

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA NAUKI FIZYCZNE
DZIEDZINA NAUK ŚCISŁYCH I PRZYRODNICZYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Mateusz Kałuża

**Dyfrakcyjne elementy optyczne umożliwiające
przestrzenną multipleksację i demultipleksację wiązek
promieniowania terahercowego**

Promotor

dr hab. inż. Agnieszka Siemion, prof. PW

Warszawa 2024

Podziękowania

Firmie Ortech – za udostępnienie oprogramowania LightSword 6.0, użytego do symulacji numerycznych propagacji światła, dostępnego w Laboratorium Informatyki Optycznej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Instytutowi Optoelektroniki na Wojskowej Akademii Technicznej – za możliwość przeprowadzenia pomiarów eksperymentalnych, których wyniki przedstawiono w rozprawie.

Agnieszce Siemion – za nieocenione wsparcie, inspirację i nowe wyzwania naukowe, które pozwoliły mi rozwijać się i podjąć nowe, ambitne działania.

Rodzinie – za nieocenione wsparcie w trudnych chwilach oraz w momentach zwątpienia, które dawało mi siłę do dalszej pracy.

Przyjaciołom – za wspaniałą atmosferę w pracy, motywację do działania, wyrozumiałość w trudnych momentach oraz za wspólnie spędzony czas.

Finansowanie

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu OPUS-18 (2019/35/B/ST7/03909).

Streszczenie

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie zastosowaniem technologii terahercowych (THz) w telekomunikacji. W obecnych rozwiązaniach telekomunikacyjnych dystrybucja danych do użytkowników końcowych odbywa się głównie za pomocą technologii Wi-Fi, która wymaga bezprzewodowej komunikacji krótkozasięgowej. Jednak przepustowość łączy Wi-Fi i sieci 5G osiągnęła już swoje granice. Wykorzystanie pasma THz stwarza możliwość znaczącego zwiększenia przepustowości transferu danych, co prowadzi do poprawy wydajności systemów telekomunikacyjnych. Technologia THz ma potencjał do rozwiązania wielu wyzwań telekomunikacyjnych, jednak aby osiągnąć optymalne transfery danych, konieczne jest zastosowanie multipleksacji promieniowania THz. W niniejszej pracy przedstawiono różnorodne podejścia do projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych, które umożliwiają przestrzenną multipleksację i demultipleksację sygnałów THz. Opisano układ MIMO (*ang. Multiple-Input Multiple-Output*), w którym promieniowanie wygenerowane przez dwa przestrzennie rozdzielone źródła THz połączono w pojedynczy kanał optyczny przy użyciu struktury multipleksującej. Następnie, po propagacji wiązki sygnałów w wolnej przestrzeni, sygnały rozdzielono przestrzennie i skupiano na detektorze za pomocą struktury demultipleksującej. Szczególnym osiągnięciem jest separacja sygnałów, których częstotliwości różnią się zaledwie o 0,9 GHz. Takie rozwiązanie ma kluczowe znaczenie w zastosowaniach telekomunikacyjnych, ponieważ umożliwia zwiększenie przepustowości sieci transmitując wiele sygnałów w jednym kanale. W pracy szczegółowo opisano metodę projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych. Przedstawiono nowatorską metodę modelowania przestrzennego. Przeprowadzono pomiary właściwości optycznych 103 materiałów przy użyciu technologii THz spektroskopii w dziedzinie czasu, a także przedstawiono wyniki badań nad wpływem parametrów druku przestrzennego w technologii FDM (*ang. Fused Deposition Modeling*) na właściwości optyczne THz dyfrakcyjnych elementów optycznych. Spośród badanej grupy wybrano dwa materiały o pożądanых właściwościach optycznych, z których wytworzono zaprojektowane struktury. Następnie przeprowadzono symulacje numeryczne oraz pomiary eksperymentalne z użyciem struktur (de)multipleksujących, które wykazały wysoki stopień zgodności z projektem i prawidłowe działanie struktur.

Słowa kluczowe: Promieniowanie THz, Multipleksacja THz, System MIMO, Dyfrakcyjne struktury optyczne, 6G, THz spektroskopia w dziedzinie czasu, Druk 3D

Abstract

In recent years, there has been growing interest in the application of terahertz (THz) technologies in telecommunication. Current telecommunication solutions primarily utilize Wi-Fi technology for data distribution to end users, which necessitates short-range wireless communication. However, the bandwidth of Wi-Fi and 5G networks has reached its limits. The utilization of the THz band offers the potential to significantly enhance data transfer capacity, thereby improving the performance of telecommunications systems. While THz technology holds promise for addressing numerous telecommunications challenges, achieving optimal data transfers requires the multiplexing of THz radiation. This thesis presents various approaches to the design of passive diffractive optical elements that facilitate spatial multiplexing and demultiplexing of THz radiation. It describes the Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system in which radiation generated by two spatially separated THz sources is combined into a single optical channel using the multiplexing structure. Subsequently, after propagating in free space, the signal beams are spatially separated and focused on the detector using the demultiplexing structure. A notable achievement is the complete separation of signals differing only by the frequency of 0.9 GHz. Such a solution is important for telecommunication applications, as it enables increased signal transfer by the simultaneous transmission of multiple signals in one optical channel. This study provides a detailed description of the design methods employed for THz diffractive optical elements. It introduces a novel spatial modeling approach and reports on measurements of the optical properties of a set of 103 materials using THz time-domain spectroscopy. Additionally, the study investigates the impact of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing parameters on the optical properties of diffractive optical elements. From the investigated materials, two with desired optical characteristics for THz range were selected for the manufacturing of structures using FDM technology. The presented results of numerical simulations and experimental measurements showed a high degree of agreement and proper functionality of multiplexing and demultiplexing structures.

Keywords: THz radiation, THz multiplexing, MIMO system, Diffractive optical elements, 6G, THz time-domain spectroscopy, 3D printing

Spis treści

1	Wstęp i motywacja	13
2	Cel, zakres oraz teza rozprawy	19
3	Kluczowe zagadnienia związane z tematyką rozprawy doktorskiej	23
3.1	Promieniowanie THz i jego zastosowania	23
3.2	Kluczowe etapy rozwoju telekomunikacji	25
3.3	Telekomunikacja w zakresie promieniowania THz	28
3.4	Właściwości materiałów w zakresie THz	30
3.5	Druk przestrzenny dyfrakcyjnych elementów optycznych dla zakresu promieniowania THz	32
4	Metodyka	35
4.1	Terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu	35
4.2	Szczegółowa analiza pomiarów THz TDS	38
4.3	Dyfrakcyjne elementy optyczne – DOE	42
4.4	Symulacje numeryczne - opis propagacji światła	46
4.5	Iteracyjny algorytm projektowania DOE	48
4.6	Modelowanie przestrzenne rozkładów opóźnienia fazowego	48
4.7	Wytwarzanie elementów dyfrakcyjnych	51
5	Badania materiałów	53
5.1	Wytwarzanie próbek i pomiary THz TDS	54
5.2	Wpływ parametrów druku 3D na właściwości optyczne DOE wytworzonych z COC	58
5.2.1	Wytworzenie próbek COC	58

5.2.2	Pomiary właściwości optycznych próbek COC	62
6	System MIMO	67
6.1	Struktury MISO realizujące multipleksację przestrzenną promieniowania THz	68
6.1.1	Projektowanie struktur MISO	68
6.1.2	Wyniki symulacji numerycznych	71
6.1.3	Modelowanie i wytwarzanie struktur MISO	77
6.1.4	Wyniki pomiarów eksperymentalnych	78
6.2	Struktury SIMO realizujące demultipleksację przestrzenną promieniowania THz	86
6.2.1	Projektowanie struktur SIMO	86
6.2.2	Wyniki symulacji numerycznych	91
6.2.3	Wytwarzanie struktur SIMO	95
6.2.4	Eksperymentalny układ pomiarowy	96
6.2.5	Wyniki pomiarów eksperymentalnych	96
6.3	System MIMO	104
6.3.1	Zaprojektowanie i wytworzenie DOE do systemu MIMO	105
6.3.2	Układ eksperymentalny MIMO	106
7	Analiza niepewności pomiarowych	115
7.1	Symulacje numeryczne i modelowanie 3D	115
7.2	Wytwarzanie DOE	117
7.3	Pomiary THz TDS	118
7.4	Pomiary eksperymentalne	119
8	Wnioski i podsumowanie	121
8.1	Badania właściwości optycznych materiałów w zakresie promieniowania THz	121
8.2	Wpływ parametrów druku 3D na właściwości optyczne wytworzonych obiektów z COC	122
8.3	Multipleksacja przestrzenna promieniowania THz – struktury MISO	123
8.4	Demultipleksacja przestrzenna promieniowania THz – struktury SIMO . .	124
8.5	System MIMO	125

Aneks	131
Załącznik 1: Szczegółowa analiza pomiarów THz TDS dla próbek P15-PLA(3)	131
Załącznik 2: Specyfikacja materiałów polimerowych	132
Załącznik 3: Właściwości optyczne polimerów w zakresie promieniowania THz	135
Załącznik 4: Właściwości optyczne polimerów używanych w druku 3D w tech- nologii SLS	141
Załącznik 5: Wpływ składu polimerów na właściwości optyczne wytworzonych próbek	143
Załącznik 6: Właściwości optyczne materiałów odlewniczych w zakresie THz . .	146
Załącznik 7: Parametry druku 3D niezmieniające właściwości optycznych obiek- tów wytworzonych z COC	151
Bibliografia	155

Rozdział 1

Wstęp i motywacja

W ostatnich latach obserwuje się znaczący rozwój technologiczny w wielu dziedzinach przemysłu, medycyny, gospodarki, czy informatyki. Wraz z postępem technologicznym rośnie zapotrzebowanie na przesyłanie coraz większej ilości danych w możliwie najkrótszym czasie. Problem ten w szczególności dotyczy dziedzin takich jak:

- Internet rzeczy (*ang. Internet-of-Things – IoT*), gdzie wymagane jest szybkie przesyłanie informacji w czasie rzeczywistym. Technologia IoT wymaga komunikacji między urządzeniami, gdzie niezbędne jest rozpoznawanie mowy czy podejmowanie decyzji. Znajduje ona zastosowania w obszarach technologicznych takich jak przemysł 4.0, inteligentne domy, rolnictwo precyzyjne, czy zarządzanie miejskie [1,2].
- Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe (*ang. Artificial Intelligence – AI and Machine Learning – ML*). AI i ML coraz częściej działają w chmurze. Systemy AI wymagają transferu dużej ilości danych i szybkiej komunikacji, często w czasie rzeczywistym, aby zapewnić prawidłowe działanie aplikacji opartych na sztucznej inteligencji [3].
- Rozszerzona i wirtualna rzeczywistość (*ang. Augmented Reality – AR and Virtual Reality – VR*). Są to technologie dające użytkownikowi dostęp do w pełni wirtualnego środowiska czy też rzeczywistości z elementami cyfrowymi. Stanowią one duży potencjał do zaawansowanych zastosowań technologicznych w edukacji, medycynie, rozrywce czy architekturze. Do prawidłowego funkcjonowania tych technologii wymagane jest szybkie i stabilne łącze o wysokiej przepustowości oraz małych opóźnieniach na etapie transferu danych [4,5].

- Telemedycyna i zdalna opieka zdrowotna. W dzisiejszych czasach coraz bardziej powszechne staje się monitorowanie stanu zdrowia pacjenta przy użyciu urządzeń mobilnych. Obecnie telefony komórkowe, zegarki czy elektroniczne pierścionki (na przykład oferowane przez firmę Samsung) posiadają funkcjonalność monitorowania saturacji krwi, tętna czy fazy snu użytkownika. Ponadto wiele profesjonalnych urządzeń medycznych posiada funkcje zdalnego monitorowania stanu zdrowia pacjenta. Wysoka jakość połączenia, jak i przesyłania danych, są kluczowymi aspektami prawidłowego funkcjonowania wspomnianych urządzeń oraz determinują możliwość szybkiego reagowania w przypadku pogorszenia stanu zdrowia pacjenta [6–8].
- Gospodarka cyfrowa. Obecnie coraz częściej prowadzenie działalności gospodarczej odbywa się w sposób cyfrowy, z wykorzystaniem nowoczesnych technologii oraz platform internetowych, co umożliwia szybsze, bardziej efektywne i globalne zarządzanie procesami biznesowymi. Rozwój gospodarki cyfrowej jest napędzony przez usługi chmurowe, media cyfrowe (w tym media społecznościowe) czy też handel elektroniczny. W konsekwencji gospodarka cyfrowa wymaga coraz większej transmisji danych oraz niezawodności i bezpieczeństwa połączeń internetowych umożliwiających płynne przetwarzanie transakcji oraz zabezpieczenie danych klientów [9, 10].

Aktualnie dystrybucja danych w sieciach telekomunikacyjnych do użytkowników końcowych odbywa się głównie przy użyciu technologii Wi-Fi, gdzie wymagana jest bezprzewodowa transmisja krótkiego zasięgu. Przepustowość łączy wykorzystywanych w obecnie funkcjonujących standardach Wi-Fi i sieci 5G osiąga swoje granice, co stwarza konieczność wdrożenia bardziej zaawansowanych technologii umożliwiających rozszerzenie obecnych rozwiązań. Rozważa się wykorzystanie technologii terahercowych (THz) (szczegółowo omówionych w Podrozdziale 3.2 i Podrozdziale 3.3), które mają znaczący potencjał do rozwiązania wielu problemów, z którymi zmagają się obecnie stosowane systemy telekomunikacyjne. Pasma THz oferują wielokrotnie wyższe częstotliwości od obecnie stosowanych standardów, tym samym znacząco zwiększając przepustowość łączy telekomunikacyjnych [11–13].

Warto zwrócić uwagę na to, że w roku 2017 Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników (IEEE) opublikował standard IEEE 802.15.3d, świadczący o zastosowaniu pasma THz (w zakresie 252 GHz – 325 GHz) w przyszłych rozwiązaniach

telekomunikacyjnych, w tym w standardzie 6G [14, 15]. Standard ten skupia się na opracowaniu krótkozasięgowych bezprzewodowych rozwiązań pozwalających na osiągnięcie transmisji danych z prędkością sięgającą 100 Gb/s, która znacząco przewyższa obecnie stosowane komercyjnie technologie. Prace naukowe opublikowane w ostatnich latach wskazują możliwość uzyskania zmierzonego przesyłu informacji z wykorzystaniem promieniowania z zakresu THz [16–19] (temat został omówiony w Podrozdziale 3.2). Ponadto w sieciach telekomunikacyjnych 6G oczekuje się przesyłania danych w prędkościami sięgającymi poziom Tb/s z użyciem pasma THz. Pozwoli to wdrożyć rozwiązania, takie jak holograficzna komunikacja w czasie rzeczywistym, zdalne operacje i zabiegi w medyczne, inteligentne i zintegrowane systemy bezzałogowych statków powietrznych (*ang. Unmanned Aerial Vehicles – UAVs*) czy zaawansowane rozwiązania AI [6, 20–22]. Przedstawione aspekty jednoznacznie wskazują na potrzebę podjęcia badań nad zastosowaniem technologii THz w systemach telekomunikacyjnych.

Należy podkreślić konieczność wykorzystania multipleksacji promieniowania w systemach telekomunikacyjnych w celu zwiększenia przepustowości łączy. Multipleksacja jest to technika pozwalająca na jednoczesne przesyłanie wielu sygnałów pojedynczym kanałem w systemie lub wieloma kanałami równolegle. Obecnie stosuje się zróżnicowane metody multipleksacji, oparte na różnych właściwościach optycznych promieniowania, takich jak częstotliwość, czas propagacji sygnału czy polaryzacja promieniowania (szczegółowo opisane w Podrozdziale 3.3). Multipleksacja pozwala na wdrożenie systemów typu MIMO (*ang. Multiple-Input Multiple-Output*), w których wykorzystuje się wiele anten (źródeł promieniowania) oraz odbiorników (detektorów promieniowania) do jednoczesnego przesyłania wielu sygnałów, a tym samym zwiększenia przepustowości łączy telekomunikacyjnego. W rozumieniu niniejszej pracy układ typu MIMO pozwala na jednoczesne przesyłanie danych między wieloma nadajnikami i odbiornikami w wybranych konfiguracjach. Nie oznacza to, że występuje przesył sygnału między każdą parą nadajnik-odbiornik, jak w typowo definiowanym massive-mimo w 5G [23–26], choć wykorzystując dyfrakcyjne elementy optyczne takie rozwiązanie jest również możliwe. Innym istotnym aspektem jest to, że do tej pory wykorzystywane pasma częstotliwości w bezprzewodowych systemach telekomunikacyjnych krótkiego zasięgu opierały się przede wszystkim o technologie bazujące na rozwiązaniach elektronicznych, podobnie do telekomunikacji radiowej. Niskie częstotliwości, wykorzystywane w standardzie Wi-Fi i 5G, charakteryzują się dużą

penetracją przez promieniowanie różnych rodzajów materiałów, w wyniku czego promieniowanie swobodnie przenika znaczną część napotkanych na swojej drodze przeszkód.

Z wdrożeniem pasm wyższych częstotliwości, które będą stosowane w standardzie 6G, wiąże się konieczność zmiany dotychczasowo stosowanych technologii na podejście w większym stopniu oparte na rozwiązaniach optycznych. Mniejsza przenikalność promieniowania THz przez napotkane przeszkody wymaga w wielu przypadkach precyzyjnego sterowania wiązkami optycznymi, tak żeby propagowany w wolnej przestrzeni sygnał osiągnął swój zamierzony cel (na przykład dotarł do danego konkretnego odbiornika). Ze względu na stosunkowo duże długości fali występujące w zakresie THz klasyczne podejście optyki refrakcyjnej nie jest optymalnym rozwiązaniem. W związku z powyższym prowadzone są badania naukowe nad zastosowaniem rozwiązań optyki dyfrakcyjnej w technologiach THz. Znaczącą zaletą optyki dyfrakcyjnej jest możliwość dowolnego formowania frontów falowych, co pozwala na precyzyjne sterowanie wiązką [27–32]. Prowadzi to do zapotrzebowania na pasywne dyfrakcyjne elementy optyczne (*ang. Diffractive Optical Elements – DOE*) realizujące funkcjonalność multipleksacji i demultipleksacji sygnałów w zakresie promieniowania THz, co stanowi jeden z tematów przewodnich tej pracy.

Drugi wiodącym aspektem przedstawionym w pracy jest maksymalizacja wydajności THz DOE. Jest ona kluczowa dla aplikacji DOE w systemach optycznych (takich jak systemy telekomunikacyjne) ze względu na charakterystykę źródeł i detektorów THz, ale również właściwości promieniowania oraz potrzebę optymalizacji sterowania wiązką. W pracy przeprowadzono pomiary właściwości optycznych materiałów w zakresie promieniowania THz wykonane przy użyciu THz spektroskopii w dziedzinie czasu (*ang. THz Time-Domain Spectroscopy – THz TDS*) na 103 materiałach polimerowych, kompozytach i materiałach odlewniczych (opis w Podrozdziale 5.1 oraz Załączniku 3 i Załączniku 6 w Aneksie do pracy). Dzięki temu udało się wytypować materiały nie wprowadzające tłumienia promieniowania THz, które mogą być stosowane w szybkich metodach prototypownia, takich jak druk przestrzenny. Ponadto szczegółowo zbadano wpływ parametrów druku 3D w technologii osadzania topionego materiału (*ang. Fused Deposition Modeling – FDM*) na właściwości optyczne wytworzonych obiektów (opis w Podrozdziale 5.2). Analiza otrzymanych wyników pozwoliła określić optymalne parametry druku do wytwarzania DOE o ciągłych profilach fazowych dla zakresu THz. Dodatkowo, zaproponowana została nowatorska metoda modelowania przestrzennego

pozwalająca na dokładne odwzorowanie przestrzenne dwuwymiarowych numerycznych reprezentacji DOE o złożonych profilach fazowych (opis w Podrozdziale 4.6). Następnie przedstawiono w pracy metody projektowania DOE do zastosowań telekomunikacyjnych gwarantujące zwiększenie wydajności dyfrakcyjnej względem prac naukowych z ostatnich lat (opisane w Podrozdziale 6.1.1 oraz Podrozdziale 6.2.1). W rezultacie praca przedstawia optymalizację pełnego procesu powstawania DOE, a także demonstruje wyniki symulacji numerycznych i pomiarów eksperymentalnych dla wytworzonych DOE do zastosowań w systemach telekomunikacyjnych realizujących multipleksację wiązek THz.

Rozdział 2

Cel, zakres oraz teza rozprawy

Tematem przewodnim rozprawy jest zaprojektowanie oraz zwiększenie wydajności dyfrakcyjnych elementów optycznych, które realizują funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz. W ramach realizacji tematyki niniejszej rozprawy doktorskiej określono zakres pracy obejmujący następujące zagadnienia:

1. wykorzystanie algorytmów iteracyjnych oraz metod opartych na łączeniu różnego rodzaju rozkładów fazowych do zaprojektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych działających w zakresie promieniowania THz;
2. modelowanie działania zaprojektowanych struktur dyfrakcyjnych poprzez wykonanie symulacji numerycznych układów optycznych wykorzystując propagację zmodyfikowaną metodą splotową;
3. przeprowadzenie badań właściwości optycznych materiałów w zakresie promieniowania THz w celu wytypowania materiałów o pożądanych właściwościach optycznych, które mogą zostać wykorzystane do prototypowania DOE;
4. przeprowadzenie badań wpływu parametrów druku przestrzennego w technologii FDM na właściwości optyczne wytworzonych obiektów w zakresie promieniowania THz (określenie rekomendowanych parametrów druku przestrzennego do prototypowania DOE);
5. opracowanie metod modelowania przestrzennego pozwalających na dokładne odwzorowanie złożonych profili fazowych THz DOE w druku przestrzennym;
6. wytworzenie zaprojektowanych struktur dyfrakcyjnych korzystając z druku przestrzennego w technologii FDM;

7. eksperymentalna weryfikacja działania zaprojektowanych struktur dyfrakcyjnych w układzie typu MIMO;
8. porównanie otrzymanych wyników symulacji numerycznych i pomiarów eksperymentalnych oraz analiza niepewności.

Zaproponowane w pracy podejście dyfrakcyjne umożliwia znaczące zmniejszenie grubości elementów optycznych w porównaniu do rozwiązań opartych na optyce refrakcyjnej. Dzięki temu tłumienie promieniowania wprowadzane przez struktury jest znacząco niższe. Ponadto, optyka dyfrakcyjna pozwala na dowolne kształtowanie frontów falowych, co umożliwia precyzyjną manipulację wiązkami optycznymi, w tym przestrzenne dzielenie i łączenie sygnałów, a także pozaosiowe uginanie i skupianie wiązek, przekierowując sygnały THz do wyznaczonego celu, którym może być pojedynczy kanał optyczny lub detektor promieniowania.

