov, AI Kokarev, VP Kir'yanov, BA Knyazev, VG Nikitin, IG Pal'chikova, AR Sametov, MF Stupak, YV Chugui, et al. Diffractive elements for a free electron laser. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 46(4):365–375, 2010.
- [61] Boris A Knyazev, Gennady N Kulipanov, and Nikolai A Vinokurov. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements. *Measurement Science and Technology*, 21(5):054017, 2010.
- [62] Boris A Knyazev, Valery S Cherkassky, Yulia Yu Choporova, Vasily V Gerasimov, Maxim G Vlasenko, Mikhail A Dem'yanenko, and Dmitry G Esaev. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32(10):1207–1222, 2011.
- [63] AN Agafonov, MG Vlasenko, BO Volodkin, VV Gerasimov, AK Kaveev, BA Knyazev, GI Kropotov, VS Pavelyev, IG Palchikova, VA Soyfer, et al. Diffractive lenses for high-power terahertz radiation beams. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 77(9):1164–1166, 2013.
- [64] Maksim Sergeevich Komlenok, Boris Olegovich Volodkin, Boris Aleksandrovich Knyazev, Taras V Kononenko, Victor V Kononenko, Vitalii Ivanovich Konov, Victor A Soifer, Vitalii S Pavel'ev, Konstantin Nikolaevich Tukmakov, and Yu Yu Choporova. Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation. *Quantum Electronics*, 45(10):933, 2015.
- [65] Vladimir S Pavelyev, Maxim S Komlenok, Boris O Volodkin, Boris A Knyazev, Taras V Kononenko, Vitalii I Konov, Victor A Soifer, and Yu Yu Choporova. Fabrication of high-effective silicon diffractive optics for the terahertz range by femtosecond laser ablation. *Physics Procedia*, 84:170–174, 2016.
- [66] Taras V Kononenko, Boris A Knyazev, Dmitry N Sovyk, Vladimir S Pavelyev, Maxim S Komlenok, Gennadii A Komandin, and Vitaly I Konov. Silicon kinoform cylindrical lens with low surface roughness for high-power terahertz radiation. *Optics & Laser Technology*, 123:105953, 2020.
- [67] Feng Hui and Wang Li. A zone plate as a tunable terahertz filter. *Chinese Physics Letters*, 27(6):064201, 2010.
- [68] Xinke Wang, Zhenwei Xie, Wenfeng Sun, Shengfei Feng, Ye Cui, Jiasheng Ye, and Yan Zhang. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate. *Optics letters*, 38(22):4731–4734, 2013.
- [69] Linas Minkevicius, Bogdan Voisiat, Algirdas Mekys, Rimvydas Venckevicius, Irmantas Kasalynas, Dalius Seliuta, Gintaras Valusis, Gediminas Raciukaitis, and Vincas Tamosiunas. Terahertz zone plates with integrated laser-ablated bandpass filters. *Electronics Letters*, 49(1):1, 2013.
- [70] Linas Minkevičius, Karolis Madeikis, Bogdan Voisiat, Irmantas Kašalynas, Rimvydas Venckevičius, Gediminas Račiukaitis, Vincas Tamošiunas, and Gintaras Valušis. Focusing performance of terahertz zone plates with integrated cross-shape apertures. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(9):699–702, 2014.
- [71] Linas Minkevičius, Vincas Tamošiunas, Karolis Madeikis, Bogdan Voisiat, Irmantas Kašalynas, and Gintaras Valušis. On-chip integration of laser-ablated zone plates for detection enhancement of InGaAs bow-tie terahertz detectors. *Electronics Letters*, 50(19):1367–1369, 2014.



- [72] Linas Minkevičius, Simonas Indrišiunas, Ramunas Šniaukas, Bogdan Voisiat, Vytautas Janonis, Vincas Tamošiunas, Irmantas Kašalynas, Gediminas Račiukaitis, and Gintaras Valušis. Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon. *Optics letters*, 42(10):1875–1878, 2017.