Projektowanie zaawansowanych DOE realizujących funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz zostało przeprowadzone wykorzystując metody oparte na łączeniu różnych rozkładów fazowych, jak i na algorytmach iteracyjnych. W rezultacie zaproponowane rozwiązania gwarantują niemal ciągły rozkład fazy DOE, który w teorii pozwala na osiągnięcie wydajności dyfrakcyjnej sięgającej wartości 100% [33, 34].

W pracy położono szczególny nacisk na proces wytwarzania DOE. Zaproponowano nową metodę modelowania przestrzennego pozwalającą na dokładne odwzorowanie dwuwymiarowej postaci numerycznej DOE o złożonych rozkładach fazowych. Przeprowadzono szczegółowe badania THz właściwości optycznych materiałów polimerowych, kompozytów oraz materiałów odlewniczych o potencjalnym zastosowaniu w produkcji THz DOE. Ponadto przeprowadzono analizę wpływu parametrów druku przestrzennego w technologii FDM na właściwości optyczne materiału COC (*ang. Cyclic Olefin Copolymer*) w zakresie promieniowania THz. Każde z tych zagadnień określało pewien fragment w procesie prototypowania DOE, a przeprowadzone badania miały na celu optymalizację produkcji DOE o złożonych profilach przestrzennych, w rezultacie zwiększając wydajność struktur, a w konsekwencji wydajność całych układów optycznych.

W celu potwierdzenia poprawności działania zaprojektowanych DOE multipleksujących i demultipleksujących promieniowanie THz przeprowadzono trzy-etapową weryfikację. W pierwszym kroku działanie zaprojektowanych rozkładów fazowych DOE sprawdzono przeprowadzając symulacje numeryczne w programie opartym na propagacji

opisanej za pomocą zmodyfikowanej metody splotowej (Light Sword 6.0) [35]. Następnie dla struktur wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM przeprowadzono pomiary eksperymentalne, które porównano z wcześniej uzyskanymi wynikami symulacji komputerowych. Finalnie, w końcowym etapie pracy zaproponowano układ typu MIMO, w którym przedstawiono implementację struktur do multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz do wielokanałowej transmisji sygnałów wspólnym torem optycznym.

Na podstawie zawartych w tym rozdziale zagadnień oraz opisanych we wstępie wyzwań dotyczących telekomunikacji THz postawiono główną tezę rozprawy stanowiącą, że: **Możliwe jest opracowanie wielokanałowego systemu transmisji sygnałów w oparciu o dyfrakcyjne elementy optyczne realizujące funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz.**

Zaprojektowanie układu typu MIMO realizującego funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz z wykorzystaniem DOE było możliwe pod warunkiem spełnienia pewnych dodatkowych wymagań sformułowanych w postaci następujących zagadnień. Po pierwsze założone zostało, że oba elementy, multipleksujący MISO (*ang. Multiple-Input Single-Output*) oraz demultipleksujący SIMO (*ang. Single-Input Multiple-Output*), będą dedykowanymi strukturami dyfrakcyjnymi zaprojektowanymi i wytworzonymi w ramach rozprawy. Po drugie konieczne było zastosowanie zaawansowanej metody prototypowania DOE operujących w zakresie promieniowania THz. Obejmuje to opracowanie metody precyzyjnego modelowania przestrzennego, wybór odpowiednich nisko-tłumiących materiałów i dostosowanie paramentów druku przestrzennego w technologii FDM do konkretnego zastosowania. Dzięki temu możliwe było precyzyjne wytworzenie DOE pracujących w zakresie THz o zwiększonej wydajności.

Wyniki badań zaprezentowanych w niniejszej pracy zostały opublikowane w następujących artykułach naukowych:

- **Kaluza, M.**, Komorowski, P., Surma, M., Nieradka, A., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Advanced diffractive optical elements implementing multiple-input spatial multiplexing of terahertz radiation,” *Optics and Lasers in Engineering* 184, 108606 (Jan. 2025).
- **Kaluza, M.**, Walczakowski, M., and Siemion, A., “Exploring the impact of 3D printing parameters on the THz optical characteristics of COC material,” *Materials* 17, 5104 (Oct. 2024).

- **Kaluza, M.**, Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Terahertz focusing blazed diffractive optical elements for frequency demultiplexing,” *Advanced Optical Technologies* 12 (Dec. 2023).
- Surma, M., **Kaluza, M.**, Czerwińska, P., Komorowski, P., and Siemion, A., “Neural-network based approach to optimize THz computer generated holograms,” *Photonics Letters of Poland* 13, 88 (Dec. 2021).

Rozprawa została podzielona na osiem rozdziałów. Rozdział 1. i 2. zawierają wstęp, główną motywację oraz tezy postawione w rozprawie. Rozdział 3. opisuje główne zżanie-
nia dotyczące tematyki pracy, podczas gdy Rozdział 4. skupia się na metodach, których
użyto w przeprowadzonych badaniach – zarówno materiałowych, jak i dotyczących
projektowania struktur dyfrakcyjnych. Rozdział 5. opisuje wyniki badań przeprowado-
nych na grupie 103 materiałów polimerowych, kompozytów i materiałów odlewniczych.
Natomiast Rozdział 6. przedstawia metody projektowania, prototypownia oraz wyniki
uzyskane dla DOE realizujących funkcjonalność multipleksacji oraz demultipleksacji
promieniowania THz, jak i wyniki uzyskane dla zaproponowanego układu MIMO.
Dodatkowo, Rozdział 7. poświęcony jest analizie błędów oraz wyzwań, z którymi
zmagano się podczas wykonywania pomiarów. Rozdział 8. szczegółowo podsumowuje
pracę, przedstawia najważniejsze osiągnięcia pracy, jak i definiuje wyzwania, z którymi
należy się zmierzyć w kolejnych badaniach.

W niniejszej pracy zdecydowano się na zastosowanie skróconych nazw w języku
angielskim ze względu na dominującą dostępność literatury naukowej w tym języku oraz
konieczność zachowania spójności z nazewnictwem stosowanym w cytowanych źródłach.

Rozdział 3

Kluczowe zagadnienia związane z tematyką rozprawy doktorskiej

W niniejszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie do zagadnień omawianych w pracy, z uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy dostępnego w literaturze. Opisano etapy rozwoju telekomunikacji, zwracając szczególną uwagę na najnowsze osiągnięcia, które mają kluczowe znaczenie dla współczesnych systemów komunikacyjnych. W kontekście badań nad telekomunikacją w zakresie promieniowania THz istotne jest zrozumienie technologii multipleksacji oraz systemów takich jak MIMO, które przyczyniają się do zwiększenia transmisji danych systemów telekomunikacyjnych. Dalsza część rozdziału koncentruje się na materiałach wykorzystywanych do produkcji pasywnych elementów optycznych w zakresie THz oraz ich właściwościach optycznych. Szczególną wagę przykładą się do dyfrakcyjnych elementów optycznych (DOE), które realizują złożone operacje, umożliwiając precyzyjne kształtowanie frontów falowych i ich manipulację. Poruszono również kwestie modelowania i wytwarzania DOE, gdzie druk przestrzenny odgrywa istotną rolę.

3.1 Promieniowanie THz i jego zastosowania

Promieniowanie THz, choć nie ma ściśle zdefiniowanych granic, często określane jest jako zakres częstotliwości od 0,1 THz do 10 THz, co odpowiada długościom fal od około 3 mm do 30 μm , stanowiąc obszar pomiędzy promieniowaniem mikrofalowym a promieniowaniem podczerwonym. Charakteryzuje się ono niską energią fotonów, jest promieniowaniem

niejonizującym i bezpiecznym dla organizmów żywych. W tym zakresie częstotliwości wykorzystuje się zarówno zjawiska optyczne, jak i elektroniczne, co umożliwia stosowanie hybrydowych rozwiązań technologicznych – od anten, soczewek i światłowodów po pryzmaty i elementy dyfrakcyjne. W zależności od konkretnej częstotliwości stosowane są zarówno komponenty optyczne, jak i układy elektroniczne, dostosowując technologie THz do specyficznych wymagań aplikacyjnych.

Przez długi czas promieniowanie THz pozostawało w dużej mierze niewykorzystywane, głównie ze względu na tak zwaną „przerwę THz” [36–38]. Ograniczenie to było ściśle związane z tym, że aktywne komponenty systemów THz były niezwykle kosztowne. Ponadto, źródła i detektory były nieefektywne i trudne do wdrożenia w określonych zastosowaniach. Wynikało to zarówno ze znaczących rozmiarów elementów aktywnych, jak i ich pracy, w wielu przypadkach, w temperaturach kriogenicznych [39–41]. Jednakże w ciągu ostatnich dwóch dekad, dzięki postępowi w technologiach optycznych i mikrofalowych, nastąpił szybki rozwój technologii w zakresie promieniowania THz, znajdującego się na pograniczu tych dwóch dziedzin. Laboratoria badawcze skupiające się na badaniach THz można obecnie znaleźć w wielu ośrodkach badawczych. Znacząco mniejsze rozmiary źródeł i detektorów pozwalają na realizację stosunkowo kompaktowych układów wykorzystujących promieniowania THz [42–44].

Rezultaty postępu technologicznego są widoczne w wielu dziedzinach, gdzie wykorzystuje się technologie THz ze względu na unikalne właściwości promieniowania THz. THz są silnie pochłaniane przez wodę [45–51], doskonale odbijają się od metali oraz charakteryzują się stosunkowo wysoką transmisją przez różne typy materiałów, które w innych zakresach promieniowania są absorpcyjne [27, 52–58]. Obecnie coraz większą uwagę przykładana się do zastosowania systemów THz w biologii i medycynie [59–63], szczególnie w kontekście nieinwazyjnego obrazowania tkanek i analizy biomolekuł. Techniki te umożliwiają wykrywanie zmian chorobowych, takich jak nowotwory, dzięki zdolności do precyzyjnego rozróżniania struktur biologicznych na podstawie ich właściwości dielektrycznych, czy też monitorowania zawartości wody w tkankach, co dostarcza informacji diagnostycznych [59, 60]. Ze względu na wspomniane właściwości promieniowania THz znajduje ono zastosowanie w nieinwazyjnej diagnostyce, gdzie wykorzystuje się różne metody obrazowania, w tym również metodę pola ciemnego i kontrast fazowy [64–70].

Innym zastosowaniem technologii THz są systemy bezpieczeństwa [64, 71–74]. Promieniowanie THz przenika przez wiele materiałów dielektrycznych, takich jak ubranie czy bagaż. Torby bagażowe wytwarzane są najczęściej z jednego z trzech rodzajów polimerów: ABS (*ang. Acrylonitrile Butadiene Styrene*), PP (*ang. Polypropylene*) lub PC (*ang. Polycarbonate*), które są w dużej mierze transparentne w zakresie promieniowania THz. Dzięki temu możliwe jest wykrywanie ukrytych niebezpiecznych przedmiotów, takich jak broń wytworzona z metalu, która doskonale odbija promieniowanie THz. Narkotyki i ładunki wybuchowe są kolejnymi substancjami interesującymi w tym zakresie promieniowania ze względu na charakterystykę widma występującą dla tych substancji w paśmie THz (0,1 — 10 THz). Detekcja pików absorpcyjnych specyficznych drgań i przejść rotacyjnych na poziomie molekularnym pozwala na wykrycie wielu rodzajów ładunków wybuchowych, takich jak TNT (*ang. Trinitrotoluene*), RDX (*ang. Research Department Explosive*) czy PETN (*ang. Pentaerythritol Tetranitrate*) [74, 75].

Technologie THz wykorzystywane są również w astronomii [76–79]. Służą one do rejestracji promieniowania docierającego z kosmosu, co pozwala uzyskać szczegółowe informacje o pyłe międzygwiazdowym, zimnych molekułach czy też procesach formowania się planet i gwiazd. Promieniowanie emitowane przez obiekty w kosmosie w dużej mierze przyjmuje długości fali z zakresu światła widzialnego i podczerwieni. Jednak wraz z ekspansją wszechświata promieniowanie ulega przesunięciu ku czerwieni (ku niższym częstotliwościom). Dlatego teleskopy pracujące w zakresie THz pozwalają na detekcję obiektów odległych od Ziemi, które inaczej były niemożliwe do zbadania.

W przyszłości technologie THz będą kluczowym elementem rozwoju telekomunikacji, przyczyniając się do przełomu w przesyłaniu informacji. Obecnie poprowadzone są liczne badania naukowe dotyczące komunikacji THz [12, 13, 15, 31, 80–85]. To zagadnienie zostanie szerzej omówione w dalszych częściach pracy.

3.2 Kluczowe etapy rozwoju telekomunikacji

Telekomunikacja wywodzi się od wynalezienia telegrafu przez Samuela Morse’a w roku 1837. Kilka lat później, w 1844 roku, po raz pierwszy udało się pomyślnie przesłać wiadomość za pomocą kodu Morse’a. Kolejnym etapem było wynalezienie telefonu przez Alexandra Grahama Bella w roku 1876, co pozwoliło na przewodową transmisję

głosu. W kolejnych dziesięcioleciach postęp przemysłu przyczynił się do rozwoju sieci kablowych oraz wprowadzenia automatycznych centrali telefonicznych. W międzyczasie w roku 1895 Guglielmo Marconi wynalazł radio, które było pierwszym praktycznym zastosowaniem transmisji sygnału bezprzewodowego. Następnym kamieniem milowym rozwoju telekomunikacji było powstanie telewizji w roku 1927, kiedy miała miejsce pierwsza publiczna demonstracja w pełni elektronicznego systemu telewizyjnego.

Kilkadziesiąt lat później w roku 1980 powstała pierwsza generacja (1G) systemów telekomunikacyjnych, czyli analogowe systemy komórkowe. Jednymi z pierwszych systemów były NMT (*ang. Nordic Mobile Telephone*) w Europie oraz AMPS (*ang. Advanced Mobile Phone System*) w USA, które opierały swoje działanie o modulację częstotliwości. Druga generacja (2G) została wprowadzona kilkanaście lat później, a jej działanie opierało się na technologii cyfrowej. Korzystała ona ze standardów GSM (*ang. Global System for Mobile Communications*), PDC (*ang. Personal Digital Cellular*) oraz CDMA (*ang. Code Division Multiple Access*). Gwarantowało to lepszą jakość dźwięku, wyższy transfer danych, a co za tym idzie przesyłanie wiadomości tekstowych (tak zwanych SMS (*ang. Short Message Service*)), a także wyższe bezpieczeństwo. Trzecia generacja (3G) powstała w 2001 roku i wprowadzała wyższy transfer danych dając dostęp do bardziej zaawansowanych usług, takich jak Internet mobilny czy multimedia. Do standardów technologicznych wdrożonych w 3G należała nowsza generacja standardu CDMA – CDMA2000 oraz UMTS (*ang. Universal Mobile Telecommunications System*). Czwarta generacja (4G) znacząco zwiększyła transfer danych oraz obniżyła latencję umożliwiając prędkość transferu danych do 100 Mb/s. Dodatkowo został wtedy wprowadzony standard LTE (*ang. Long Term Evolution*) pozwalający na efektywne zarządzanie danymi przy jednoczesnym wprowadzeniu zaawansowanych technik kodowania [86–89].

Obecnie dostępna jest kolejna generacja (5G) systemów telekomunikacyjnych. Wykorzystuje ona pasma sub-6 GHz w tym pasmo C (3,3 GHz – 4,2 GHz) gwarantując wyższą częstotliwość w porównaniu do poprzednich standardów. Typowy transfer danych w rozwiązaniach komercyjnych w sieciach 5G ma wartość od 100 Mb/s do 1 Gb/s dla prędkości pobierania danych oraz 50 Mb/s do 500 Mb/s dla prędkości wysyłania danych. Stopniowo wdrażane są pasma milimetrowe, których częstotliwości obejmują zakresy od 24 GHz do 31 GHz, jednak gwarantują one przesył informacji na niewielkich odległościach [89–91].

W ostatnich latach pojawiło się wiele prac naukowych prezentujących aplikacje technologii THz do zastosowań w systemach telekomunikacyjnych, a w szczególności przyszłego standardu 6G. Niektóre z nich stanowią istotne osiągnięcia w dziedzinie telekomunikacji. W 2012 roku Song i współautorzy w swojej pracy zaprezentowali system oparty na diodach Schottky’ego osiągając transfer danych 24 Gb/s dla pasma 300 GHz w wolnej przestrzeni [92]. Rok później naukowcy z Instytutu Technologii w Karlsruhe przedstawili zintegrowany układ THz pozwalający na przesył informacji na odległość 20 m z prędkością 100 Gb/s dla częstotliwości 237,5 GHz [16]. W roku 2015 Kallfass i współautorzy opublikowali pracę, w której przedstawiono prędkość przesyłu 64 Gb/s na odległość 850 m dla częstotliwości 240 GHz wykorzystując modulację QPSK (*ang. Quadrature Phase Shift Keying*) oraz 8PSK (*ang. 8-Phase Shift Keying*) przy użyciu pojedynczego kanału optycznego [93]. W roku 2018 naukowcy z Politechniki Montrealskiej przedstawili w swojej pracy transmisję w czasie rzeczywistym nieskompresowanego sygnału wideo dla częstotliwości 138 GHz osiągając 99% nieuszkodzonych klatek w rozdzielczości HD oraz 95% w rozdzielczości 4K [94]. W 2019 roku naukowcy z Uniwersytetu w Fudan opracowali sześciokanałowy system z multipleksacją polaryzacji, gdzie w każdym kanale przesyłano dane z prędkością 20 Gb/s. W rezultacie gwarantując prędkość przesyłu danych 120 Gb/s w zakresie częstotliwości od 375 GHz do 500 GHz [19]. W roku 2021 Feng i współautorzy przedstawili transmisję w czasie rzeczywistym na odległość 1030 m przy użyciu rozwiązania bazującego na diodach Schottky’ego dla częstotliwości 220 GHz [95]. W roku 2022 Zhang i współautorzy zaprezentowali system do transmisji w wolnej przestrzeni o prędkości 206,25 Gb/s dla częstotliwości z zakresu 360 GHz – 430 GHz [17]. W tym samym roku firma Huawei Technologies przedstawiła zewnętrzną transmisję o prędkości 240 Gb/s na odległość 500 m dla częstotliwości 220 GHz z pasmem przenoszenia 13,5 GHz [96]. Warto również zwrócić uwagę na pracę Jia i współautorów przedstawiającą system bazujący na zintegrowanym układzie fonicznym z dwoma laserami do bezprzewodowej transmisji 131 Gb/s na odległości 10,7 m dla emitowanej mocy -24 dBm oraz częstotliwości 400 GHz [18]. W roku 2024 Cai w swojej pracy przedstawił system komunikacji THz oparty na technologii fotonicznej, wykorzystujący bezprzewodowe łącza (2×2 MIMO), który gwarantuje przepustowość 232 Gb/s na odległości 200 m w warunkach zewnętrznych [97]. W tym samym roku Wang i współautorzy opublikowali pracę, w której przedstawili możliwość formowania wiązki dostosowywaną przez użytkownika.

Pozwala to na komunikację na poziomie 72 Gb/s na odległość 300 mm oraz osiągnięcie formowania wiązki w zakresie 360° w płaszczyźnie azymutalnej, co umożliwia wspieranie ośmiu jednoczesnych połączeń bezprzewodowych z wartością prędkości przesyłu danych 40 Gb/s [98]. Badania te stanowią istotny krok w kierunku rozwoju technologii 6G, umożliwiając długodystansową i wysokopojemnościową komunikację bezprzewodową.

Tak szybki rozwój technik telekomunikacji wiąże się z poszukiwaniem coraz to nowych rozwiązań, dlatego w niniejszej rozprawie proponowane jest uzupełnienie tych technik o wykorzystanie efektywnych elementów optycznych, a w szczególności dyfrakcyjnych struktur optycznych dla pasma promieniowania THz.

3.3 Telekomunikacja w zakresie promieniowania THz

Wraz z dynamicznym postępem technologicznym rośnie zapotrzebowanie na przesyłanie coraz większych ilości danych. W niedalekiej przyszłości systemy telekomunikacyjne oparte na standardzie 5G mogą okazać się niewystarczająco wydajne, co stworzy konieczność opracowania i wdrożenia nowych, bardziej zaawansowanych technologii. Jednym z potencjalnych rozwiązań jest zastosowanie technologii THz do transferu danych w wolnej przestrzeni w przyszłych systemach telekomunikacyjnych [80, 81, 84, 99–101], zwłaszcza w technologii 6G [12, 14, 23, 102–104]. Obecnie dystrybucja danych do użytkowników końcowych odbywa się przy użyciu technologii Wi-Fi, gdzie wymagana jest bezprzewodowa telekomunikacja krótkiego zasięgu. Jednak przepustowość łączy Wi-Fi i sieci 5G osiągnęła swoje granice. Rozwiązania THz, takie jak omówione w Podrozdziale 3.2 mogą zostać użyte od rozwiązania tego problemu [16–19, 92–96].

Zastosowanie rozwiązań opartych na paśmie promieniowania THz zapewnia wyższe częstotliwości sygnału w porównaniu do obecnie stosowanej technologii Wi-Fi, zwiększając tym samym potencjalny zakres transferu danych i poprawiając wydajność systemów telekomunikacyjnych bazujących na bezprzewodowej transmisji danych. Obecnie badania koncentrują się na ściśle określonych zakresach widmowych, między innymi paśmie D (110 GHz – 170 GHz), które do tej pory było wykorzystane do transmisji telewizyjnych podczas Igrzysk Olimpijskich w Pekinie [105], czy też wyższych pasmach zdefiniowanych w standardzie IEEE 802.15.3d (252 GHz – 322 GHz) [15]. Należy podkreślić, że wspomniane częstotliwości znacząco przekraczają obecnie stosowane pasma w standardach

5G czy Wi-Fi. Wykorzystanie częstotliwości THz w telekomunikacji ma szereg zalet. Częstotliwości THz mogą rozwiązać problemy związane z ograniczoną dostępnością pasma częstotliwości. Mogą one znacząco poprawić efektywność i przepustowość obecnych systemów bezprzewodowych. Stwarza to możliwość dla różnych zastosowań, które mogą wykorzystać bezprzewodową dystrybucję sygnału w zakresie THz w wolnej przestrzeni. Istnieje wiele przykładów obiecujących zastosowań technologii 6G, takich jak bezprzewodowe sieci lokalne (*ang. Wireless Local Area Network – WLAN*) o przepustowości Tb/s, bezprzewodowe osobiste sieci komputerowe (*ang. wireless personal area networks – WPAN*), zintegrowane sieci bezprzewodowe typu backhaul, czyli zintegrowany dostęp i łącze zwrotne (*ang. integrated access backhaul – IAB*) o przepustowości Tb/s, sieci bezprzewodowe IoT o przepustowości Tb/s w centrach danych lub THz systemy komunikacji kosmicznej [82, 83, 85, 106–108]. Zastosowanie technologii THz może rozwiązać wiele wyzwań związanych z telekomunikacją, jednak aby uzyskać optymalne transfery danych w systemach telekomunikacyjnych, konieczne jest zastosowanie multipleksacji promieniowania THz.