- [73] Linas Minkevičius, Simonas Indrišiunas, Ramunas Šniaukas, Gediminas Račiukaitis, Vytautas Janonis, Vincas Tamošiunas, Irmantas Kašalynas, and Gintaras Valušis. Compact diffractive optics for THz imaging. *Lithuanian Journal of Physics*, 58(1), 2018.
- [74] Irmantas Kašalynas, Rimvydas Venckevičius, Linas Minkevičius, Aleksander Sešek, Faustino Wahai, Vincas Tamošiunas, Bogdan Voisiat, Dalius Seliuta, Gintaras Valušis, Andrej Švigelj, et al. Spectroscopic terahertz imaging at room temperature employing microbolometer terahertz sensors and its application to the study of carcinoma tissues. *Sensors*, 16(4):432, 2016.
- [75] Linas Minkevičius, Domas Jokubauskis, Irmantas Kašalynas, Sergej Orlov, Antanas Urbas, and Gintaras Valušis. Bessel terahertz imaging with enhanced contrast realized by silicon multi-phase diffractive optics. *Optics Express*, 27(25):36358–36367, 2019.
- [76] Simonas Indrišiunas, Heiko Richter, Ignas Grigelionis, Vytautas Janonis, Linas Minkevičius, Gintaras Valušis, Gediminas Račiukaitis, Till Hagelschuer, Heinz-Wilhelm Hübers, and Irmantas Kašalynas. Laser-processed diffractive lenses for the frequency range of 4.7 THz. *Optics letters*, 44(5):1210–1213, 2019.
- [77] Silvia Tofani, Dimitrios C Zografopoulos, Mauro Missori, Renato Fastampa, and Romeo Beccherelli. Terahertz focusing properties of polymeric zone plates characterized by a modified knife-edge technique. *JOSA B*, 36(5):D88–D96, 2019.
- [78] Md Itrat Bin Shams, Zhenguo Jiang, Jubaid Qayyum, Syed Rahman, Patrick Fay, and Lei Liu. A terahertz reconfigurable photo-induced Fresnel-zone-plate antenna for dynamic two-dimensional beam steering and forming. In *Microwave Symposium (IMS), 2015 IEEE MTT-S International*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [79] Md Itrat B Shams, Zhenguo Jiang, Syed M Rahman, Li-Jing Cheng, Jeffrey L Hesler, Patrick Fay, and Lei Liu. A 740-GHz dynamic two-dimensional beam-steering and forming antenna based on photo-induced reconfigurable Fresnel zone plates. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(3):310–319, 2017.
- [80] Martyna Rachoń, Karolina Liebert, Agnieszka Siemion, Jarosław Bomba, Artur Sobczyk, Wojciech Knap, Dominique Coquillat, Jarosław Suszek, and Maciej Sypek. Geometrical aberration suppression for large aperture sub-THz lenses. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(3):347–355, 2017.
- [81] Martyna Rachoń, Karolina Liebert, Dmytro But, Przemysław Zagrajek, Agnieszka Siemion, Andrzej Kołodziejczyk, Maciej Sypek, and Jarosław Suszek. Enhanced Sub-wavelength Focusing by Double-Sided Lens with Phase Correction in THz Range. *JOURNAL OF INFRARED MILLIMETER AND TERAHERTZ WAVES*, 2020.
- [82] Fen Zhao, Ziping Li, Xuemei Dai, Xiaoyu Liao, Sheng Li, Juncheng Cao, Zhengguo Shang, Zhihai Zhang, Gaofeng Liang, Gang Chen, et al. Broadband Achromatic Sub-Diffraction Focusing by an Amplitude-Modulated Terahertz Metalens. *Advanced Optical Materials*, page 2000842, 2020.
- [83] Mengyu Yang, Desheng Ruan, Lianghui Du, Chunyan Qin, Zeyu Li, Cuiping Lin, Gang Chen, and Zhongquan Wen. Subdiffraction focusing of total electric fields of terahertz wave. *Optics Communications*, 458:124764, 2020.

- [84] Ayato Iba, Calvin W Domier, Makoto Ikeda, Atsushi Mase, Anh-Vu Pham, and Neville C Luhmann. Realizing sub-diffraction focusing for terahertz. In *2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, pages 1–2. IEEE, 2019.