W celu zwiększenia transferu danych i obsługi większej ilości użytkowników w sieciach telekomunikacyjnych stosowane są zaawansowane techniki multipleksacji. Multipleksacja pozwala na jednoczesne przesyłanie wielu strumieni danych (sygnałów THz) poprzez pojedynczy kanały transmisyjny, co tym samym zwiększa przepustowość i efektywność systemu telekomunikacyjnego. Do wdrożenia takiego rozwiązania często wykorzystuje się systemy MIMO, które umożliwiają równoległe, jednoczesne przesyłanie i odbieranie danych. Dzieje się to przy użyciu wielu anten (źródeł promieniowania) i odbiorników (detektorów promieniowania). Można wyróżnić różne rodzaje multipleksacji w systemach MIMO ze względu na metodę przesyłania danych. Multipleksacja z podziałem czasu (*ang. Time Division Multiplexing – TDM*) polega na przesyłaniu sygnałów o tej samej częstotliwości w różnych przedziałach czasowych [109]. W multipleksacji z podziałem częstotliwości (*ang. Frequency Division Multiplexing*) równocześnie przesyłane są sygnały o różnej częstotliwości [99, 110–112]. W tym przypadku każde pasmo częstotliwości odpowiada oddzielnemu strumieniowi danych. Multipleksacja przestrzenna (*ang. Space Division Multiplexing – SDM*) polega na równoczesnym przesyłaniu danych wieloma kanałami optycznymi, które są przestrzennie rozseparowane [113, 114]. Multipleksacja z podziałem polaryzacji (*ang. Polarization Division Multiplexing – PDM*)

polega na równoczesnym przesyłaniu sygnałów o różnych polaryzacjach, dzięki czemu sygnały te mogą być następnie rozdzielone [19, 112, 115, 116]. Technika multipleksacji kodowych (*ang. Code Division Multiplexing – CDM*) opiera swoje działanie na unikalnym kodowaniu sygnałów o tej samej częstotliwości, a następnie dekodowaniu na etapie detekcji [117]. Należy wspomnieć, że możliwe jest łączenie wspomnianych metod, które może zostać zastosowane w implementacji systemu MIMO.

System MIMO może zostać zaimplementowany korzystając z różnych metod. Jedną z nich, wykorzystaną w tej pracy, jest połączenie promieniowania THz wygenerowanego z różnych anten (źródeł promieniowania) w pojedynczy kanał optyczny (tak zwana multipleksacja sygnałów optycznych). Następnie wiązka sygnałów THz propaguje się w wolnej przestrzeni wspólnym (pojedynczym) kanałem optycznym, po czym sygnały THz zostają rozseparowane przestrzennie i przekierowane do odbiorników (detektorów) (tak zwana demultipleksacja sygnałów). Do multipleksacji sygnałów używa się systemu MISO (*ang. Multiple-Input Single-Output*), natomiast do demultipleksacji sygnałów systemu SIMO (*ang. Single-Input Multiple-Output*). Funkcjonalności systemów MISO oraz SIMO mogą zostać zrealizowane na przykład przy użyciu pojedynczych pasywnych elementów optycznych lub poprzez złożenie kilku elementów. Na potrzeby tej pracy wprowadzono nazewnictwo elementów optycznych realizujących zadane funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji jako struktury MISO oraz struktury SIMO.

3.4 Właściwości materiałów w zakresie THz

W praktyce w każdym ze wspomnianych zastosowań w Podrozdziale 3.1 systemy optyczne wymagają właściwej implementacji pasywnych elementów optycznych. W przypadku światła widzialnego szkło i niektóre transparentne polimery są pożądanymi materiałami zarówno do produkcji optyki refrakcyjnej, jak i dyfrakcyjnej. Jednakże w przypadku promieniowania THz materiały, takie jak szkło, nie wykazują odpowiednich właściwości optycznych [118–120], ponieważ posiadają bardzo duży współczynnik absorpcji. Materiałem o dużej przezroczystości w zakresie promieniowania THz jest krzem, jednak możliwość jego zastosowania jest ograniczona. Wynika to z dużej wartości współczynnika załamania krzemu i, co za tym idzie, znacznego odbicia promieni THz na granicy dwóch ośrodków (tzw. strat odbiciowych Fresnela). Jedną z metod redukcji

wspomnianych strat jest zastosowanie powłok lub struktur antyrefleksyjnych [121–123]. Zastosowanie powłok antyrefleksyjnych często nie jest proste w realizacji ze względu na konieczność dopasowania materiałowego obu ośrodków, zarówno pod względem wartości współczynnika załamania, jak i struktur chemicznych materiałów. Struktury antyrefleksyjne wymagają technicznych możliwości ich wytworzenia na powierzchni danego elementu, np. w postaci odpowiednio małych elementów w kształcie piramid, wprowadzających pewien efektywny współczynnik załamania pozwalający na zredukowanie odbić fresnelowskich. W związku z tym w niektórych przypadkach konieczne staje się poszukiwanie alternatywnych rozwiązań, takich jak np. próba znalezienia podobnie przezroczystych materiałów o mniejszym współczynniku załamania.

Zastosowanie materiałów mniej powszechnie używanych w innych zakresach promieniowania do produkcji optyki THz może stanowić rozwiązanie tego problemu. Ostatnie badania wskazują, że różne materiały polimerowe [53, 124], kompozyty polimerowe [125], materiały odlewnicze [27, 57], kamienie naturalne [56], papier [58] i wiele innych materiałów są alternatywnymi opcjami do produkcji THz komponentów optycznych. Wynika to z właściwości optycznych wspomnianych grup materiałów w zakresie promieniowania THz, które można zweryfikować przy użyciu THz TDS. Ta technologia umożliwia określenie zarówno współczynnika tłumienia materiału, jak i współczynnika załamania (wynikającego z opóźnienia fazowego impulsu THz) wprowadzonego przez dany materiał. Znajomość grubości badanej próbki pozwala na określenie współczynników załamania i absorpcji badanego materiału [126–128]. W rezultacie takie badania określają dwie kluczowe właściwości optyczne materiałów wykorzystywane do projektowania elementów optycznych, a co za tym idzie dają one możliwość doboru odpowiedniego materiału do produkcji pasywnych elementów optycznych, które mogą następnie być bezpośrednio zastosowane w systemach THz.

Obecnie PTFE (*ang. Polytetrafluoroethylene*) jest jednym z najczęściej stosowanych komercyjnie materiałów do produkcji soczewek THz. Wykazuje on pożądane właściwości optyczne w zakresie promieniowania THz [129]. Jednakże komercyjnie dostępne są tylko relatywnie proste soczewki refrakcyjne wykonane z PTFE. Brak możliwości szybkiej i detalicznej produkcji złożonych elementów optycznych z PTFE uniemożliwia jego zastosowanie do wytwarzania skomplikowanych struktur, takich jak dyfrakcyjne elementy optyczne (DOE), które są często niezbędne w THz systemach optycznych THz.

3.5 Druk przestrzenny dyfrakcyjnych elementów optycznych dla zakresu promieniowania THz

W niektórych THz systemach optycznych kształtowanie wiązki uzyskuje się przy użyciu optyki refrakcyjnej. Należy jednak zauważyć, że soczewki refrakcyjne zaprojektowane dla promieniowania THz mają znaczącą grubość. Wynika to z małego stosunku odległości ogniskowej do średnicy soczewki oraz z dużej długości fal charakterystycznej dla promieniowania THz. Ponadto optyka refrakcyjna stosowana jest do implementacji prostych funkcjonalności, takich jak zmiana kształtu podstawowych frontów falowych lub skupianie wiązki na detektorze. Ze względu na rosnącą złożoność różnych systemów optycznych, coraz częściej stosuje się optykę dyfrakcyjną, która umożliwia bardziej zaawansowane kształtowanie wiązek optycznych [28, 33, 99, 130–133]. DOE zapewniają znacznie wyższą wydajność energetyczną dla zaprojektowanych długości fali i mają mniejszą grubość w porównaniu do optyki refrakcyjnej (grubość DOE jest rzędu długości fali wykorzystywanego promieniowania) [28, 33, 34].

Aby osiągnąć złożoną funkcjonalność realizowaną przez DOE, struktury często projektuje się przy użyciu algorytmów iteracyjnych [99, 133, 134] (np. opartych na algorytmie Gerchberga-Saxtona [135]) lub algorytmach wykorzystujących sieci neuronowe [32, 136–138]. W rezultacie generowane są rozkłady fazy (mapy fazowe), które reprezentują złożone profile odpowiadające opóźnieniom fazowym wprowadzanym przez dany DOE. Na szczęście innowacyjne metody modelowania przestrzennego umożliwiają precyzyjną reprezentację przestrzenną map fazowych [139], a technologie wytwarzania przyrostowego służą jako optymalne narzędzia do prototypownia DOE dla zakresu promieniowania THz [28, 132, 136, 140–142]. Wynika to z faktu, że metody druku przestrzennego zapewniają stosunkowo wysoką rozdzielczość przestrzenną (w porównaniu do długości fali THz), dzięki czemu możliwe jest dokładne odwzorowanie złożonych modeli przestrzennych. Dlatego też wytworzone DOE wykazują stosunkowo wysoką jakość i funkcjonalność zgodną z symulacjami numerycznymi [32, 140, 143].

Warto również podkreślić, że ostatnie badania w coraz większym stopniu koncentrują się nie tylko na addytywnym wytwarzaniu DOE, ale również na właściwościach optycznych materiałów polimerowych stosowanych w technologiach druku

przestrzennego [53, 125, 144–147]. Niektóre materiały polimerowe i kompozyty na bazie polimerów posiadają odpowiednie właściwości optyczne do wytwarzania nietłumiących DOE [54, 124, 125, 148, 149], porównywalne z PTFE, który jest głównie stosowany do wytwarzania komercyjnie dostępnych soczewek. Wysoce transparentny i biokompatybilny COC jest szczególnie obiecującym kandydatem [119, 140, 144, 149]. Ponadto jego biokompatybilne właściwości dają możliwości aplikacyjne w zastosowania "in vivo," w przypadku gdy konieczny może być kontakt z żywą tkanką [150]. Biorąc pod uwagę dyfrakcyjną optykę THz w konfiguracji transmisyjnej, pożądane właściwości optyczne materiałów to niski współczynnik absorpcji materiału, pozwalający na minimalizację tłumienia promieniowania podczas propagacji przez strukturę oraz współczynnik załamania w granicach od 1,45 do 1,65, dla którego nie występują znaczące straty odbiciowe Fresnela (dla niewielkich kątów oświetlenia analizowanej struktury). Dla takiego współczynnika załamania, zaprojektowane modele przestrzenne DOE wprowadzają odpowiednie opóźnienie fazowe, przy grubości modelu odpowiadającej kilkudziesięciu warstwom wydruku w procesie produkcyjnym. W ten sposób wytworzona struktura ma quasi-ciągły profil przestrzenny, nawet jeśli jest zaprojektowana dla tak dużej częstotliwości jak 1 THz (co odpowiada długości fali $300\ \mu\text{m}$) [151].

Obecnie najczęściej stosowane technologie druku przestrzennego to osadzanie topione materiału (FDM), gdzie uplastycznia się materiał w formie drutu polimerowego (tak zwanego filamentu), selektywne spiekanie laserowe (*ang. Selective Laser Sintering – SLS*) wykorzystujące materiał w postaci proszku polimerowego oraz technologia druku 3D oparta na cyfrowym przetwarzaniu światła (*ang. Digital Light Processing – DLP*), w której drukuje się z żywicy światłoutwardzalnej. Ze względu na dużą dostępność materiałów, jak i ich właściwości optyczne, technologia FDM jest rekomendowana do większości zastosowań w zakresie optyki THz.

W celu wytworzenia dobrej jakości DOE wybór odpowiednich parametrów druku przestrzennego w technologii FDM jest kluczowym aspektem. Przede wszystkim, DOE powinien być jednorodny w całej swojej objętości. Producenci filamentów polimerowych w technologii FDM skupiają się na przedstawieniu specyfikacji materiału z proponowanymi parametrami druku dostosowanymi do typowych zastosowań komercyjnych, które nie są tożsame z zastosowaniami w konkretnych technologiach, takich jak wytwarzanie THz elementów optycznych. Oznacza to, że materiał nie powinien odkształcać się

ani pozostawiać niepożądanych artefaktów podczas drukowania wedle parametrów zalecanych przez producenta. Standardowa gęstość (współczynnik) wypełnienia wydruku zalecana przez producentów waha się od 10% do 40%. Aby uzyskać wysoką jednorodność struktury DOE, wartość współczynnika wypełnienia wydruku powinna być równa 100%, co również pozwoli zachować odpowiednią wartość współczynnika załamania wewnątrz wytworzonego elementu. Dodatkowo, szczególną uwagę należy zwrócić na precyzję połączeń sąsiadujących linii i warstw podczas drukowania. Niedokładne łączenie linii i warstw może prowadzić do niepożądanych zjawisk dyfrakcji, czy też odbić Fresnela na elementach struktury dla wyższych częstotliwości THz (gdy linie druku przestają mieć wymiary sub-falowe). Należy podkreślić, że ustalenie odpowiednich parametrów drukowania jest nietrywialne, ponieważ lepko-sprężyste polimery wykazują zachowanie płynu nienewtonowskiego i podlegają efektowi Barusa oraz efektowi naprężeń normalnych podczas przepływu przez dyszę stosowaną w technologii FDM druku 3D [152, 153]. Dlatego też badania nad parametrami druku 3D są niezwykle istotne i mają na celu określenie pożądanych parametrów umożliwiających prawidłowe wytwarzanie THz elementów optycznych, takich jak DOE oraz poprawę ich właściwości optycznych w porównaniu do struktur wytwarzanych z parametrami proponowanymi przez producentów materiałów.

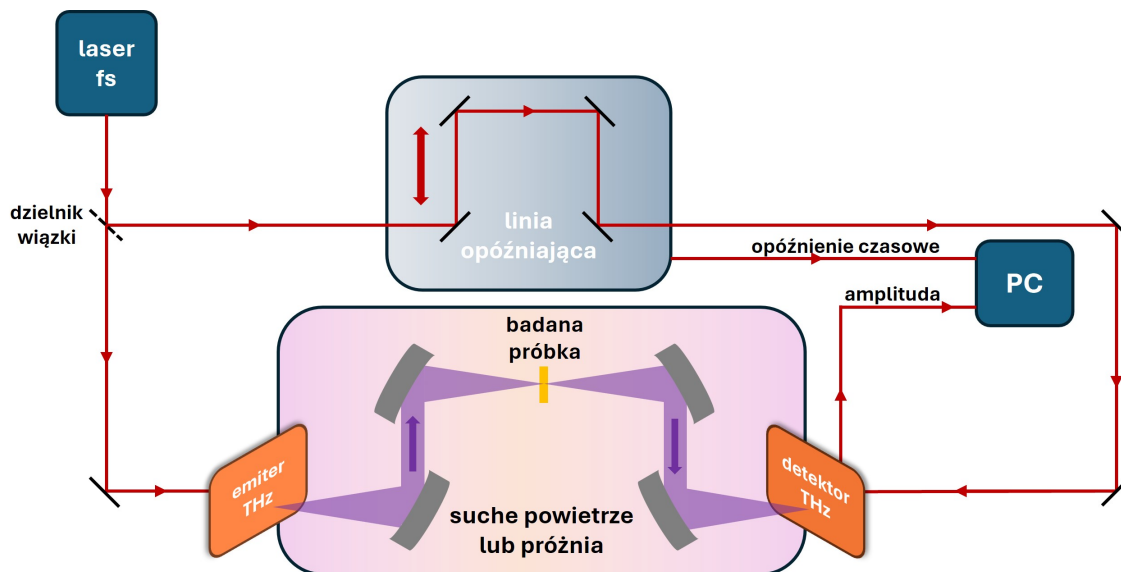
Rozdział 4

Metodyka

W niniejszym rozdziale opisana została metodyka pomiarowa wykorzystywana w badaniach opisanych w rozprawie. W celu wyznaczenia parametrów materiałowych różnych badanych substancji konieczne jest zrozumienie techniki terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (THz TDS). Następnie opisane zostały podstawy projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych, sposób symulowania ich poprawności działania oraz opis iteracyjnego algorytmu projektowania. Do wytworzenia zaprojektowanych elementów konieczne jest zrozumienie i opisanie zasad modelowania przestrzennego zaprojektowanych elementów oraz potem możliwości ich wytworzenia.

4.1 Terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu

Terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu to technologia umożliwiająca charakteryzację właściwości optycznych materiałów w zakresie promieniowania THz. Zakres operacyjny tej technologii zaczyna się od niskich częstotliwości w zakresie sub-THz, zwykle od 50 GHz do 100 GHz, sięgając do 4 THz dla pomiarów cienkich i transparentnych próbek. Istotną zaletą tej metody spektroskopowej jest jednoczesny pomiar zarówno tłumienia badanej próbki (współczynnika absorpcji materiału), jak i opóźnień fazowego wprowadzonego przez próbkę, a tym samym określenie współczynnika załamania materiału. Dzięki możliwości rejestrowania sygnału proporcjonalnego do pola elektrycznego promieniowania możliwe jest wyznaczenie zespolonej przenikalności elektrycznej badanego materiału. Uproszczony schemat układu THz TDS przedstawiono na Rysunku 4.1.



Rysunek 4.1: Schemat systemu THz TDS, ilustrujący główną zasadę działania tej spektroskopowej techniki pomiarowej. Impulsy lasera femtosekundowego (fs) są dzielone na dwie wiązki. Jedna wiązka jest użyta do generowania impulsów pikosekundowych (których transformata Fouriera odpowiada szerokopasmowemu zakresowi promieniowania THz). Impulsy oświetlają próbkę, a następnie są rejestrowane przez detektor. Jednocześnie druga wiązka, która jest czasowo opóźniana (przez linię opóźniającą), zostaje wykorzystywana do próbkowania impulsu pikosekundowego (detekcji promieniowania THz).

Wygenerowane femtosekundowe impulsy laserowe dzielone są na dwie wiązki. Jedna wiązka oświetla antenę fotoprzewodzącą, która bardzo często wykonana jest z materiału półprzewodnikowego, takiego jak np. arsenek galu (*ang. Gallium Arsenide – GaAs*). We wzbudzonym półprzewodniku następuje fotojonizacja prowadząca do wygenerowania prądu przewodzącego. Zmiana gęstości prądu jest modulowana w (sub)pikosekundowej skali czasowej. Następnie, wygenerowane w ten sposób pikosekundowe impulsy z anteny (emiter THz na Rysunku 4.1) są kształtowane przez dwa zwierciadła. Pierwsze zwierciadło tworzy quasi-płaski front falowy, podczas gdy drugie skupia wiązkę (impuls) na badanej próbce. Następnie, po przejściu przez próbkę, impuls jest kierowany w stronę detektora (detektor THz na Rysunku 4.1) przez kolejną parę zwierciadeł. Do detekcji sygnału użyta jest ponownie antena fotoprzewodząca. Druga wiązka pochodząca z lasera femtosekundowego jest przesuwana czasowo przy użyciu linii opóźniającej poprzez wprowadzenie zmiany długości drogi optycznej. W ten sposób seria impulsów femtosekundowych jest użyta do skanowania sygnału THz (impulsu pikosekundowego) zarejestrowanego przez

detektor. Pozwala to na określenie zarówno amplitudy zarejestrowanego sygnału, jak i fazy sygnału poprzez jego próbkowanie w dziedzinie czasu. Ponadto, transformata Fouriera impulsu pikosekundowego odpowiada szerokopasmowemu spektrum w zakresie THz w przybliżeniu od 50 GHz do 4 THz.

Należy podkreślić, że część układu zawierająca emiter promieniowania THz oraz detektor promieniowania THz powinna być zamknięta w komorze próżniowej (lub napełnionej suchym powietrzem lub azotem) ze względu na obecność pary wodnej w powietrzu, która w znacznym stopniu pochłania promieniowanie THz i zniekształca prowadzone badania [45–51]. Porównując sygnał referencyjny (np. pomiar przeprowadzony w komorze z suchym powietrzem bez użycia próbki pomiarowej) z promieniowaniem przechodzącym przez badaną próbkę, obserwuje się spadek amplitudy impulsu oraz przesunięcie fazowe impulsu. Spadek amplitudy odpowiada absorpcji materiału, co umożliwia określenie współczynnika absorpcji materiału. Należy podkreślić, że takie pomiary są obarczone stratami sygnału wynikającymi z odbić Fresnela zarówno od pierwszej powierzchni próbki, jak i wynikającymi z wewnętrznej struktury badanej próbki, bądź ze zwykłych odbić fresnelowskich. Tymczasem przesunięcie fazowe pozwala na określenie współczynnika załamania materiału [127, 128]. Stosunek między padającym sygnałem THz E_0 (polem elektrycznym impulsu referencyjnego) oświetlającym próbkę, a zarejestrowanym sygnałem THz E_1 (polem elektrycznym docierającym do detektora) jest określony Równaniem (4.1).

$$\frac{E_1}{E_0} = R(n) \exp\left(\frac{in\omega d}{c} - \frac{\alpha d}{2}\right), \quad (4.1)$$

gdzie $R(n)$ to straty wynikające z odbić Fresnela zależne od współczynnika załamania materiału (n), ω jest częstością kątową, d opisuje grubość badanej próbki oraz c to prędkość światła w ośrodku pomiarowym (próżnia).