- [85] Yingjie Shang, Xinke Wang, Wenfeng Sun, Peng Han, Jiasheng Ye, Shengfei Feng, and Yan Zhang. Terahertz image reconstruction based on compressed sensing and inverse Fresnel diffraction. *Optics express*, 27(10):14725–14735, 2019.
- [86] GA Turnbull, DA Robertson, GM Smith, L Allen, and MJ Padgett. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate. *Optics communications*, 127(4-6):183–188, 1996.
- [87] Igor V Minin and Oleg V Minin. Scanning properties of the diffractive “LENS-PLUS-AXICON” lens in THz. In *Proceedings of the 11th Microcoll Symposium*, pages 233–236, 2003.
- [88] Igor V Minin and Oleg V Minin. Advantages in THz diffractive optical elements. In *Infrared and Millimeter Waves, 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics, 2004. Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on*, pages 371–372. IEEE, 2004.
- [89] Yanzhong Yu and Wenbin Dou. Generation of pseudo-Bessel beams at THz frequencies by use of binary axicons. *Optics express*, 17(2):888–893, 2009.
- [90] John R Middendorf, Daniel A LeMaster, Masoud Zarepoor, and Elliott R Brown. Design of multi-order diffractive THz lenses. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on*, pages 1–2. IEEE, 2012.
- [91] Igor Minin and Oleg Minin. Active MMW/terahertz security system based on bessel beams. *ISRN Optics*, 2013, 2013.
- [92] Lyubomir P Kamburov, Jose M Rodriguez, Jordan R Urumov, and Hristo D Hristov. Millimeter-wave conical fresnel zone lens of flat dielectric rings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(4):2140–2148, 2014.
- [93] Kenro Miyamoto, Koji Suizu, Tomoyosi Akiba, and Takashige Omatsu. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate. *Applied Physics Letters*, 104(26):261104, 2014.
- [94] Xuli Wei, Changming Liu, Liting Niu, Zhongqi Zhang, Kejia Wang, Zhengang Yang, and Jinsong Liu. Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range. *Applied optics*, 54(36):10641–10649, 2015.
- [95] Boris A Knyazev, Yu Yu Choporova, Mikhail S Mitkov, Vladimir S Pavelyev, and Boris O Volodkin. Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum. *Physical review letters*, 115(16):163901, 2015.
- [96] Walter D Furlan, Vicente Ferrando, Juan A Monsoriu, Przemysław Zagrajek, Elżbieta Czerwińska, and Mieczysław Szustakowski. 3D printed diffractive terahertz lenses. *Optics letters*, 41(8):1748–1751, 2016.
- [97] Changming Liu, Liting Niu, Kejia Wang, and Jinsong Liu. 3D-printed diffractive elements induced accelerating terahertz Airy beam. *Optics express*, 24(25):29342–29348, 2016.
- [98] Changming Liu, Xuli Wei, Liting Niu, Kejia Wang, Zhengang Yang, and Jinsong Liu. Discrimination of orbital angular momentum modes of the terahertz vortex beam using a diffractive mode transformer. *Optics express*, 24(12):12534–12541, 2016.

- [99] Arturo I Hernandez-Serrano, Marcel Weidenbach, Stefan F Busch, Martin Koch, and Enrique Castro-Camus. Fabrication of gradient-refractive-index lenses for terahertz applications by three-dimensional printing. *JOSA B*, 33(5):928–931, 2016.
- [100] Vladimir S Pavelyev, Boris O Volodkin, Konstantin N Tukmakov, Boris A Knyazev, and Yu Yu Choporova. Transmissive diffractive microoptics for high-power THz laser radiation. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1989, page 020025. AIP Publishing, 2018.
- [101] Anton V Pakhomov, Rostislav M Arkhipov, Mikhail V Arkhipov, Ahmet Demircan, Uwe Morgner, Nikolay N Rosanov, and Ihar Babushkin. Unusual terahertz waveforms from a resonant medium controlled by diffractive optical elements. *Scientific reports*, 9(1):1–12, 2019.
- [102] Dajun Zhang, Beng Chen, Zhongling Ba, Shuo Ni, Juncheng Cao, and Xiong Wang. Generation of Broadband THz Airy Beams Applying 3D Printing Technique. In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–3. IEEE, 2019.
- [103] Sourangsu Banerji and Berardi Sensale-Rodriguez. 3D-printed diffractive terahertz optical elements through computational design. In *Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications XI*, volume 10982, page 109822X. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [104] Sourangsu Banerji and Berardi Sensale-Rodriguez. A computational design framework for efficient, fabrication error-tolerant, planar THz diffractive optical elements. *Scientific reports*, 9(1):1–9, 2019.
- [105] Yi Luo, Deniz Mengu, Nezh T Yardimci, Yair Rivenson, Muhammed Veli, Mona Jarrahi, and Aydogan Ozcan. Design of task-specific optical systems using broadband diffractive neural networks. *Light: Science & Applications*, 8(1):1–14, 2019.
- [106] Karolina Liebert, Martyna Rachoń, Andrzej Kołodziejczyk, Maciej Sypek, Izabela Ducin, Przemysław Zagrajek, and Agnieszka Siemion. Study of thin, achromatic diffractive structures to focus terahertz radiation on a detector. *Optica Applicata*, 50(3), 2020.
- [107] Geng-Bo Wu, Kai Fai Chan, and Chi Hou Chan. 3-D Printed Terahertz Lens for Generation of Non-diffractive Bessel Beam Carrying OAM. In *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–3. IEEE, 2020.
- [108] Yongqiang Yang, Xi Ye, Liting Niu, Kejia Wang, Zhengang Yang, and Jinsong Liu. Generating terahertz perfect optical vortex beams by diffractive elements. *Optics Express*, 28(2):1417–1425, 2020.
- [109] Dashuang Liao, Ka Fai Chan, Chi Hou Chan, Qingle Zhang, and Haogang Wang. All-optical diffractive neural networked terahertz hologram. *Optics Letters*, 45(10):2906–2909, 2020.
- [110] Saleh Firoozabadi, Felipe Beltran-Mejia, Amin Soltani, David Jahn, Stefan F Busch, Jan C Balzer, and Martin Koch. THz transmission blazed grating made out of paper tissue. In *2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, pages 1–2. IEEE, 2017.
- [111] Rhiannon Lees, Polina S Stefanova, Andreas K Klein, Claudio Balocco, and Andrew J Gallant. based Optical Components for the THz Region. In *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [112] Łukasz A Sterczewski, Michał Grzelczak, Kacper Nowak, and Edward F Pliński. Cast terahertz lenses made of caramelized sucrose. *Optical Engineering*, 55(9):090505, 2016.

- [113] Daehoon Han, Kanghee Lee, Jongseok Lim, Sei Sun Hong, Young Kie Kim, and Jaewook Ahn. Terahertz lens made out of natural stone. *Applied Optics*, 52(36):8670–8675, 2013.
- [114] Si-Bo Hao, Zi-Li Zhang, Yuan-Yuan Ma, Meng-Yu Chen, Yang Liu, Hao-Chong Huang, and Zhi-Yuan Zheng. Terahertz Lens Fabricated by Natural Dolomite. *Chinese Physics Letters*, 36(12):124205, 2019.
- [115] Mateusz Surma, Paweł Komorowski, Maciej Neneman, and Agnieszka Siemion. Chocolate Terahertz Fresnel Lens. *Photonics Letters of Poland*, 12(4):103–105, 2020.
- [116] Jarosław Suszek, Maciej Sypek, Michał Makowski, Frédéric Garet, Izabela Ducin, Karol Kakarenko, Jarosław Bomba, and Jean-Louis Coutaz. Evaluation of the shadow effect in terahertz kinoform gratings. *Optics letters*, 38(9):1464–1466, 2013.
- [117] Andrew D Squires, Evan Constable, and Roger A Lewis. 3D printing of aspherical terahertz lenses and diffraction gratings. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2014 39th International Conference on*, pages 1–2. IEEE, 2014.