Tak więc pomiar obu pól pozwala określić współczynnik załamania światła i współczynnik absorpcji próbki w dziedzinie częstotliwości. Padające pole elektryczne E_0 , które oświetla próbkę, można opisać Równaniem (4.2). Natomiast zarejestrowane pole elektryczne E_1 po przejściu przez próbkę jest określone Równaniem (4.3).

$$E_0 = A_0 \exp(i\phi_0), \quad (4.2)$$

$$E_1 = A_1 \exp(i\phi_1), \quad (4.3)$$

gdzie A_0 , A_1 są amplitudami pola elektrycznego, a ϕ_0 , ϕ_1 są odpowiednio fazami impulsów pól elektrycznych E_0 , E_1 . W ten sposób współczynnik absorpcji próbki o grubości d można określić za pomocą Równania (4.4), podczas gdy współczynnik załamania próbki jest określony Równaniem (4.5):

$$\alpha d = -2 \ln \left[\frac{(A_1/A_0)}{R(n)} \right], \quad (4.4)$$

$$nd = \frac{c}{w}(\phi_1 - \phi_0). \quad (4.5)$$

Dlatego też THz TDS umożliwia określenie zarówno współczynnika absorpcji, jak i współczynnika załamania materiału w dziedzinie częstotliwości THz. Są to kluczowe właściwości optyczne w procesie projektowania pasywnych elementów optycznych pozwalające na dobór odpowiedniego materiału, żeby spełniał on wymogi aplikacyjne.

4.2 Szczegółowa analiza pomiarów THz TDS

W tej części pracy skupiono się na szczegółowej analizie sygnałów w badaniach THz TDS. W analizie uwzględniono próbki wytworzone z dwóch rodzajów materiałów: P15-PLA(3) oraz P32-PC+PTFE¹. Kompozyt PC z PTFE wykazuje stosunkowo niskie wartości współczynnika absorpcji w całym analizowanym spektrum, podczas gdy próbki wytworzone z materiału PLA charakteryzują się wyższym tłumieniem promieniowania THz. Badaniu poddano próbki o czterech różnych grubościach: 1 mm, 2 mm, 3 mm oraz 4 mm. Pomiary wykonano dla dwóch próbek każdej grubości. Surowe dane uzyskane z pomiarów porównano z danymi przetworzonymi przy użyciu filtra apodyzacyjnego Blackmana-Harrisa 4-ego rzędu (BH4) [154]. Otrzymane wyniki pomiarów dla próbek P15-PLA(3) przedstawiono w Aneksie do pracy w Załączniku 1 na Rysunku A1.

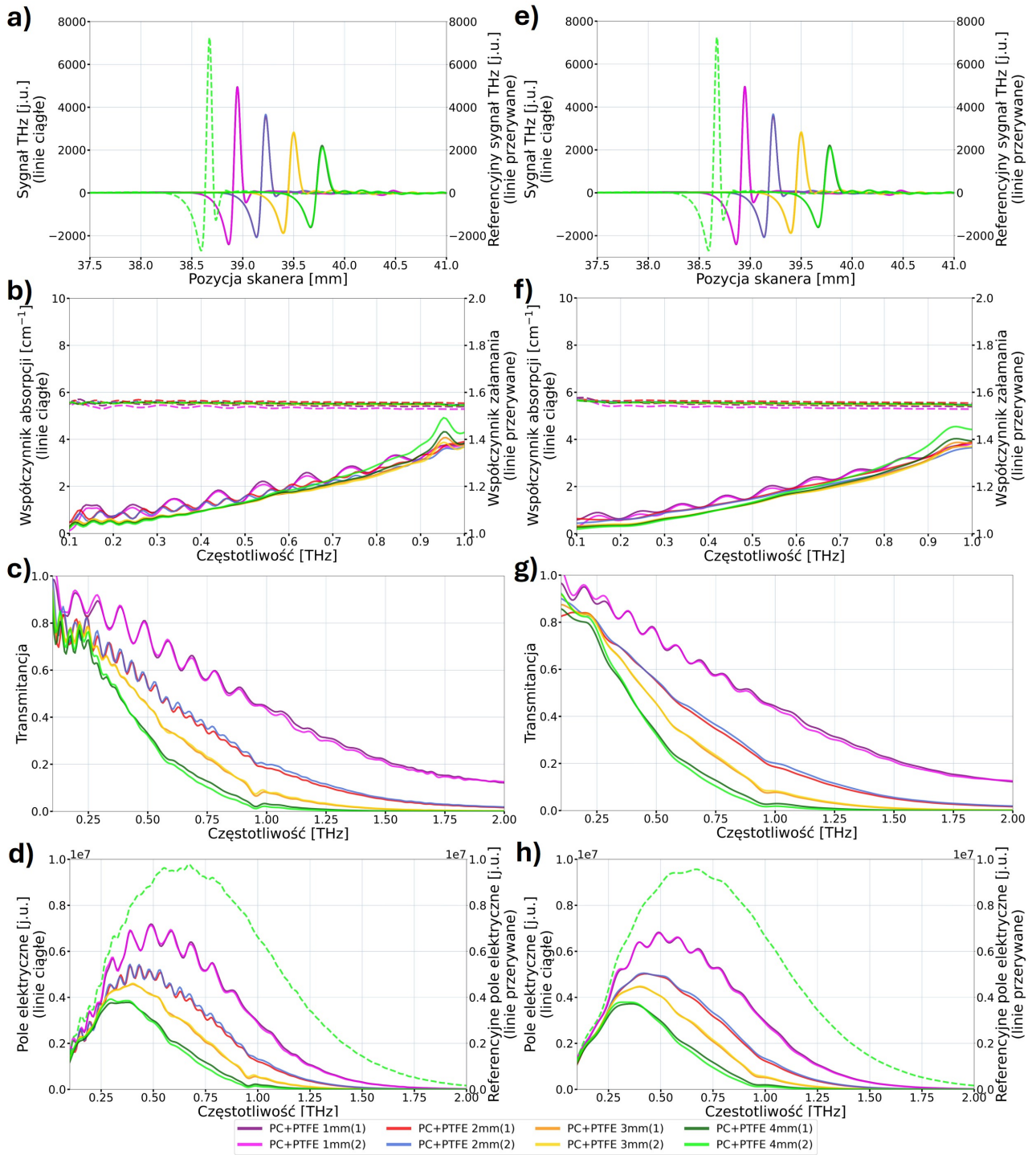
Rysunek 4.2 przedstawia dane uzyskane podczas pomiarów THz TDS dla ośmiu próbek P32-PC+PTFE (próbki o czterech różnych grubościach od 1 mm do 4 mm, po dwie sztuki każdej grubości). Dane przedstawione na Rysunku 4.2a oraz Rysunku 4.2e odnoszą się do pikosekundowych impulsów zarejestrowanych przez detektor w pomiarze referencyjnym oraz po przejściu przez badane próbki, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 4.1. Rysunek 4.2b i Rysunek 4.2f przedstawiają wartości współczynnika absorpcji

¹Dla klarowności pracy wszystkie nazwy polimerów i kompozytów zostały szczegółowo wyjaśnione w Tabeli A1 oraz Tabeli A2 w Załączniku 2 w Aneksie do pracy.

i współczynnika załamania dla próbek PLA w dziedzinie częstotliwości THz w zakresie od 100 GHz do 1 THz, wyznaczone przy użyciu Równania (4.4) oraz Równania (4.5). Po obliczeniu transformaty Fouriera impulsów w dziedzinie czasu można obliczyć szerokopasmowe widmo gęstości mocy w zakresie częstotliwości THz, co zostało przedstawione na Rysunku 4.2c i Rysunku 4.2g. Rysunek 4.2d i Rysunek 4.2h porównują zarejestrowane referencyjne pole elektryczne ze zmierzonym polem elektrycznym dla każdej próbki w zakresie częstotliwości do 2 THz; pola te są opisane Równaniem (4.1) oraz Równaniem (4.2). Rysunki od 4.2a do 4.2d przedstawiają analizę nieprzetworzonych danych, podczas gdy Rysunki od 4.2e do 4.2h odnoszą się do danych poddanych apodyzacji filtrem BH4.

Przesunięcie impulsów pikosekundowych wzdłuż osi x opisującej pozycję linii opóźniającej (Rysunek 4.2a i Rysunek 4.2e) odpowiada opóźnieniu fazowemu wprowadzonemu przez mierzone próbki. Można zauważyć, że pozycja linii opóźniającej odpowiada czasowi rejestracji impulsów, a w tym przypadku ich przesunięcie jest wprost proporcjonalne do grubości próbek. Co więcej, analiza przesunięcia i grubości próbek umożliwia określenie współczynnika załamania materiału zgodnie z Równaniem (4.5).

Płasko-równoległe podstawy próbek o cylindrycznym kształcie stanowią granice ośrodków, przez które przechodzi sygnał podczas pomiarów THz TDS. Ta geometria próbek prowadzi do powstawania niepożądanych odbić, których efektem są dodatkowe odbicia Fresnela (często nazywane stratami Fresnela). Wspomniana geometria próbek skutkuje nie tylko odbiciami sygnału od początkowej powierzchni próbki, ale także wielokrotnymi odbiciami impulsu od powierzchni granicznych, tworząc wewnętrzne odbicia impulsu w próbce na kształt rezonatora. W ten sposób dodatkowo powstałe impulsy zarejestrowane przez detektor mogą być widoczne jako niewielkie zakłócenie sygnału w prawej części wykresu na Rysunku 4.2a. Ma to znaczący wpływ na analizowane dane. Dlatego krzywe na wykresach na Rysunkach 4.2b–4.2d są zdeformowane w fałszywy sposób. Jest to wynikiem zakłóceń sygnału spowodowanych przez wcześniej wspomniane niepożądane dodatkowe impulsy. Należy podkreślić, że efekt ten jest najbardziej widoczny dla cienkich próbek (o grubości 1 mm i 2 mm), dla których zarejestrowano krótszy czas propagacji impulsu pikosekundowego w porównaniu do próbek o grubości 3 mm i 4 mm. W przypadku cieńszych próbek kolejny impuls odbity wielokrotnie w próbce znajduje się bliżej impulsu głównego i przez to trudniej jest wyeliminować jego wpływ stosując metody apodyzacji. Te defekty sygnału mają największy wpływ na niskie częstotliwości mierzonego widma



Rysunek 4.2: Wyniki pomiarów THz TDS próbek różnej grubości wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM z kompozytu PC z PTFE (materiał P32 w Tabeli A2). Wykresy: a) do d) utworzono w oparciu o nieprzetworzone dane pomiarowe; e) do h) utworzono z przetworzonych danych przy użyciu filtra apodyzacyjnego BH4.

ze względu na stosunkowo dużą długość fali promieniowania w porównaniu do grubości badanej próbki. Dodatkowa analiza z zastosowanym filtrem BH4 została przeprowadzona w celu zmniejszenia wpływu tego dodatkowego impulsu i poprawy jakości obliczonych danych minimalizując sinusoidalne zaburzenie wynikające z obecności pików związanego z drugim impulsem. Z użyciem filtra centralna część sygnału pozostaje niezmieniona (tam gdzie występują główne impulsy na Rysunku 4.2e), natomiast wraz z oddalaniem się od głównego impulsu coraz mniejsza waga zostaje przywiązana do analizowanych danych. Skutkuje to zmniejszeniem wpływu bocznych części charakterystyki na otrzymany docelowy wynik, w szczególności wtórnych, niepożądanych pików [154]. W rezultacie otrzymane linie opisujące różne obliczone wielkości fizyczne są wygładzone i w lepszym stopniu oddają prawdziwe właściwości optyczne badanego materiału. Otrzymane dane pomiarowe z zastosowanym apodyzacji BH4 przedstawiono na Rysunkach 4.2e–4.2h. Zniekształcone (faliste) linie trendu są nadal zauważalne dla próbek o grubości 1 mm (nieznacznie dla 2 mm), ale efekt deformacji został znacznie zredukowany. Wyniki dla próbek o grubości 3 mm i 4 mm zostały znacznie poprawione, albowiem udało się praktycznie całkowicie wyeliminować wpływ dodatkowo odbitego impulsu.

Na podstawie Równania (4.4) oraz Równania (4.5) określono wartości współczynnika absorpcji i współczynnika załamania próbek, które wspólnie przedstawiono na Rysunku 4.2b oraz Rysunku 4.2f. Zastosowanie filtra BH4 nie zmieniło znacząco wartości współczynnika załamania próbek w analizowanych wynikach. Różnice są jednak zauważalne we współczynniku absorpcji. Dane z zastosowanym filtrem BH4 są bardziej spójne. Krzywe reprezentujące poszczególne pomiary próbek przedstawiają bardzo zbliżone właściwości optyczne (z wyjątkiem próbek o grubości 1 mm, które są zbyt cienkie, a uzyskane krzywe dalej posiadają falisty charakter nawet przy zastosowanej apodyzacji).

Rysunek 4.2c i Rysunek 4.2g pokazują transmitancję próbek w zakresie od 100 GHz do 2 THz. Wyniki te uzyskano poprzez obliczenie transformaty Fouriera zmierzonych sygnałów (impulsy przedstawione na Rysunku 4.2a i Rysunku 4.2e), a następnie wyznaczenie stosunku zarejestrowanego sygnału po przejściu przez próbkę do sygnału referencyjnego. Transmitancja znacznie maleje wraz ze wzrostem częstotliwości i grubości próbek.

Ostatnie dwa wykresy (Rysunek 4.2d i Rysunek 4.2h) przedstawiają zarejestrowane pole elektryczne sygnału referencyjnego i zbadanego za próbkami w zakresie

częstotliwości od 100 GHz do 2 THz. Przedstawione dane odpowiadają widmowemu rozkładowi mocy sygnału, co pozwala na kompleksową analizę ilości sygnału dla każdej składowej częstotliwości badanego widma. Należy podkreślić, że sygnał referencyjny obejmuje zakres widmowy sięgający częstotliwości nawet 4 THz (czego nie przedstawiono na wykresach). Ilość sygnału zarejestrowanego za próbkami drastycznie spada z powodu absorpcji próbek. Tak więc, nawet w przypadku cienkich próbek PLA, wiarygodny pomiar właściwości optycznych jest możliwy dla częstotliwości do 2 THz, albowiem potem ilość sygnału jest porównywalna z poziomem szumu i dane przestają być wiarygodne.

4.3 Dyfrakcyjne elementy optyczne – DOE

W przypadku promieniowania THz mamy do czynienia z sygnałem, którego częstotliwości odpowiadają relatywnie długim falom sięgającym kilku milimetrów. W związku z tym soczewki refrakcyjne posiadają znaczną grubość i w przypadku krótkich odległości ogniskowych przestają one być kompaktowe, przez co nie są funkcjonalne w wielu wymagających tego zastosowaniach. Ponadto znacząca grubość soczewek skutkuje tłumieniem promieniowania wynikającym z absorpcji materiałowej. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie optyki dyfrakcyjnej charakteryzującej się grubością elementów optycznych (tzw. dyfrakcyjnych elementów optycznych) rzędu długości fali promieniowania.

W optyce falowej zespolony rozkład amplitudy pola elektromagnetycznego padającego na DOE można opisać przy użyciu Równania (4.6):

$$U_0(x, y) = A_0(x, y) \exp(i\phi_0(x, y)), \quad (4.6)$$

gdzie $U_0(x, y)$ jest zespoloną amplitudą fali w funkcji współrzędnych kartezjańskich, $A_0(x, y)$ opisuje rozkład rzeczywistej amplitudy promieniowania oraz $\phi_0(x, y)$ to funkcją rozkładu fazy fali elektromagnetycznej.

DOE to struktury, które wprowadzają określone przesunięcia fazowe fali padającej w celu utworzenia pożądanego rozkładu fazowego wiązki za strukturą. DOE są definiowane przez ich transmitancję, która jest zespoloną funkcją amplitudy i fazy zgodnie z Równaniem (4.7):

$$T_s(x, y) = A_s(x, y) \exp(i\phi_s(x, y)), \quad (4.7)$$

gdzie $T_s(x, y)$ to funkcja transmitancji, która zależy od współrzędnych przestrzennych x i y , $A_s(x, y)$ jest funkcją modulacji amplitudy oraz $\phi_s(x, y)$ opisuje funkcję rozkładu fazy. Biorąc pod uwagę absorpcję materiałową (wprowadzającą tłumienie promieniowania) oraz grubość struktury, zgodnie z prawem Bouguera-Lamberta-Beera [155, 156], Równanie (4.7) przyjmuje postać Równania (4.8):

$$T_s(x, y) = \exp\left(-\frac{\alpha}{2}d(x, y)\right) \exp(i\phi_s(x, y)), \quad (4.8)$$

gdzie α jest współczynnikiem absorpcji materiału, z którego wytworzono DOE, natomiast $d(x, y)$ określa grubość (wysokość) struktury w danym punkcie jej rozkładu. Tak więc natężenie promieniowania podczas propagacji wewnątrz struktury maleje wykładniczo. Dlatego tak istotne jest zachowanie możliwie niewielkiej grubości elementu optycznego. Projektując DOE, zakłada się zastosowanie cienkich elementów, co stanowi dobre przybliżenie grubości DOE porównywalnych z długością fali promieniowania. Rozkład pola promieniowania za DOE (U_1) można opisać jako iloczyn pola wejściowego oraz transmitancji DOE zgodnie z Równaniem (4.9):

$$U_1(x, y) = U_0(x, y)T_s(x, y). \quad (4.9)$$

Przestrzenny kształt DOE jest określony przez funkcjonalność, którą dany element optyczny realizuje, taką jak ogniskowanie, rozpraszanie, przekierowanie, przestrzenną separację promieniowania, itp. [28, 29, 31, 33, 130, 131, 133, 140, 157–160]. W ten sposób uzyskane przestrzenne profile DOE mogą przyjmować kształty płytki strefowej Fresnela, soczewki dyfrakcyjnej, siatki dyfrakcyjnej, aksikonu, struktury hiperbolicznej, struktury spiralnej oraz wielu innych często złożonych, arbitralnych profili uzyskanych między innymi przy użyciu metod iteracyjnych czy też sieci neuronowych [32, 99, 134, 138, 161–163]. Wybór rozkładu przestrzennego DOE jest dokonywany na podstawie wymagań konkretnych zastosowań danego elementu oraz materiału użytego w procesie jego wytwarzania.

Można wyróżnić dwa główne typy kodowania DOE - amplitudowe i fazowe [33, 164]. DOE zaprojektowane przy użyciu kodowania amplitudowego blokują znaczną część padającego na nie promieniowania. Wykorzystują one zjawisko dyfrakcji na krawędziach nieprzezroczystych fragmentów elementu. Drugi typ DOE, elementy kodowane fazowo, wprowadza określone przesunięcie fazowe poprzez propagację promieniowania w materiale o wyższym współczynniku załamania w porównaniu do otoczenia (głównie powietrza).

W tym przypadku grubość elementu jest ściśle określona przez współczynnik załamania materiału użytego w procesie wytwarzania DOE oraz przez długość fali, dla której zaprojektowano element (*ang. Design Wavelength – DWL*). W obu przypadkach zakłada się, że DOE działa w reżimie wąskopasmowym dla konkretnej częstotliwości odpowiadającej DWL. DOE kodowane metodą fazową można podzielić na trzy podgrupy w zależności od ilości poziomów fazy reprezentowanych przez strukturę. W ten sposób wyróżniamy DOE kodowane binarne (posiadające dwa poziomy fazy), struktury wielopoziomowe oraz o profilu ciągłym. Każda ze wspomnianych metod kodowania charakteryzuje się inną wydajnością dyfrakcyjną [28, 33, 34, 165]. Wraz z ilością poziomów fazy rośnie wydajność dyfrakcyjna η DOE. Równania określające maksymalną wydajność dyfrakcyjną dla różnych metod kodowania DOE przedstawiono w Tabeli 4.1 [33, 34]. W przedstawionych danych parametr m określa rząd ugięcia dyfrakcyjnego, N to ilość poziomów fazy oraz a jest współczynnikiem wypełnienia struktur amplitudowych. Ze względu na wyższą wydajność dyfrakcyjną, zaprojektowane struktury w niniejszej pracy, zostały opracowane przy pomocy kodowania fazowego.

Tabela 4.1: Wydajność dyfrakcyjna η DOE dla różnych metod kodowania amplitudowego i fazowego. W przedstawionych danych parametr m określa rząd ugięcia dyfrakcyjnego, N to ilość poziomów fazy oraz a to współczynnik wypełnienia struktur amplitudowych [33].

Metoda kodowania	Wydajność dyfrakcyjna η_m	Wydajność dyfrakcyjna dla $m = 1$
Amplitudowa binarna ($a = 0,5$)	$\frac{\sin^2(\pi m/2)}{(\pi m)^2}$	10,1%
Amplitudowa binarna o innym parametrze a	$\frac{\sin^2(\pi a m/2)}{(\pi a m)^2}$	Maksymalna 10,1% dla $a = 0,5$
Fazowa binarna (2 poziomy)	$\frac{\sin^2(\pi m/2)}{(\pi m)^2} [1 - (-1)^m]^2$	40,4%
Fazowa ciągła (kinoform)	$\text{sinc}^2(1 - m)$	100%

Rozkład fazy DOE odpowiadający za wprowadzenie odpowiedniego opóźnienia fazowego promieniowania przechodzącego przez strukturę może zostać przedstawiony w sposób numeryczny w postaci macierzy punktów, w formie graficznej w postaci np. bitmapy. Bitmapa to dwuwymiarowa macierz szaroodcieniowa przyjmująca wartości pikseli od 0 do 255. Jej wartości reprezentują opóźnienie fazowe wprowadzane przez zadane piksele macierzy w skali od 0 do 2π . W ten sposób kodowanie fazowe ciągłe (kinoformowe) jest odwzorowane przez 256 poziomów fazy. Wartości pikseli bitmapy odpowiadają grubości rzeczywistej struktury wytworzonej z materiału o zadanym współczynniku załamania. W ogólności opóźnienie fazowe wprowadzane przez DOE powiązane jest z jego grubością Równaniem (4.10).

$$d(x, y) = \frac{\phi_s(x, y)}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{n - n_0}, \quad (4.10)$$

gdzie $d(x, y)$ opisuje grubość struktury w danym punkcie jej rozkładu odpowiadająca wartościom rozkładu fazy $\phi_s(x, y)$, n to współczynnik załamania materiału, z którego wytworzono DOE oraz n_0 jest współczynnikiem załamania otoczenia (przeważnie powietrza).

Rozkład fazy DOE może zostać zaprojektowany i obliczony korzystając z różnego rodzaju formuł analitycznych, bądź iteracyjnych. W tej pracy użyto analityczne równania opisujące rozkład fazy skupiającej soczewki kinoformowej o ciągłym rozkładzie fazy (Równanie (4.11)), binarnej siatki dyfrakcyjnej (Równanie (4.12)) oraz piłokształtnej siatki dyfrakcyjnej (Równanie (4.13)), które stanowiły podstawę do zaprojektowania i wyprodukowania elementów demultipleksujących promieniowanie THz:

$$\phi_{s1}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}, \quad (4.11)$$

$$\phi_{s2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq x - p\Lambda < \frac{\Lambda}{2}, \\ \pi & \text{dla } \frac{\Lambda}{2} \leq x - p\Lambda < \Lambda, \end{cases} \quad p \in \mathbb{Z}, \quad (4.12)$$

$$\phi_{s3}(x) = -\frac{2\pi}{\lambda} x \sin(\theta_u), \quad (4.13)$$

gdzie $\phi_{s1}(x, y)$ jest rozkładem fazy soczewki kinoformowej w funkcji współrzędnych kartezjańskich, $\phi_{s2}(x)$ opisuje rozkład fazy siatki binarnej, $\phi_{s3}(x)$ to rozkład fazy siatki piłokształtnej, f jest odległością ogniskową soczewki, λ oznacza długość fali, Λ to okres siatki, p opisuje numer okresu należący do zbioru liczb całkowitych $\mathbb{Z}$ oraz θ_u jest kątem ugięcia promieniowania na siatce. Oba rozkłady siatek dyfrakcyjnych posiadają zmienność wzdłuż jednej osi i z tego względu zostały przedstawione jako funkcja jedynie zmiennej x .

Siatki piłokształtne zapewniają asymetryczne ugięcie promieniowania względem osi optycznej (przekierowują promieniowanie w -1. rząd ugięcia), podczas gdy siatki binarne przekierowują promieniowanie symetrycznie głównie w -1 i 1. rząd ugięcia. Należy zwrócić uwagę, że DOE to elementy optyczne projektowane dla konkretnej DWL, dla której wydajność struktury jest najwyższa, dlatego zmiana długości fali (częstotliwości) odtwarzającej powoduje pogorszenie wydajności dyfrakcyjnej danej struktury. W przypadku siatek dyfrakcyjnych na rozkład pola generowany za nimi również wpływa kąt padania promieniowania, długość fali promieniowania oraz stała siatki. Kąt ugięcia wiązki oświetlającej siatkę można opisać zgodnie z Równaniem (4.14).

$$\Lambda \sin(\theta_u - \theta_p) = m\lambda, \quad (4.14)$$

gdzie m jest rzędem ugięcia dyfrakcyjnego, natomiast θ_p kątem padania wiązki na siatkę dyfrakcyjną.

4.4 Symulacje numeryczne - opis propagacji światła

W pracy przeprowadzono symulacje numeryczne korzystając z programu LightSword 6.0 udostępnionego przez firmę Ortech. Program pozwala na propagację promieniowania w przestrzeni pomiędzy zadanymi płaszczyznami uwzględniając zarówno rozkład amplitudy pola, jak i rozkład fazy. Wykonując operację propagacji program korzysta ze zmodyfikowanej metody splotowej [35]. W symulacjach numerycznych wykorzystano opis skalarnej teorii dyfrakcji w przybliżeniu Fresnela.

Rozkład pola w płaszczyźnie wyjściowej układu $u_1(x_1, y_1)$ można opisać przy użyciu całki dyfrakcyjnej Fresnela [34] zgodnie z Równaniem (4.15).

$$u_1(x_1, y_1) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0, y_0) \exp \left[\frac{ik}{2z} \left((x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \right) \right] dx_0 dy_0, \quad (4.15)$$

gdzie $k = 2\pi/\lambda$ to liczba falowa, λ określa długość fali promieniowania, a z jest odległością propagacji, natomiast $u_0(x_0, y_0)$ jest rozkładem pola w płaszczyźnie wejściowej układu.

Równanie (4.15) jest określone przez splot rozkładu pola na wejściu z odpowiedzią impulsową przestrzeni swobodnej, wyrażoną Równaniem (4.16).

$$h(x_1, y_1) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp \left(\frac{ik}{2z} (x_1^2 + y_1^2) \right), \quad (4.16)$$

gdzie $h(x_1, y_1)$ jest funkcją odpowiedzi impulsowej.

Zgodnie z twierdzeniem o splocie [166] można wykonać operację splotu przy użyciu mnożenia transformaty Fouriera pola wejściowego oraz transformaty Fouriera funkcji odpowiedzi impulsowej. W rezultacie otrzymuje się transformatę Fouriera zespolonej amplitudy pola wyjściowego, zgodnie z Równaniem (4.17).

$$\mathcal{F}(u_1) = \mathcal{F}(u_0)\mathcal{F}(h), \quad (4.17)$$

gdzie $\mathcal{F}$ oznacza operację transformaty Fouriera. Transformata Fouriera przekształca funkcję opisaną w dziedzinie przestrzeni (w tym przypadku współrzędnych kartezjańskich) na jej reprezentację w dziedzinie częstości przestrzennych. Ponadto transformata Fouriera funkcji odpowiedzi impulsowej $h(x_1, y_1)$ jest funkcją przenoszenia $H(\nu_x, \nu_y)$ przestrzeni swobodnej, którą można opisać przy użyciu Równania (4.18).

$$H(\nu_x, \nu_y) = \mathcal{F} \left\{ \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp \left(\frac{ik}{2z} (x_1^2 + y_1^2) \right) \right\} = e^{ikz} \exp \left(-i\pi \lambda z (\nu_x^2 + \nu_y^2) \right). \quad (4.18)$$

Dzięki temu skomplikowaną operację splotu można zastąpić policzeniem odpowiednich transformat Fouriera i ich mnożeniu. W praktyce dane są reprezentowane w postaci kwadratowej macierzy pikseli (tzw. bitmapy), gdzie każdy piksel odpowiada wartości funkcji w swoim centrum. Symulacja propagacji promieniowania wymaga najpierw określenia i próbkowania pola wejściowego i funkcji przenoszenia, a następnie przeprowadzenia dyskretnej operacji splotu. Jest ona realizowana poprzez mnożenie transformaty Fouriera pola wejściowego z funkcją przenoszenia, a następnie wykonuje się odwrotną transformatę Fouriera w rezultacie otrzymując poszukiwany rozkład zespolonej amplitudy pola wyjściowego $u_1(x_1, y_1)$. Wyjściowa macierz liczb zespolonych opisuje poszukiwane pole optyczne. Należy pamiętać, że w symulacjach numerycznych kluczowe jest przeprowadzenie odpowiedniego próbkowania rozkładów pól optycznych opisanego twierdzeniem o próbkowaniu, tzw. twierdzeniem Whittakera-Nyquista-Kotielnikowa-Shannona [167], aby móc odtworzyć wyjściowe fronty falowe bez straty informacji.

4.5 Iteracyjny algorytm projektowania DOE

Opis numerycznej propagacji promieniowania przedstawiony w Podrozdziale 4.4 umożliwia odtworzenie zespolonego rozkładu pola promieniowania w określonej odległości za DOE. Ponadto może on zostać wykorzystany do generacji złożonych rozkładów fazy DOE przy użyciu odpowiednich algorytmów iteracyjnych.

W tej pracy wykorzystano algorytm typu ping-pong [168, 169] bazujący na algorytmie Gerchberga-Saxtona [135]. Algorytm ten pozwala na wygenerowanie pożądanego rozkładu natężenia promieniowania w określonej płaszczyźnie wyjściowej, który formowany jest dzięki obliczonemu rozkładowi opóźnienia fazowego w płaszczyźnie DOE. Osiąga się to poprzez iteracyjną propagację frontu falowego pomiędzy płaszczyzną wejściową $u_0(x_0, y_0)$ i wyjściową $u_1(x_1, y_1)$. W płaszczyźnie wejściowej wymuszany jest pożądaný rozkład amplitudy odpowiadający rozkładowi wejściowemu systemu (np. rozkład gaussowski źródła promieniowania), podczas gdy informacja o transmitancji fazowej obiektu jest zachowywana i aktualizowana w kolejnych iteracjach. Natomiast w płaszczyźnie wyjściowej wymuszany jest pożądaný rozkład wyjściowy natężenia, przy zachowaniu informacji o transmitancji fazowej wynikającej z algorytmu iteracyjnego. Jest to przykładowe użycie algorytmu rozpatrującego dwie płaszczyzny (wejściową i wyjściową). W przypadku większej ilości rozpatrywanych płaszczyzn w algorytmie postępuje się analogicznie, jednak z tą różnicą, że propagacja odbywa się pomiędzy wszystkimi zadeklarowanymi płaszczyznami, w których rozpatrywane są rozkłady pola promieniowania [169, 170]. W ten sposób uzyskuje się rozkład fazy DOE, tzw. komputerowo wygenerowany hologram, który spełnia zamierzone wymagania funkcjonalne, biorąc pod uwagę rozważane parametry układu optycznego.

4.6 Modelowanie przestrzenne rozkładów opóźnienia fazowego

Aby z dwuwymiarowej bitmapy, reprezentującej fazowy DOE, uzyskać trójwymiarową strukturę, konieczne jest stworzenie jego modelu przestrzennego, nazywanego również modelem 3D. W pracy wykorzystano dwie różne metody modelowania 3D.

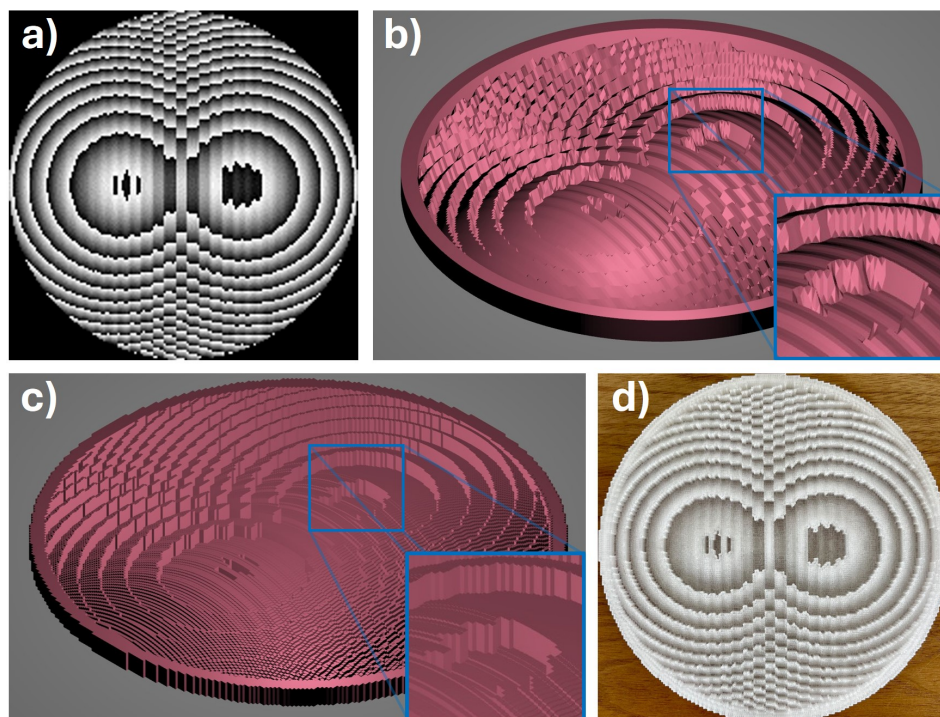
W obu przypadkach, każdy piksel mapy fazowej jest podnoszony (wyciągany) do odpowiedniej wysokości, zależnej od wartości liczbowej danego piksela i współczynnika załamania materiału użytego w procesie produkcji, zgodnie z Równaniem (4.10). W ten sposób wytworzona struktura wprowadza opóźnienie fazowe w zakresie od 0 do 2π .

W pierwszej metodzie (nazwanej na potrzeby pracy metodą klasyczną) piksele macierzy mapy opóźnienia fazowego reprezentowane są w postaci punktów węzłowych. Kolejne punkty węzłowe rozmieszczone są w przestrzeni w odległości odpowiadającej rozmiarowi piksela, która jest określona przez próbkowanie użyte podczas tworzenia mapy opóźnienia fazowego. Następnie punkty węzłowe zostają wyciągnięte przestrzennie i połączone ze sobą tworząc trójkątną siatkę (proces ten nazywa się triangulacją). Należy zauważyć, że wysokość (grubość) modelu między punktami węzłowymi jest interpolowana liniowo do wartości sąsiednich pikseli. Takie podejście można rozważyć tylko w przypadku struktur o ciągłym profilu fazowym i gęstym próbkowaniu stosowanym podczas projektowania. Wtedy interpolacja między węzłami nie ma znaczącego wpływu na kształt uzyskanego modelu.

Druga, nowatorska metoda modelowania przestrzennego została po raz pierwszy opisana w pracy [139], a następnie użyta do utworzenia modeli przestrzennych w pracy [32, 133, 160]. Jest to metoda dedykowana modelowaniu złożonych rozkładów fazowych DOE, charakteryzujących się gwałtownymi lub skokowymi zmianami fazy. Polega ona na wyciągnięciu każdego piksela mapy szaroodcieniowej do prostopadłościanu o wysokości określonej Równaniem (4.10). Odbywa się to poprzez reprezentację każdego z pikseli przez osiem punktów węzłowych stanowiących górną i dolną podstawę prostopadłościanu. W ten sposób podczas triangulacji powstają prostopadłościennne bloki składające się z dwunastu trójkątów każdy.

Na Rysunku 4.3 przedstawiano porównanie modeli przestrzennych uzyskanych przy użyciu dwóch opisanych w tym podrozdziale metod modelowania przestrzennego dla przykładowej struktury dyfrakcyjnej realizującej funkcjonalność multipleksacji promieniowania THz. Należy podkreślić, że przedstawiona struktura ma złożony i szybko zmieniający się rozkład fazy (Rysunek 4.3a). W związku z tym klasyczne podejście do modelowania przestrzennego wykorzystujące triangulację (model przedstawiony na Rysunku 4.3b) nie jest odpowiednie i nie pozwala na precyzyjne odwzorowanie rozkładu fazowego bitmapy, ponieważ zakłada interpolację pomiędzy sąsiednimi pikselami.

Jest to szczególnie widoczne w obszarach skokowej zmiany fazy z wartości 2π na 0. Z kolei nowatorska metoda umożliwiła dokładną reprezentację mapy fazowej, co ilustruje model przedstawiony na Rysunku 4.3c.



Rysunek 4.3: a) Mapa fazowa przykładowej struktury dyfrakcyjnej realizującej funkcjonalność multipleksacji promieniowania THz; b) model przestrzenny struktury uzyskany metodą klasyczną; c) model przestrzenny struktury uzyskany metodą nowatorską; d) struktura wytworzona przy użyciu druku 3D w technologii FDM na podstawie modelu 3D uzyskanego metodą nowatorską.

Reprezentacja pikseli przy użyciu prostopadłościanów pozwala na dokładne odwzorowanie przestrzenne bitmap uzyskanych podczas projektowania rozkładów fazowych DOE. Ponadto, w ten sposób wytworzone DOE lepiej odpowiadają wynikom przeprowadzonych symulacji numerycznych. Dobór odpowiedniego rozmiaru piksela pozwala na precyzyjne wydrukowanie modelu przestrzennego w procesie wytwarzania, ponieważ wymiary bloków prostopadłościennych są ściśle określone przez rozdzielczość metody wytwórczej (np. średnicę dyszy użytej w druku 3D w technologii FDM). Należy podkreślić, że ta metoda jest rozwiązaniem jedynie dla małych macierzy o stosunkowo dużych rozmiarach pikseli (co wynika m.in. z ograniczeń związanych z ilością danych i obciążeniem dla systemu komputerowego). W przeciwnym razie można zastosować klasyczną metodę modelowania.

4.7 Wytwarzanie elementów dyfrakcyjnych

Ostatnie badania w coraz większym stopniu koncentrują się na addytywnym wytwarzaniu DOE oraz właściwościach optycznych materiałów polimerowych stosowanych w technologiach druku przestrzennego [53, 144, 171, 172]. Niektóre materiały polimerowe i kompozyty na bazie polimerów mają odpowiednie właściwości optyczne do wytwarzania nietłumiących DOE pracujących w zakresie promieniowania THz [54, 124, 125, 146–149]. Obecnie wyróżnia się wiele różnych metod druku przestrzennego znanego powszechnie pod nazwą druku 3D [173–176]. Do najczęściej stosowanych technologii druku 3D należą wymienione już wcześniej: FDM, SLS oraz DLP. Druk przestrzenny pozwala na szybkie prototypownie elementów optycznych, a jego rozdzielczość jest uważana za wysoką (zazwyczaj jest ona subfalowa) do wytwarzania optyki THz [174, 175].

Ze względu na szeroką dostępność materiałów i wysoką ich transparentność (niski współczynnik absorpcji) w zakresie promieniowania THz technologia druku FDM (w niektórych przypadkach SLS) została użyta do wytworzenia struktur i próbek przedstawionych w niniejszej pracy. Znacząca część obiektów została wytworzona przy użyciu drukarki Prusa MK3S+ z wykorzystaniem dyszy ze stali hartowanej powlekanej niklem oraz powłoką nanocząstek fulereny dwusiarczku wolframu (*ang. Tungsten Disulphide* – WS_2) o średnicy $400\ \mu\text{m}$. Pozioma dokładność druk wynosiła $10\ \mu\text{m}$ ($\lambda/300$, co odpowiada chropowatości powierzchni dla częstotliwości 100 GHz), podczas gdy pionowa dokładność druku była równa $2\ \mu\text{m}$ ($\lambda/1500$ dla częstotliwości 100 GHz). Wytłaczana grubość linii podczas druku 3D była równa $450\ \mu\text{m}$ ($\lambda/7$ dla częstotliwości 100 GHz) co stanowiło poziomą rozdzielczość wytwarzanych obiektów. Podczas gdy grubość nanoszonej warstwy była równa $100\ \mu\text{m}$ ($\lambda/30$ dla częstotliwości 100 GHz) określając pionową rozdzielczość wytworzonych obiektów. Szczegółowy opis parametrów druku dla każdego z wytworzonych obiektów został zamieszczony w odpowiadających im podrozdziałach tej pracy.

Rozdział 5

Badania materiałów

W niniejszym rozdziale opisano metodę wytwarzania próbek z materiałów polimerowych oraz kompozytów, głównie przy użyciu druku przestrzennego w technologii FDM, a także sposób przeprowadzania pomiarów THz TDS dla tych próbek. Zaprezentowane wyniki pomiarów, wraz z ich szczegółową analizą, umożliwiły wyłonienie z badanej grupy dwóch materiałów do wytworzenia DOE. Niektóre z wyników przedstawionych w tej części pracy zostały opisane w pracy naukowej [125].

W Załączniku 2 w Aneksie do pracy, znajduje się specyfikacja materiałów polimerowych, z których wytworzono próbki poddane pomiarom THz TDS. Załącznik 3 zawiera szczegółową analizę wyników pomiarów uzyskanych przy użyciu techniki THz TDS, dotyczących 63 różnych typów próbek polimerowych.

Dodatkowo, w Załączniku 4 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości optycznych próbek wytworzonych w technologii druku 3D SLS. Kolejna część Aneksu, Załącznik 5., zawiera wyniki badań dotyczących wpływu składu polimerów na właściwości optyczne wytworzonych próbek.

W Załączniku 6 zaprezentowano szczegółowe badania właściwości optycznych 43 różnych rodzajów materiałów odlewniczych. Próbki do tych badań wytworzono z materiałów takich jak woski, parafiny, czekolada, glina oraz mydło.

Załącznik 7 stanowi uzupełnienie wyników badań przedstawionych w Podrozdziale 5.2.2. Przedstawiona jest w nim analiza wpływu parametrów druku 3D na właściwości optyczne obiektów wydrukowanych z COC, dla których nie zaobserwowano znaczących zmian charakterystyki optycznej wytworzonych obiektów.

5.1 Wytwarzanie próbek i pomiary THz TDS

W celu określenia właściwości optycznych różnego rodzaju materiałów w zakresie promieniowania THz wytworzono próbki z różnego rodzaju polimerów, kompozytów polimerowych oraz materiałów odlewniczych, po czym zmierzono ich właściwości optyczne przy użyciu THz TDS. Metoda pomiarowa THz TDS została szczegółowo opisana w Podrozdziale 4.1. Wytworzone próbki miały kształt cylindryczny, z czego znaczna część miała średnicę równą trzynastu milimetrom oraz grubość równą trzem lub czterem milimetrom. Pomiary przeprowadzono przy użyciu spektrometru TeraPulse wyprodukowanego przez firmę TeraView. Jak pokazano na Rysunku 4.1, próbki zostały umieszczone w przewężeniu wiązki, podczas gdy cały układ optyczny został zamknięty w komorze, do której pompowano suche powietrze w celu wyeliminowania obecności pary wodnej z układu.

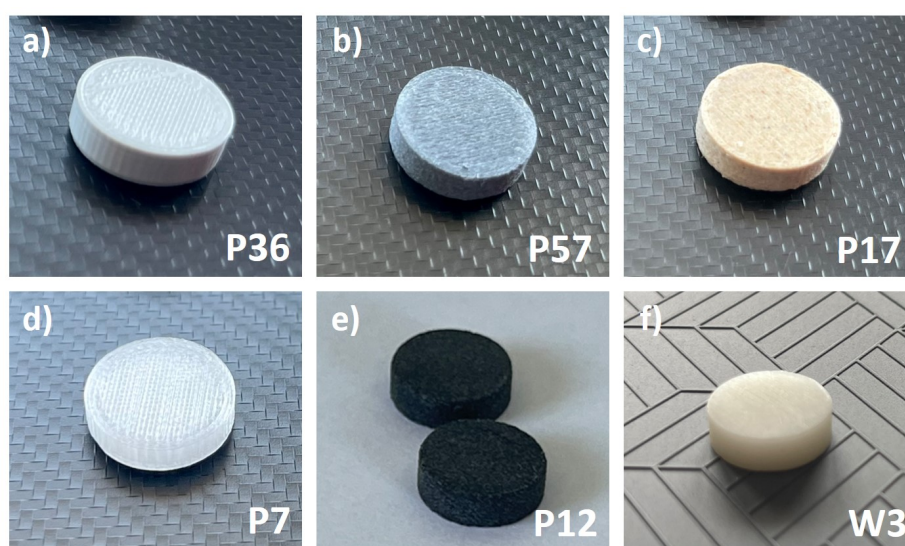
Ze względu na płasko-równoległy kształt próbek, zarejestrowano odbicia Fresnela powstałe wewnątrz badanych próbek. Tak więc, w celu redukcji niepożądanych efektów odbiciowych i zapewnienia bardziej wiarygodnych wyników pomiarów, wyprodukowano próbki o relatywnie dużej grubości (4 mm) oraz zastosowano filtr apodyzacyjny BH4 [154].