- [118] Andrew D Squires, Evan Constable, and Roger A Lewis. 3D printed terahertz diffraction gratings and lenses. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(1):72–80, 2015.
- [119] Andrew D Squires and Roger A Lewis. Feasibility and characterization of common and exotic filaments for use in 3D printed terahertz devices. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 39(7):614–635, 2018.
- [120] Enrique Castro-Camus, Martin Koch, and Arturo I Hernandez-Serrano. Additive manufacture of photonic components for the terahertz band. *Journal of Applied Physics*, 127(21):210901, 2020.
- [121] Agnieszka Siemion, Mateusz Surma, Paweł Komorowski, Izabela Ducin, and Piotr Sobotka. Terahertz diffractive optics: different way of thinking. In *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI*, volume 11499, page 114990C. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- [122] Agnieszka Siemion, Aneta Melaniuk, Przemysław Zagrajek, Paweł Komorowski, Michał Walczakowski, Mateusz Surma, Piotr Sobotka, Izabela Ducin, and Elżbieta Czerwińska. THz diffractive lens manufactured using 3D printer working for 0.6 THz. In *2020 23rd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, pages 225–228. IEEE, 2020.
- [123] Yun Shik Lee. *Principles of terahertz science and technology*, volume 170. Springer Science and Business Media, 2009.
- [124] Bing Zhang, Yong-Xin Guo, Herbert Zirath, and Yue Ping Zhang. Investigation on 3-D-Printing Technologies for Millimeter- Wave and Terahertz Applications. *Proceedings of the IEEE*, 105(4):723–736, 2017.
- [125] Stefan F. Busch, Marcel Weidenbach, Matthias Fey, Felix Schäfer, Thorsten Probst, and Martin Koch. Optical Properties of 3D Printable Plastics in the THz Regime and their Application for 3D Printed THz Optics. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(12):993–997, 2014.
- [126] James G. Speight. *Fouling in refineries*. Gulf Professional Publishing, 2015.
- [127] Ralph W Gerchberg. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 35:237–246, 1972.
- [128] Rainer G Dorsch, Adolf W Lohmann, and Stefan Sinzinger. Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display. *Applied optics*, 33(5):869–875, 1994.

- [129] Maciej Sypek, Michał Makowski, Emilie Hérault, Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Jarosław Suszek, Frédéric Garet, and Jean-Louis Coutaz. Highly efficient broadband double-sided Fresnel lens for THz range. *Optics letters*, 37(12):2214–2216, 2012.
- [130] Maciej Sypek, Michał Makowski, Izabela Ducin, Agnieszka Siemion, Andrzej Siemion, Jarosław Suszek, Frédéric Garet, Emilie Hérault, and Jean-Louis Coutaz. Large aperture diffractive lenses for the THz domain. In *2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, pages 1–2. IEEE, 2011.
- [131] Linas Minkevičius, Liang Qi, Agnieszka Siemion, Domas Jokubauskis, Aleksander Sešek, Andrej Švigelj, Janez Trontelj, Dalius Seliuta, Irmantas Kašalynas, and Gintaras Valušis. Titanium-Based Microbolometers: Control of Spatial Profile of Terahertz Emission in Weak Power Sources. *Applied Sciences*, 10(10):3400, 2020.
- [132] Agnieszka Siemion, Linas Minkevičius, Liang Qi, and Gintaras Valušis. Spatial filtering based terahertz imaging of low absorbing objects. *Optics and Lasers in Engineering*, page 106476, 2020.
- [133] Agnieszka Siemion, Linas Minkevičius, Domas Jokubauskis, Rusnė Ivaškevičiūtė-Povilauskienė, and Gintaras Valušis. Terahertz digital holography: Two-and four-step phase shifting technique in two plane image recording. *AIP advances*, 11(10):105212, 2021.
- [134] Paweł Komorowski, Patrycja Czerwińska, Mateusz Surma, Przemysław Zagrajek, Ryszard Piramidowicz, and Agnieszka Siemion. Three-focal-spot terahertz diffractive optical element-iterative design and neural network approach. *Optics Express*, 29(7):11243–11253, 2021.

ASiemion