Pomiary THz TDS przeprowadzono na sześćdziesięciu różnych próbkach polimerów, z których pięćdziesiąt jeden zostało wyprodukowanych przy użyciu druku 3D w technologii FDM, a dziewięć przy użyciu druku 3D w technologii SLS. Lista badanych materiałów polimerowych została przedstawiona w Tabeli A1 i Tabeli A2, które zostały umieszczone w Załączniku 2 w Aneksie do pracy.

Próbki polimerowe wytworzone przy użyciu druku 3D w technologii FDM zostały wydrukowane korzystając z dyszy ze stali hartowanej powlekanej niklem oraz powłoką nanocząstek fulereny dwusiarczku wolframu (WS_2). Dysza miała średnicę 0,40 mm. Grubość wytłaczanej linii była równa 450 μm , co określało poziomą rozdzielczość druku. Pionowa rozdzielczość drukowania wynosząca 100 μm była definiowana przez grubość warstw wydruków. Wyprodukowano próbki o grubości czterech milimetrów w postaci czterdziestu warstw. Próbki zostały wytworzone z prostoliniowym wzorem wypełnienia i współczynnikiem wypełnienia równym 100%. Biorąc pod uwagę cel tego badania, podstawowe pomiary THz TDS dotyczyły pomiaru właściwości optycznych w zakresie promieniowania od 0,1 THz do 1 THz, co odpowiada długości fali od 0,3 mm do 3 mm.

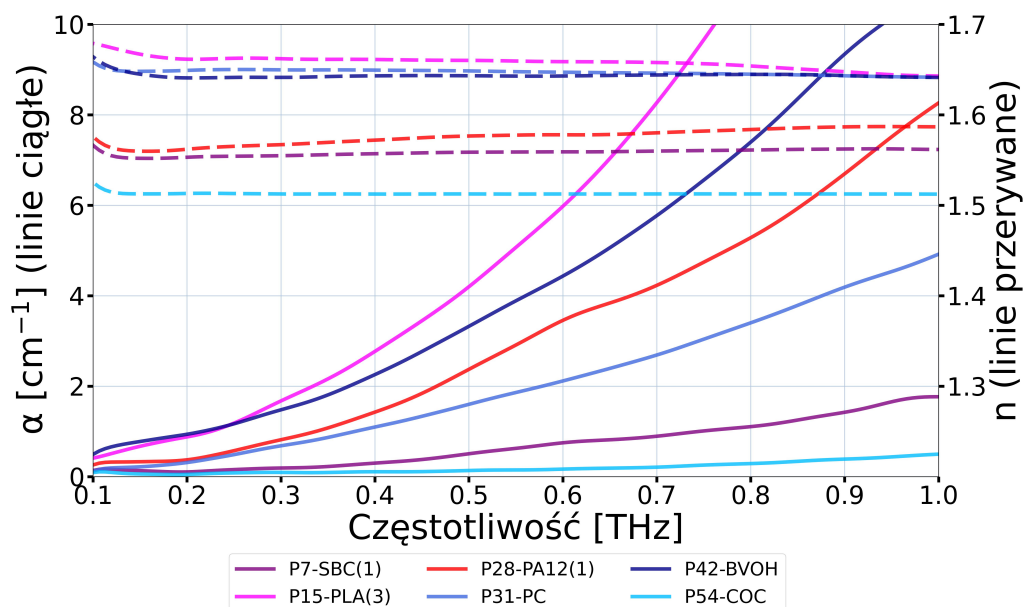
Zakres ten został wybrany w oparciu o natężenie zarejestrowanego sygnału przez detektor po przejściu przez częściowo przezroczyste próbki polimerowe z grupy poddanej badaniu przedstawionej w Tabeli A1 oraz Tabeli A2. Powyższe parametry druku pozwalają na wytwarzanie quasi-jednorodnych obiektów o detalach sub-falowych w prawie całym analizowanym zakresie promieniowania THz. Podczas procesu drukowania temperatury platformy i dyszy zostały ustawione zgodnie z zaleceniami producenta. Poziom chłodzenia został również ustawiony zgodnie z zaleceniami producenta. Ze względu na prostotę modeli drukowania, w większości przypadków dodatkowa obróbka wydruków nie była konieczna.

Zdjęcia wybranych próbek reprezentujących różne kategorie (grupy) materiałów pokazano na Rysunku 5.1. Przedstawione próbki zostały wytworzone różnymi technikami takimi jak druk 3D w technologii FDM, druk 3D w technologii SLS oraz metoda odlewnicza.



Rysunek 5.1: Zdjęcia wybranych próbek reprezentujące różne kategorie materiałów. Próbki te zostały następnie zbadane przy użyciu technologii THz TDS w celu określenia ich właściwości optycznych. Zgodnie z notacją z Tabeli A1, Tabeli A2 i Tabeli A3 próbki zostały wyprodukowane z: a) materiału elastomerowego (P36) przy użyciu technologii FDM; b) materiału kompozytowego z PETG i dodatkiem włókna węglowego (P57) przy użyciu technologii FDM; c) materiału kompozytowego - PLA z dodatkiem drewna (P17) przy użyciu technologii FDM; d) transparentnego w zakresie THz materiału SBC (P7) przy użyciu technologii FDM; e) proszku PP (P12) przy użyciu technologii SLS; f) parafiny (W3) przy użyciu metody odlewniczej.

W Aneksie do pracy w Załączniku 3 przedstawiono szczegółowe wyniki pomiarów właściwości optycznych próbek polimerowych w zakresie promieniowania THz. Na potrzeby przeprowadzenia analizy na Rysunku 5.2 pokazano właściwości optyczne kilku wybranych próbek wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM. Oznaczenia materiałów na Rysunku 5.2 są zgodne z Tabłą A1 oraz Tabłą A2 (Załącznik 2 w Aneksie do pracy). Przedstawione dane dotyczą współczynnika absorpcji α (linie ciągłe) oraz współczynnika załamania n (linie przerywane) w dziedzinie częstotliwości w zakresie od 100 GHz do 1 THz. Wybrane materiały to: SBC (*ang. Styrene Butadiene Copolymer*), PLA (*ang. Polylactic Acid*), PA12 (*ang. Polyamide 12*), PC (*ang. Polycarbonate*), BVOH (*ang. Butenediol Vinyl Alcohol*) oraz COC (*ang. Cyclic Olefin Copolymer*).



Rysunek 5.2: Współczynnik absorpcji α (linie ciągłe) i współczynnik załamania n (linie przerywane) próbek polimerowych w dziedzinie częstotliwości w zakresie od 100 GHz do 1 THz. Przedstawione dane dotyczą wybranych próbek, wytworzonych przy użyciu druku przestrzennego w technologii FDM, zmierzonych korzystając z techniki THz TDS.

SBC i COC wyróżniają się niskim współczynnikiem absorpcji w zakresie promieniowania THz, co czyni je pożądanymi do zastosowań w tej dziedzinie, w szczególności do prototypowania DOE. PLA to najczęściej stosowany materiał w druku 3D metodą FDM, zapewnia on dobrą stabilność wymiarową i łatwość przetwarzania. Natomiast PA12 jest często wykorzystywany w prototypowaniu optyki THz i znajduje szerokie zastosowanie w badaniach naukowych [99,141]. Do analizy wybrano również BVOH, który należy do

grupy materiałów rozpuszczalnych w wodzie, pełniąc funkcję materiału podporowego przy druku skomplikowanych struktur. PC charakteryzuje się wyjątkową odpornością na uderzenia, wysoką przezroczystością w zakresie światła widzialnego oraz odpornością na promieniowanie UV, działanie wielu substancji chemicznych i stosunkowo wysokie temperatury. W zakresie THz PC wykazuje stosunkowo wysoki współczynnik załamania wynoszący około 1,65, co jest korzystne w wielu zastosowaniach optycznych.

Wyniki przedstawione na Rysunku 5.2 pokazują zróżnicowane właściwości optyczne różnych typów polimerów w zakresie promieniowania THz. Warto zauważyć, że współczynnik absorpcji większości materiałów znacząco wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości. Spośród analizowanych materiałów SBC oraz COC charakteryzują się najniższym współczynnikiem absorpcji w całym analizowanym zakresie spektralnym. W szczególności współczynnik absorpcji COC jest wielokrotnie niższy w porównaniu z pozostałymi materiałami, co czyni go pożądanym materiałem do produkcji THz DOE.

Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawionych w Aneksie do pracy w Załączniku 3, Załączniku 4, Załączniku 5 i Załączniku 6 wskazują na możliwość dobrania odpowiedniego materiału do konkretnych zastosowań optycznych. W rezultacie możliwa jest redukcja strat sygnałów występujących w THz układach optycznych wynikających z tłumienia promieniowania wprowadzanego przez elementy optyczne. Z analizowanej grupy polimerów stosowanych w druku 3D w technologii FDM, materiały P54-COC oraz P7-SBC(1)(Bendlay) zostały wybrane do wytworzenia DOE przedstawionych w tej rozprawie. Oba materiały charakteryzują się wyjątkowo niskim współczynnikiem absorpcji w analizowanym zakresie częstotliwości od 100 GHz do 1 THz. Dodatkowo, są one stosunkowo łatwe w obróbce podczas druku 3D, w przeciwieństwie do pozostałych przezroczystych materiałów dla zakresu THz. Niewielki skurcz materiałów P54-COC oraz P7-SBC(1)(Bendlay) sprawia, że wydrukowane obiekty nie ulegają odkształceniom, co jest kluczowe w przypadku wytwarzania DOE, które są projektowane z myślą o wprowadzeniu konkretnego opóźnienia fazowego.

5.2 Wpływ parametrów druku 3D na właściwości optyczne DOE wytworzonych z COC

Z uwagi na unikalne właściwości optyczne materiału P54-COC zbadano w jaki sposób parametry druku przestrzennego wpływają na właściwości optyczne wytworzonych z niego obiektów w zakresie promieniowania THz. Do tej części badań wybrano materiał COC ze względu na jego wyjątkowo niski współczynnik absorpcji w zakresie promieniowania THz. Ponadto COC jest biokompatybilny, co umożliwia wytwarzanie elementów optycznych, które mogą mieć kontakt z żywą tkanką.

Badania przedstawione w tej części pracy pozwoliły zidentyfikować parametry druku o istotnym znaczeniu, które mają kluczowy wpływ na jednorodność wytworzonych obiektów wydruków i skutecznie poprawiają właściwości optyczne wydrukowanych próbek, a w konsekwencji wydajność drukowanych DOE. Otrzymane wyniki zostały zaprezentowane w pracach naukowych [177, 178].

5.2.1 Wytworzenie próbek COC

W celu określenia wpływu różnych parametrów druku 3D na właściwości optyczne obiektów wytworzonych z COC, wyprodukowano serie próbek przy użyciu technologii FDM. Następnie wykonano pomiary właściwości optycznych próbek przy użyciu THz TDS (zgodnie z opisem zawartym w Podrozdziale 4.1). Każda seria próbek została wytworzona poprzez zmianę jednego z parametrów druku przestrzennego oraz zawierała próbkę referencyjną (wspólne parametry dla wszystkich serii). Weryfikowane parametry druku obejmowały:

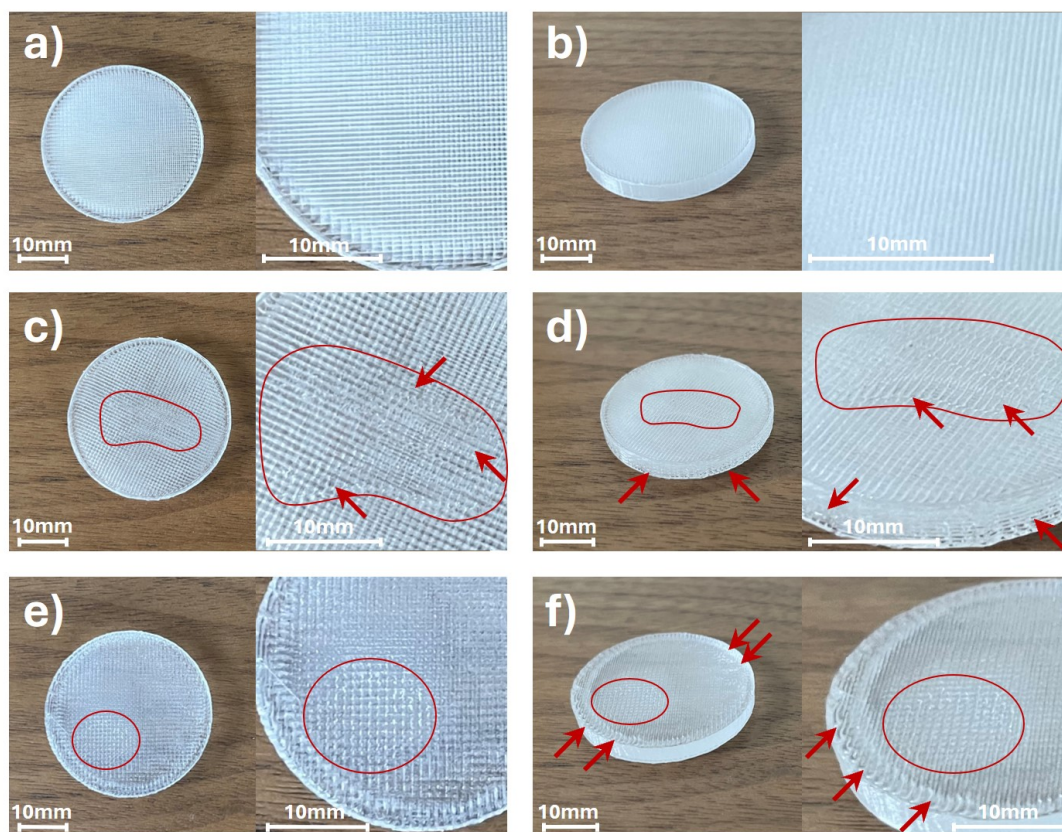
- temperaturę dyszy (temperaturę druku),
- rozmiar dyszy,
- prędkość druku,
- szerokość wytłaczanych linii,
- poziom chłodzenia,
- współczynnik przepływu materiału (przez dyszę),
- wysokość drukowanych warstw,
- wzór wypełnienia.

Próbka referencyjna została wydrukowana oddzielnie dla każdej serii. Parametry druku próbek referencyjnych zostały wstępnie szczegółowo zweryfikowane, co pozwoliło na prawidłowe wytworzenie DOE zaprezentowanych w pracach naukowych [32, 140, 151]. Niniejsze badanie ma na celu nie tylko weryfikację wcześniej ustalonych parametrów druku przestrzennego uznanych za poprawne, ale także ocenę wpływu parametrów druku przestrzennego na właściwości optyczne wytworzonych DOE. Jest to możliwe z uwagi na fakt, że wydrukowane próbki posiadają takie same parametry druku jak wytwarzane DOE. Próbka referencyjna została wytworzona przy następujących parametrach druku:

- temperatura dyszy 240°C,
- średnica dyszy 400 μm ,
- prędkość druku 60 mm/s (ale 20 mm/s dla pierwszej warstwy wydruku),
- szerokość wytłaczanych linii 450 μm ,
- brak chłodzenia (poziom chłodzenia 0%),
- współczynnik przepływu materiału 102% wartości standardowej,
- wysokość warstwy 100 μm ,
- prostoliniowy wzór wypełnienia.

Wszystkie próbki (z wyjątkiem próbki wyprodukowanej w pozycji poziomej) zostały zaprojektowane jako obiekty cylindryczne o średnicy podstawy równej 35 mm oraz wysokości 4 mm. Taka metoda projektowania próbek pozwoliła na dokładne scharakteryzowanie ich właściwości optycznych w centralnej części próbki, gdzie dysza drukarki osiąga odpowiednią prędkość przyspieszając od krawędzi próbki. Dodatkowo, odpowiednio dobrana grubość próbek umożliwia redukcję wpływu pasożytniczych odbić Fresnela wewnątrz próbek, które występują przy mniejszych grubościach próbek (opisane w Podrozdziale 4.2). Zdjęcia próbki referencyjnej i wybranych próbek wraz z odkształceniami uzyskanymi dla określonych parametrów druku przedstawiono na Rysunku 5.3.

Zdjęcia próbek referencyjnych zostały przedstawione na Rysunku 5.3a i Rysunku 5.3b. Próbkę referencyjną zostały wytworzone przy wstępnie przetestowanych parametrach druku (wcześniej wspomnianych w niniejszym podrozdziale). Nie zaobserwowano znaczących odkształceń próbek referencyjnych. Rysunek 5.3 ilustruje również, jak nieprawidłowe parametry druku mogą wpływać na odkształcenia i deformacje drukowanego obiektu. Rysunek 5.3c i Rysunek 5.3d przedstawiają zdjęcia próbek wyprodukowanych

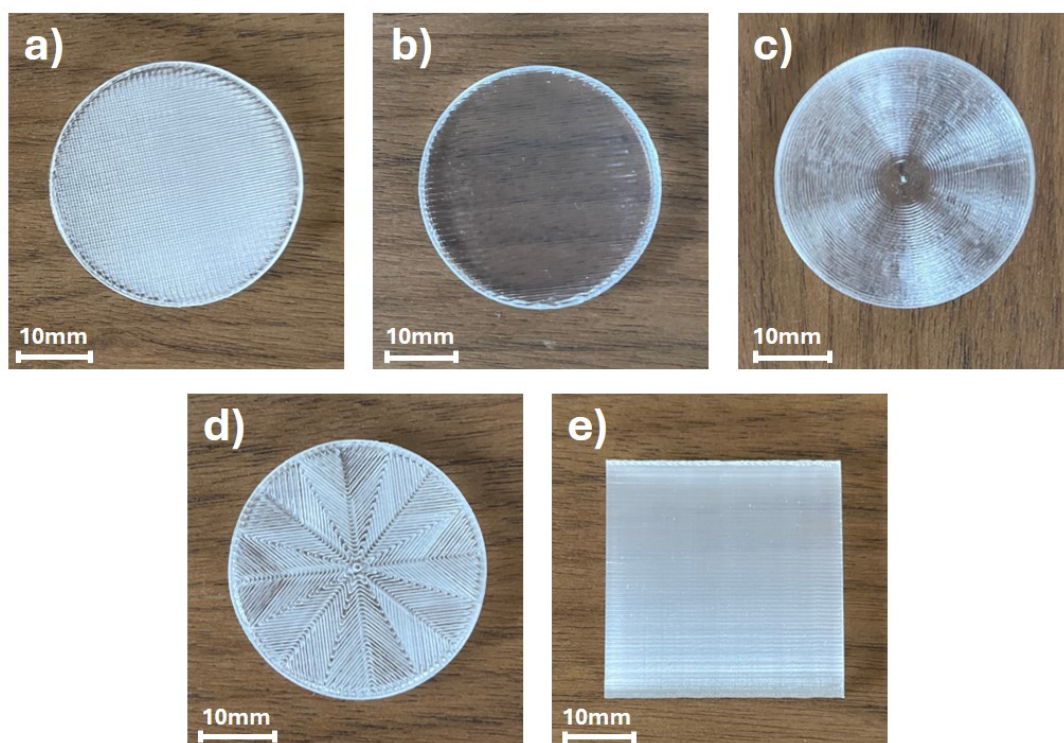


Rysunek 5.3: Przykładowe próbki wydrukowane w technologii FDM z materiału COC, a następnie zbadane przy użyciu THz TDS; a) i b) próbki referencyjne bez widocznych deformacji; c) i d) próbki wydrukowane ze zbyt grubymi warstwami, które powodują deformacje (oznaczone czerwonym kolorem) w centralnej części i na ścianach bocznych próbek; e) i f) próbki wydrukowane ze zbyt wysoką wartością parametru przepływu materiału, co doprowadziło do odkształceń widocznych na górnej powierzchni i bocznych ściankach próbek (odkształcenia oznaczone czerwonym kolorem) [177].

ze stanowczo zbyt grubymi warstwami (równymi $400\ \mu\text{m}$). W procesie produkcji tak grubych warstw, prędkość drukowania została zmniejszona do 50% wartości referencyjnej. Nieodpowiednia grubość warstwy miała znaczący wpływ na dokładność łączenia linii i warstw drukowanego obiektu, w rezultacie skutkując gorszą jednorodnością struktury próbki i powodując deformacje (oznaczone czerwonym kolorem), które są wyraźnie widoczne w centralnej części i na ścianach bocznych próbek. Rysunek 5.3e i Rysunek 5.3f przedstawiają fotografie próbek wydrukowanych z nadmiernie wysokim natężeniem przepływu materiału (110% wartości standardowej). Nadmierne wypełnienie materiałem obiektu skutkuje deformacjami widocznymi na górnej powierzchni i ściankach bocznych

próbek (odkształcenia oznaczone czerwonym kolorem). Jest to spowodowane zbyt dużą objętością materiału wtłaczanego w zadany obszar wydruku (pojedynczej linii), przez co podczas sekwencyjnego wytłaczania kolejnych linii materiał zostaje ponownie uplastyczniony oraz szuka ujścia do sąsiednich warstw/linii wydruku.

Wykonano również pomiary próbek wydrukowanych z różnego rodzaju wzorami wypełnienia w celu określenia ewentualnej anizotropii wynikającej z kierunku ułożenia drukowanych linii. Zdjęcia próbek przedstawiono na Rysunku 5.4.



Rysunek 5.4: Zdjęcia próbek wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM z materiału COC, następnie zbadane przy użyciu THz TDS. Zdjęcia odpowiadają próbkom wydrukowanym z różnymi wzorami wypełnienia: a) prostoliniowym; b) wyrównanym prostoliniowym; c) koncentrycznym; d) spiralnym ośmiokątnym; oraz e) prostoliniowym dla pionowej orientacji próbki [177].

Rysunek 5.4 ilustruje próbki wyprodukowane z różnymi wzorami wypełnienia takimi jak wzór: prostoliniowy, wyrównany prostoliniowy, koncentryczny, spiralny ośmiokątny oraz próbkę prostopadłościanu wydrukowaną w pozycji prostoliniowy dla pionowej orientacji próbki. Wstępne wizualne porównanie próbek wskazuje na różnice w jednorodności próbek, np. próbka wydrukowana z wyrównanym prostoliniowym

wzorem wypełnienia (Rysunku 5.4b) jest znacznie bardziej transparentna od pozostałych próbek w zakresie światła widzialnego. Należy jednak podkreślić, że zdjęcia zostały wykonane aparatem dedykowanym do rejestracji obrazu w świetle widzialnym. Promieniowanie THz posiada znacznie dłuższe fale, sięgające milimetrów. W związku z tym widoczne odstępstwa od jednorodności mogą nie wpływać na właściwości optyczne próbek w zakresie THz. W przypadku dłuższych fal THz szerokość linii druku czy też grubość warstw druku ma wymiary subfalowe (bądź rzędu długości fali), więc nieznaczne niedoskonałości i wzory struktur mogą nie mieć bezpośredniego wpływu na właściwości optyczne wydrukowanego obiektu. Jednak odkształcenie i defekty w próbkach lub niekompletne wypełnienie próbek będzie wyraźnie widoczne podczas weryfikacji właściwości optycznych przy użyciu technologii THz TDS.

5.2.2 Pomiary właściwości optycznych próbek COC

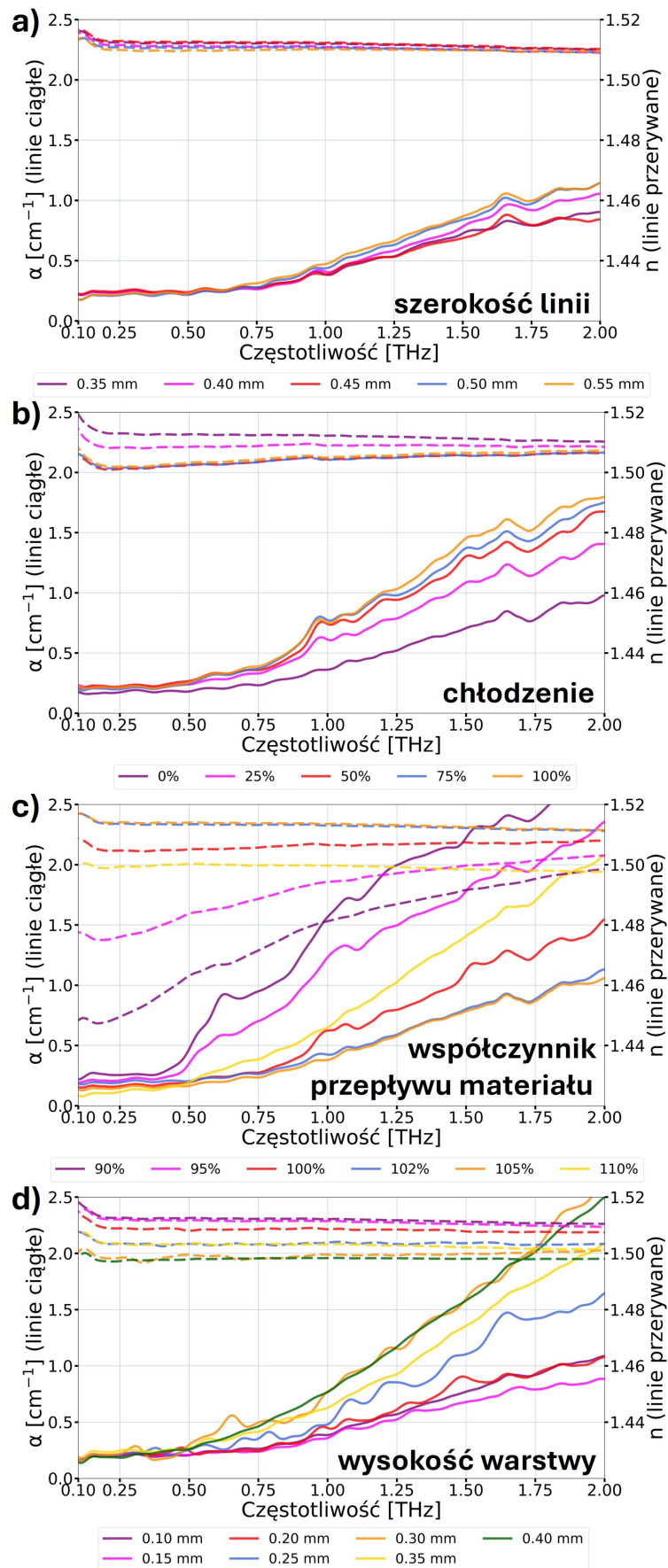
Właściwości optyczne próbek wydrukowanych przy użyciu druku przestrzennego w technologii FDM z biokompatybilnego i wysoce transparentnego w zakresie promieniowania THz materiału COC zostały zmierzone przy użyciu technologii THz TDS. Próbkę została umieszczona w przewężeniu wiązki THz w komorze z pompowanym suchym powietrzem zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 4.1. W ten sposób zredukowano wpływ absorpcji pary wodnej, która jest obecna w atmosferze i znacząco wpływa na pomiary THz TDS. Podczas pomiarów przez centralną część próbki ograniczoną aperturą o średnicy 13 mm przechodziło szerokopasmowe promieniowanie THz (impuls pikosekundowy). Wykonując te pomiary określono wartości współczynnika załamania i współczynnika absorpcji próbek jako kluczowe parametry optyczne w kontekście projektowania DOE. Na etapie analizy danych zastosowano apodyzację przy użyciu filtra BH4 w celu redukcji skutków pasożytniczych odbić Fresnela powstałych wewnątrz badanych próbek [154].

Uzyskane wyniki zostały podzielone na podstawie zaobserwowanych zależności. Rysunek 5.5 przedstawia wyniki, dla których zaobserwowano wpływ parametrów druku na właściwości optyczne wydrukowanych próbek. Natomiast Rysunek A8 w Aneksie do pracy w Załączniku 7 przedstawia wyniki, dla których nie zaobserwowano znaczącego wpływu parametrów druku na właściwości optyczne wytworzonych próbek.

Na Rysunku 5.5 linie ciągłe reprezentują współczynnik absorpcji α próbek, a linie przerywane reprezentują współczynnik załamania n próbek przedstawiony w dziedzinie częstotliwości w zakresie od 100 GHz do 2 THz. Oczekiwana poprawa właściwości optycznych polega na zmniejszeniu współczynnika absorpcji wydrukowanych obiektów.

Analizując dane przedstawione na Rysunku 5.5a można stwierdzić, że wybór odpowiedniej szerokości wytłaczanej linii jest jednym ze znaczących paramentów w kontekście przeprowadzonych badań. Szerokość linii powinna być większa niż średnica dyszy ze względu na nienewtonowską naturę polimerów i efekt Barusa występujący podczas przepływu polimeru przez kanał, które skutkują poszerzeniem strumienia materiału na wyjściu kanału (dyszy) [152,153]. Rekomendowana jest szerokość wytłaczania linii równa 0,45 mm dla dyszy o średnicy 0,40 mm. Wymuszanie zbyt dużej szerokości wytłaczanych linii podczas procesu drukowania (powyżej 120% średnicy dyszy) skutkuje drukowaniem zdeformowanych linii, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu współczynnika absorpcji i niewielkiego spadku współczynnika załamania wydrukowanego obiektu (próbki).

Zauważono również niekorzystny wpływ chłodzenia wydruku na właściwości optyczne wytworzonych próbek, co wynika z pomiarów przedstawionych na Rysunku 5.5b. Wraz ze wzrostem poziomu chłodzenia zaobserwowano znaczny spadek wartości współczynnika załamania dla niższych częstotliwości THz. Natomiast próbki wykazywały znaczny wzrost wartości współczynnika absorpcji dla wyższych częstotliwości THz. Zjawisko to przypisuje się zmniejszeniu jednorodności próbek wynikającemu z niepełnej adhezji między warstwami (i/lub liniami) wydruku spowodowanej chłodzeniem. Gdy pod uwagę brane są niższe częstotliwości THz, warstwy struktur ze szczelinami powietrznymi między nimi są traktowane przez wiązkę THz jako jednorodne komponenty, ze względu na fakt, że wymiary defektów są dużo mniejsze od długości fali. Można powiedzieć, że wytworzony obiekt posiada niższy efektywny współczynnik załamania (będący pewną wypadkową wartością elementu i szczeliny). Jednakże, gdy wyższe częstotliwości THz propagują się przez próbkę, wiązka THz oddziałuje z komponentami (po części rozdzielonymi/połączonymi warstwami), co powoduje straty sygnału (np. z powodu efektów dyfrakcji i rozproszenia, a także wtórnych strat wynikających z odbić Fresnela). W związku z tym wartość współczynnika absorpcji wytwarzanego obiektu znacznie wzrasta i dlatego zaleca się wyłączenie chłodzenia podczas drukowania DOE, gdy nie prowadzi to do deformacji drukowanego obiektu.



Rysunek 5.5: Właściwości optyczne próbek COC wydrukowanych przy zmianie parametrów druku: a) szerokości wytłaczanych linii; b) poziomego chłodzenia; c) współczynnika przepływu materiału; d) wysokości drukowanych warstw [177].

Podobny wpływ, ale w znacznie większym stopniu, zaobserwowano analizując zmiany wartości współczynnika przepływu materiału przez dyszę na parametry optyczne drukowanej próbki, przedstawiony na Rysunku 5.5c. Dla niższych częstotliwości THz, gdy przepływ materiału wydruku jest zbyt mały (na poziomie 90% lub 95% wartości standardowej), nastąpił znaczący spadek wartości współczynnika załamania wydrukowanych próbek. Natomiast dla częstotliwości bliskich 2 THz wartość współczynnika absorpcji była nawet trzykrotnie wyższa w porównaniu do próbki referencyjnej. W tej konkretnej sytuacji zjawisko to odnosi się do luk powstałych między wytłaczanymi liniami wydruku, spowodowanych brakiem materiału budującego drukowany obiekt. Jednakże, gdy współczynnik przepływu materiału jest zbyt wysoki (na poziomie 110% wartości standardowej), pogorszenie właściwości optycznych jest również znaczące i jest wynikiem deformacji próbki zilustrowanej na Rysunku 5.3e i Rysunku 5.3f. W tym przypadku zaobserwowano wzrost wartości współczynnika absorpcji i znaczny spadek wartości współczynnika załamania. Należy jednak podkreślić, że w przeciwieństwie do wcześniej wspomnianej sytuacji, gdy zastosowano przepływ materiału równy 110%, obniżenie wartości współczynnika załamania jest niezależne od częstotliwości (podobne w całym analizowanym zakresie częstotliwości). Rekomendowane jest nieznaczne zwiększenie parametru współczynnika przepływu materiału do produkcji DOE przy użyciu materiału COC, którego wartość powinna być ustawiona pomiędzy 102% a 105% wartości standardowej. W ten sposób nieznaczna nadwyżka materiału służy wypełnieniu szczelin międzyliniowych, zapewniając bardziej jednorodny wydruk, a jednocześnie pozwala uniknąć powstaniu deformacji drukowanego elementu.

Ostatni wykres na Rysunku 5.5d przedstawia właściwości optyczne próbek wydrukowanych z różną grubością warstw. Zaobserwowano, że grubość równa 100 μm lub 150 μm jest optymalną grubością linii, a co za tym idzie odpowiednią grubością warstwy w druku 3D w technologii FDM do produkcji THz DOE. Zauważono również spadek wartości współczynnika załamania próbek, wraz ze wzrostem grubości linii, o względnie stałą wartość w całym analizowanym zakresie częstotliwości. Należy zwrócić uwagę, że wartość współczynnika absorpcji wzrosła znacząco dla grubości warstwy powyżej 200 μm . Wyniki wskazują na wyższą jednorodność próbek wydrukowanych przy mniejszych grubościach warstw. Należy jednak podkreślić, że próbki w tej analizie zostały wyprodukowane bez chłodzenia wydruków, a ten czynnik może mieć większy wpływ na

zachowanie optyczne próbek zawierających większą liczbę warstw (mniejszą grubość linii).

Przeprowadzono również wstępne badania zależności dwójłomności wytworzonych obiektów od kierunku drukowanych linii. W tym celu wykonano pomiary THz TDS dla próbek z prostoliniowym wypełnieniem, wyrównanym prostoliniowym wypełnieniem oraz próbek drukowanych w orientacji pionowej. Każdą próbkę badano w trzech orientacjach: 0° , 45° i 90° . Taka seria pomiarów miała na celu uzyskanie pełniejszego obrazu wpływu kierunku wypełnienia na właściwości optyczne wydrukowanych obiektów, jednak nie zaobserwowano dwójłomności w żadnym z badanych obiektów.

Analiza danych przeprowadzonych na podstawie Rysunku 5.5 oraz Rysunku A8 w Załączniku 7 w Aneksie do pracy powaliła na określenie optymalnych parametrów druku przestrzennego w technologii FDM z użyciem biokompatybilnego materiału COC. Parametry te pozwalają na maksymalizację wydajności wytwarzanych DOE dla zakresu THz oraz redukcję strat wynikających ze zjawisk dyfrakcyjnych i odbić Fresnela. Proponowane parametry druku to:

- temperatura druku (dyszy) 245°C - 250°C ,
- średnica dyszy $400\ \mu\text{m}$,
- prędkość druku $60\ \text{mm/s}$ (ale $20\ \text{mm/s}$ dla pierwszej warstwy wydruku),
- szerokość wytłaczanych linii $450\ \mu\text{m}$,
- brak chłodzenia (poziom chłodzenia 0%),
- współczynnik przepływu materiału 102% – 105% wartości standardowej,
- wysokość warstwy $100\ \mu\text{m}$ lub $150\ \mu\text{m}$,
- prostoliniowy lub wyrównany prostoliniowy wzór wypełnienia.

Uzyskane wyniki pomiarów opisane w tej części pracy wskazują na możliwość dobrania odpowiednich parametrów druku przestrzennego w technologii FDM gwarantujących uzyskanie wysokiej jednorodności wydrukowanych elementów z materiału COC. Zwiększenie jednorodności wydrukowanych DOE skutkuje poprawą ich właściwości optycznych, a co za tym idzie zwiększeniem ich wydajności.

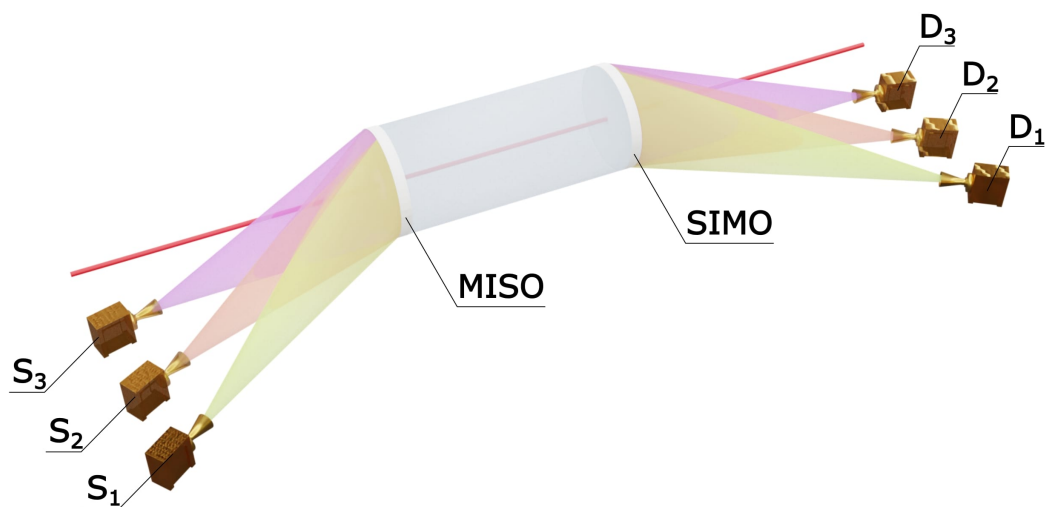
Rozdział 6

System MIMO

Wiele THz systemów telekomunikacyjnych korzysta z transmisji sygnałów w wolnej przestrzeni, podobnie do obecnie stosowanej technologii Wi-Fi. Systemy te używają różnych metod multipleksacji promieniowania w celu zwiększa ilości przesyłanych danych w danym systemie. Jednym z takich rozwiązań jest system MIMO, w którym korzysta się z wielu źródeł promieniowania i detektorów.

Zaproponowany w tej pracy sposób realizacji systemu MIMO opiera się na użyciu dwóch DOE. Pierwszy z nich realizuje funkcjonalność multipleksacji promieniowania THz, nazwany na potrzeby pracy strukturą typu MISO. Zadaniem struktury MISO jest przekierowanie promieniowania generowanego przez przestrzennie rozseparowane źródła w pojedynczy tor optyczny propagujący się w wolnej przestrzeni. Drugi DOE, nazwany na potrzeby pracy strukturą typu SIMO, odpowiada za demultipleksację przestrzenną promieniowania THz. Jego zadaniem jest rozdzielenie składowych sygnałów propagujących się wspomnianym torem optycznym i przekierowanie ich do przestrzennie rozdzielonych detektorów. Należy wspomnieć, że demultipleksacja w zaproponowanym rozwiązaniu rozumiana jest jako podział sygnałów ze względu na częstotliwość promieniowania THz, dlatego też opisywany w pracy system typu MIMO realizuje multipleksację przestrzenną w dziedzinie częstotliwości THz (*ang. Frequency Division Multiplexing*). Poglądowy schemat systemu typu MIMO przedstawiono na Rysunku 6.1.

W tym rozdziale pracy opisano sposób zaprojektowania, przeprowadzone symulacje numeryczne i weryfikację eksperymentalną zaproponowanych struktur MISO oraz SIMO. Następnie przedstawiono zbudowany dwukanałowy system typu MIMO oraz przeprowadzone dla niego pomiary eksperymentalne.



Rysunek 6.1: Poglądowy schemat systemu typu MIMO realizującego funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji przestrzennej promieniowania THz. Czerwoną linią oznaczono główną oś optyczną. Źródła promieniowania THz oznaczono jako $S_1 - S_3$, natomiast detektory rejestrujące sygnał THz oznaczono jako $D_1 - D_3$.

6.1 Struktury MISO realizujące multipleksację przestrzenną promieniowania THz

Struktury typu MISO realizujące funkcjonalność multipleksacji przestrzennej promieniowania THz zostały szczegółowo opisane w pracy naukowej [160].

6.1.1 Projektowanie struktur MISO

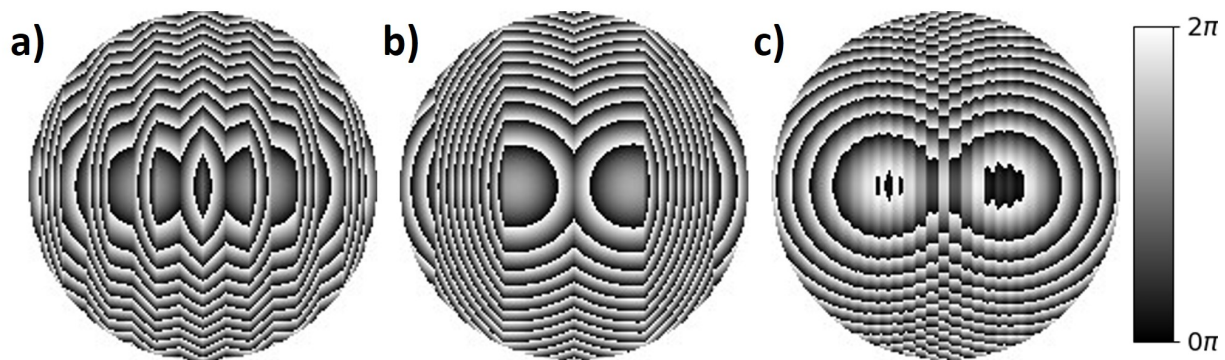
W pracy przedstawiono trzy struktury MISO. Struktury MISO zostały zaprojektowane jako DOE, których zadaniem było przekierowanie dwóch wiązek THz padających na DOE z różnych kierunków w jeden tor optyczny propagujący się w wolnej przestrzeni oraz skupienie promieniowania w określonej odległości, w której następowała detekcja. Wszystkie trzy struktury MISO zostały zaprojektowane do przekierowywania wiązek pochodzących z pozaosiowych punktowych źródeł promieniowania, które znajdowały się w odległości 100 mm od głównej osi optycznej. Płaszczyzna struktur MISO znajdowała się 300 mm za źródłami promieniowania, biorąc pod uwagę główną oś optyczną systemu.

Struktury MISO zostały zaprojektowane tak, aby skupiać promieniowanie w odległości równej 100 mm na głównej osi optycznej za każdą ze struktur. Wybrana DWL była równa 3,131 mm, co odpowiada częstotliwości 95,75 GHz. Średnice zaprojektowanych DOE były równe 150 mm.

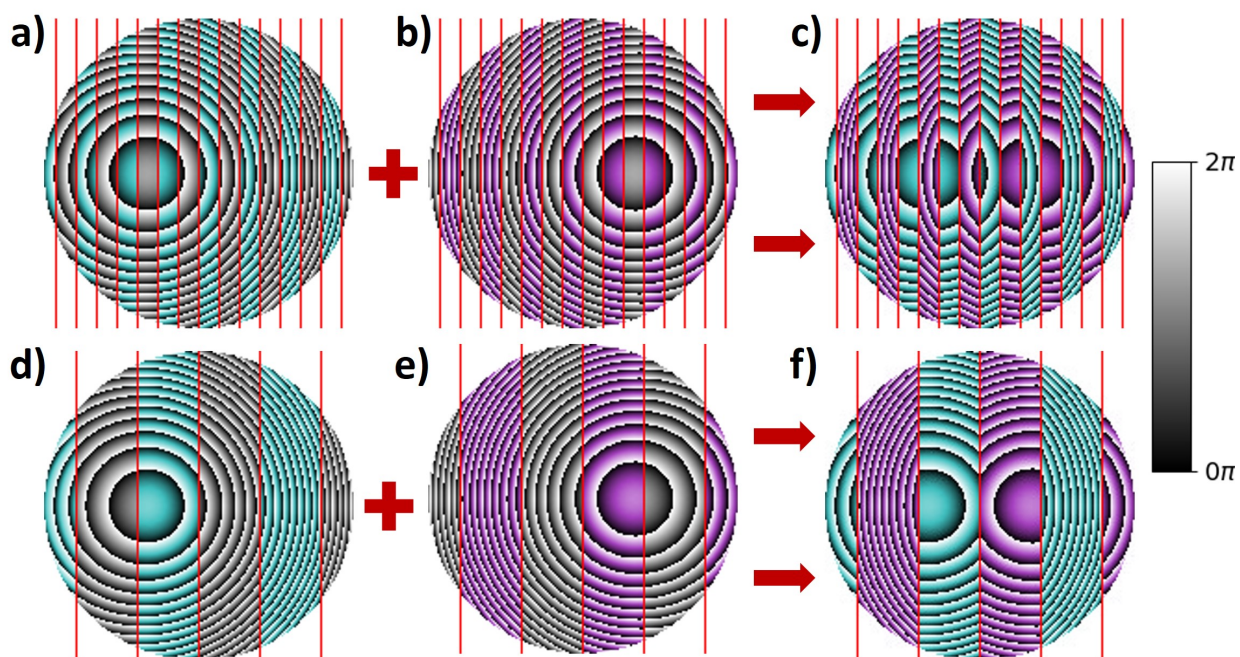
Należy wspomnieć, że liczba przysłony struktur MISO, zdefiniowana jako stosunek ogniskowej do średnicy, miała w przybliżeniu wartość równą 0,67. THz soczewki refrakcyjne o tak małej liczbie przysłony są trudne do wykonania ze względu na ich bardzo dużą grubość, która wprowadza ogromne tłumienie. Zadanie prawidłowego zaprojektowania struktur MISO jest nietrywialne, ponieważ oprócz małej liczby przysłony projektowane DOE przekierowują promieniowanie docierające ze źródeł pozaosiowych, które jest dodatkowo rozbieżne.

Zastosowano notację MISO1 – MISO3, która odpowiada kolejnym rodzajom struktur realizującym funkcjonalność multipleksacji przestrzennej promieniowania THz. Rozkłady fazy struktur MISO1 i MISO2 zostały zaprojektowane jako połączenie dwóch rozkładów soczewek o przesuniętych środkach w miejsca odpowiadające pozycji źródeł. Soczewki posiadały ciągły rozkład fazy (kinoform), były skupiające i zaprojektowane bez uwzględnienia przybliżenia przyosiowego. Rozkład fazowy soczewki kinoformowej opisano Równaniem (4.11), które można zastosować w przypadku dużych kątów ugięcia, co jest istotne w przypadku struktur charakteryzujących się małą liczbą przysłony.

Uzyskany rozkład fazy MISO1 przedstawiono na Rysunku 6.2a, a rozkład fazy MISO2 na Rysunku 6.2b. Oba rozkłady składają się z segmentów przypominających paski, na przemian odpowiadających przekierowaniu promieniowania z lewego i prawego źródła. Pierwszy segment struktury jest odpowiedzialny za przekierowanie przychodzącego promieniowania THz z lewej strony osi optycznej i skupienie go na głównej osi optycznej w odległości równej 100 mm. W tym samym czasie drugi segment struktury działa podobnie dla promieniowania THz docierającego z prawej strony osi optycznej. Kolejne segmenty sekwencyjnie przekierowują promieniowanie w analogiczny sposób. Zasada segmentacji struktur MISO została zilustrowana na Rysunku 6.3, gdzie kolorem turkusowym oraz fioletowym oznaczono rozpatrywane segmenty. Następnie segmenty zostały połączone naprzemiennie, tworząc ostateczną strukturę MISO. Szerokość segmentów była równa 10 mm w przypadku struktury MISO1 i 30 mm w przypadku struktury MISO2.



Rysunek 6.2: Rozkłady fazowe struktur MISO realizujących funkcjonalność multipleksacji przestrzennej promieniowania THz w wolnej przestrzeni; a) i b) rozkłady fazy uzyskane jako połączenie pozaosiowych segmentów skupiającej soczewki kinoformowej o szerokościach segmentów – odpowiednio 10 mm i 30 mm; c) rozkład fazy uzyskany poprzez zastosowanie algorytmu iteracyjnego [160].



Rysunek 6.3: Zasada segmentacji rozkładów fazowych pozaosiowych segmentów kinoformowych soczewek skupiających. Sekwencyjnie połączone segmenty, oznaczone kolorem turkusowym i fioletowym, tworzą multipleksujące struktury MISO; a) – c) okres segmentacji równy 10 mm użyty do wygenerowania rozkładu struktury MISO1; d) – f) okres segmentacji równy 30 mm użyty do wygenerowania rozkładu struktury MISO2 [160].

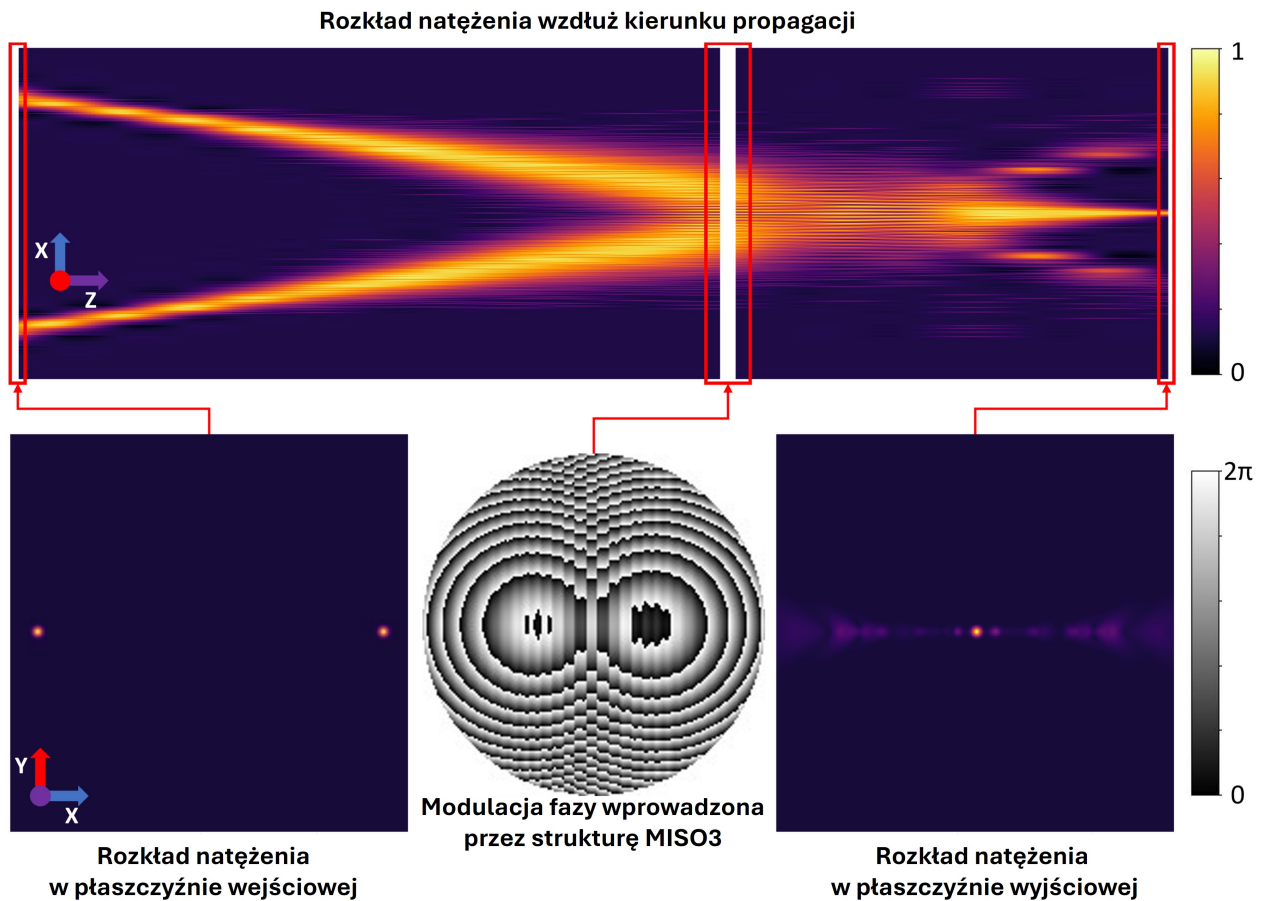
Inna metoda projektowania została zastosowana dla struktury MISO3. Rozkład fazy struktury MISO3, przedstawiony na Rysunku 6.2c wygenerowano przy użyciu iteracyjnego algorytmu ping-pong opisanego w Podrozdziale 4.5. W tym przypadku w algorytmie zadeklarowano trzy płaszczyzny między, którymi następowała iteracyjna propagacja. W pierwszej (wejściowej) płaszczyźnie wymuszano rozkład natężenia promieniowania dwóch rozseparowanych przestrzennie rozkładów gaussowskich odpowiadających źródłom promieniowania THz. W drugiej płaszczyźnie obserwowano zmieniający się rozkład fazy odpowiadający profilowi fazowemu struktury. W trzeciej (wyjściowej) płaszczyźnie wymuszano pożądany rozkład natężenia pola wyjściowego, czyli plamki ogniskowej. Po dziesięciu iteracjach uzyskano rozkład fazy struktury MISO3.

Należy podkreślić, że działanie wszystkich trzech struktur MISO zostało zweryfikowane przy użyciu symulacji numerycznych oraz pomiarów eksperymentalnych dla częstotliwości równych 95,3 GHz (3,146 mm) i 96,2 GHz (3,116 mm). W związku z tym, że wygenerowane profile fazowe były zaprojektowane dla DWL (95,75 GHz – 3,131 mm), wprowadzały nieznacznie odbiegające opóźnienie fazowe w stosunku do oczekiwanej wartości 2π . Opóźnienie fazowe wprowadzone dla częstotliwości 95,3 GHz było równe w przybliżeniu $2,01\pi$, a dla częstotliwości 96,2 GHz było równe w przybliżeniu $1,99\pi$. Oba odchylenia są pomijalne ze względu na nieznaczne różnice w porównaniu do wartości DWL.

6.1.2 Wyniki symulacji numerycznych

Wydajność zaprojektowanych rozkładów opóźnienia fazowego struktur MISO została zweryfikowana przy użyciu symulacji numerycznych. W tym celu użyto programu LightSword 6.0, wykorzystującego zmodyfikowaną metodę splotową do obliczania propagacji światła [35], opisaną w Podrozdziale 4.4. Wygenerowano dwa rozseparowane przestrzennie źródła promieniowania THz charakteryzujące się gaussowskimi rozkładami natężenia oraz rozbieżnymi rozkładami fazy z punktów, gdzie znajdują się oba źródła. Każde ze źródeł promieniowania THz umieszczono w odległości 300 mm przed płaszczyzną struktury i przesunięto symetrycznie o 100 mm (w prawo i w lewo) względem głównej osi optycznej. W ten sposób wygenerowany rozkład promieniowania wejściowego był propagowany do płaszczyzny struktury, oświetlając testowaną strukturę MISO. Odpowiedni rozkład fazy pola wejściowego umożliwił oświetlenie centralnej części testowa-

nej struktury MISO. Zweryfikowano rozkład natężenia powstały w płaszczyźnie wyjściowej układu w odległości 100 mm za strukturą, gdzie promieniowanie przekierowane przez strukturę MISO zostało skupione w ognisku na głównej osi optycznej. Na Rysunku 6.4 przedstawiono wizualizację rozkładu natężenia w przekroju wzdłuż głównej osi optycznej układu, a także w płaszczyznach wejściowej i wyjściowej dla wybranej struktury MISO3.

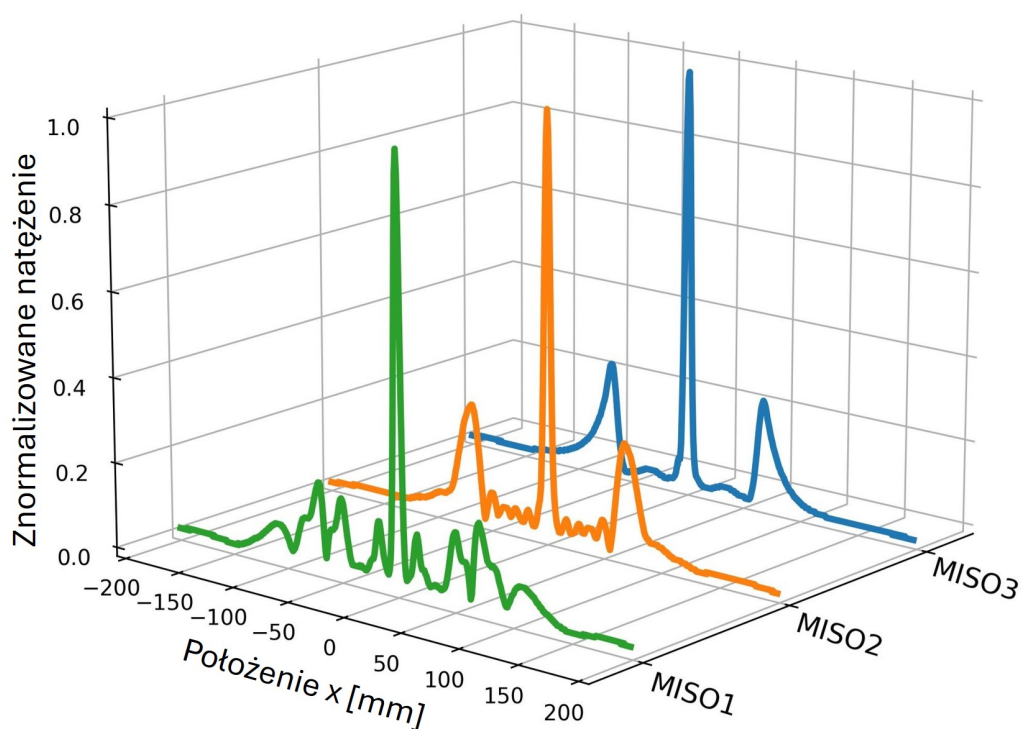


Rysunek 6.4: Wyniki symulacji numerycznej uzyskane dla struktury MISO3. Przedstawiono rozkład natężenia promieniowania wzdłuż głównej osi optycznej oraz rozkłady natężenia w przekrojach ortogonalnych do osi optycznej w płaszczyźnie wejściowej i wyjściowej systemu [160].

Kolejna część analizy dotyczy znormalizowanych rozkładów natężenia w poziomym przekroju ortogonalnym do głównej osi optycznej w płaszczyźnie wyjściowej systemu MISO (w płaszczyźnie ogniska za strukturami MISO). Uzyskane rozkłady natężenia dla wszystkich trzech struktur MISO przedstawiono na Rysunku 6.5. Obszar poddany analizie dotyczy ogniska na głównej osi optycznej i jego otoczenia,

gdzie mogą wystąpić niepożądane efekty dyfrakcyjne. W tej pracy otoczenie ogniska zdefiniowano jako centralny obszar o średnicy 147 mm, obliczony na podstawie lokalizacji głównej plamki ogniskowej o najwyższej wartości natężenia.

Analizując wyniki symulacji numerycznych przedstawione na Rysunku 6.5 można stwierdzić, że wszystkie trzy struktury MISO przekierowywały promieniowanie z dwóch przestrzennie oddzielonych quasi-punktowych źródeł promieniowania w pojedyncze ognisko zlokalizowane na głównej osi optycznej. Na etapie symulacji, zgodnie z oczekiwaniami, wszystkie trzy struktury MISO spełniły zaprojektowane wymagania dotyczące ich funkcjonalności, jednak występowanie szumu w pobliżu głównego ogniska powinno być dalej badane i weryfikowane w ocenie eksperymentalnej. Szum jest tutaj rozumiany jako promieniowanie, które nie zostało przekierowane bezpośrednio w ognisko.



Rysunek 6.5: Porównanie wyników symulacji numerycznych dla trzech różnych zaprojektowanych struktur MISO. Analizowane dane dotyczą poziomego przekroju znormalizowanego rozkładu natężenia w poprzek głównej osi optycznej przedstawiającego ognisko za strukturą oraz jego otoczenie [160].

Każda ze struktur MISO przekierowała promieniowania w $-1.$ rząd ugięcia dyfrakcyjnego (który formował plamkę ogniskową znajdującą się na głównej osi optycznej). Jest to poprawne ugięcie promieniowania, co odpowiada realizowanej multipleksacji przestrzennej sygnału do pojedynczego kanału optycznego, przedstawionego na Rysunku 6.5 jako centralny pik sygnału. Jednak część promieniowania nie została poprawnie ugięta, tylko propagowała się jako pozostałe rzędy ugięcia, tworząc piki boczne. Na Rysunku 6.5 wspomniane niepożądane zjawisko występuje jako dwa mniejsze, symetryczne piki boczne widoczne na rozkładzie natężenia po obu stronach piku centralnego. Każdy z nich odpowiada promieniowaniu generowanemu przez określone źródło promieniowania. Wspomniane niepożądane piki boczne mają kształt przypominający rozkład charakterystyczny dla dyfrakcji na aperturze kołowej w strefie bliskiej – odpowiadający obserwacji stref Fresnela.

Inne źródło szumu pochodzi z nieznacznego niedopasowania profili fazowych struktur MISO. Jak wspomniano w poprzedniej części, struktury MISO zostały zaprojektowane dla konkretnego DWL (3,131 mm, czyli 95,75 GHz – będącą wartością pomiędzy wartościami odpowiadającymi częstotliwościom źródeł 96,2 GHz oraz 95,3 GHz). Należy podkreślić, że DOE są wrażliwe na zmiany częstotliwości. Należy również wspomnieć, że struktury MISO zostały zaprojektowane w celu przekierowania padającego z dwóch przeciwnych kierunków. Takie DOE są szczególnie trudne do uzyskania, gdyż w procesie projektowania i produkcji wymagana jest wysoka wydajność struktury. Zmiana rozkładu ustawienia źródeł, tak żeby były zlokalizowane po jednej stronie głównej osi optycznej systemu pozwoliłyby na znaczną redukcję części szumu. Jednak na potrzeby niniejszego badania struktury MISO zostały zaprojektowane tak, aby spełniały wymagania funkcjonalne opisane w poprzednich akapitach i zilustrowane na Rysunku 6.4. Co więcej, takie rozwiązanie ma znacznie większy potencjał w przyszłych badaniach do zastosowania w wielokanałowych systemach telekomunikacyjnych.

W przypadku struktur zaprojektowanych jako połączenie skupiających soczewek kinoformowych (MISO1 i MISO2) wystąpiły niepożądane efekty interferencyjne w pobliżu głównego ogniska widoczne w postaci artefaktów między głównym pikiem natężenia (ogniskiem), a kolejnymi maksimami pików bocznych. Efekt ten zależy od okresu segmentacji zastosowanej na etapie projektowania struktur. Artefakty są mniej znaczące dla MISO2 niż dla struktury MISO1. Zjawisko to jest wynikiem występo-

wania okresowości w rozkładach fazowych struktur. Gdy okres segmentacji jest zbyt mały (w tym przypadku dla struktury MISO1), wyraźny wzór interferencyjny jest obecny w rozkładzie natężania. Efekt ten można zmniejszyć poprzez zwiększenie okresu segmentacji, tak jak ma to miejsce w przypadku struktury MISO2.

Dodatkowo przeprowadzono analizę numeryczną uzyskanych wyników symulacji. Wyznaczono względną wydajność dla każdej ze struktur MISO dla obszaru centralnej części (o średnicy 147 mm) przekroju znormalizowanego rozkładu natężenia, co przedstawiono w Tabeli 6.1. Należy podkreślić, że istotne jest tylko otoczenie głównej osi optycznej, gdzie pasożytniczy szum może wpływać na prawidłowe przekierowanie sygnału w plamkę ogniskową na głównej osi optycznej. Wybrany obszar bezpośrednio odpowiada zakresowi skanowania użytemu w pomiarach eksperymentalnych. W kontekście tego badania, względna wydajność η_1 została zdefiniowana jako stosunek ilości natężenia przekierowanego przez strukturę w plamkę ogniskową I_{ogn} znajdującą się na głównej osi optycznej względem całkowitego natężenia sygnału I_{calc} zebranego z analizowanego obszaru o średnicy 147 mm. Względną wydajność η_1 dla struktur MISO opisuje Równanie (6.1). Ponadto w Tabeli 6.1 przedstawiono znormalizowane wartości natężenia odpowiadające maksymalnym wartościom występujących pików bocznych w analizowanym obszarze.

$$\eta_1 = \frac{I_{ogn}}{I_{calc}} \quad (6.1)$$

Tabela 6.1: Wyniki symulacji numerycznych przedstawiają porównanie trzech struktur MISO. Dane dotyczą względnej wydajności struktur i maksymalnych wartości znormalizowanych natężeń pików bocznych w otoczeniu głównej osi optycznej. Pogrubiona wartość odpowiada najwyższej uzyskanej względnej wydajności struktury.

Struktura	Względna wydajność	Znormalizowane natężenie pików ogniska i szumu						
		-3. pik	-2. pik	-1. pik	ognisko	+1. pik	+2. pik	+3. pik
MISO1	38,0%	0,20	0,18	0,15	1,00	0,14	0,17	0,20
MISO2	41,7%	-	-	0,27	1,00	0,26	-	-
MISO3	51,4%	-	-	0,26	1,00	0,25	-	-

Analizując dane przedstawione w Tabeli 6.1 widać, że struktura MISO1 przekierowała mniej promieniowania w plamkę ogniskową na głównej osi optycznej niż struktura MISO2 (względna wydajność η_1 jest 9,68% niższa). Był to przewidywany wynik ze względu na okresowy rozkład struktury MISO1 i uzyskany rozkład natężenia na wyjściu układu (pokazany na Rysunku 6.5). Warto jednak wspomnieć, że w przypadku struktury MISO1 zaobserwowano trzy piki boczne, stanowiące szum, po każdej stronie ogniska, podczas gdy w przypadku struktury MISO2 zarejestrowano tylko jeden znaczący pik boczny. Niemniej jednak znormalizowane poziomy natężenia pików bocznych w przypadku struktury MISO2 były w przybliżeniu 56,60% wyższe niż średnia wartość poziomu pików bocznych uzyskana dla struktury MISO1. Względna wydajność η_1 zależy zarówno od rozkładu szumu w pobliżu głównego ogniska (również w odniesieniu do liczby pików bocznych), jak i wysokości pików bocznych.

W przypadku struktury MISO3 (zaprojektowanej metodą iteracyjną, oznaczonej kolorem niebieskim na Rysunku 6.5), zaobserwowano pojedyncze piki boczne po obu stronach głównej osi optycznej (szum odpowiadający nieugiętemu promieniowaniu ze źródeł). Średnie wartości szczytowe pików bocznych uzyskane dla struktury MISO3 były 4,49% niższe w porównaniu do tych otrzymanych dla struktury MISO2. Należy podkreślić, że struktura MISO3 wprowadza najmniejszy szum w analizowanym rozkładzie. W analizowanym obszarze można dostrzec plamkę ogniskową na głównej osi optycznej, a poza nią jedynie pojedynczy pik boczny z każdej strony. Obliczona względna wydajność dla struktury MISO3 jest najwyższa spośród zweryfikowanych struktur MISO i ma wartość 51,37%. Względna wydajność struktury MISO3 jest 35,08% wyższa niż struktury MISO1 oraz 23,16% wyższa niż struktury MISO2.

Po przeprowadzeniu symulacji numerycznych trzy struktury MISO zostały wytworzone, a ich wydajność została zweryfikowana w eksperymentalnym układzie optycznym. Porównanie wydajności struktur w układzie eksperymentalnym jest kluczowe dla oceny poprawności uzyskanych zależności oraz identyfikacji potencjalnych błędów ich wytworzenia.

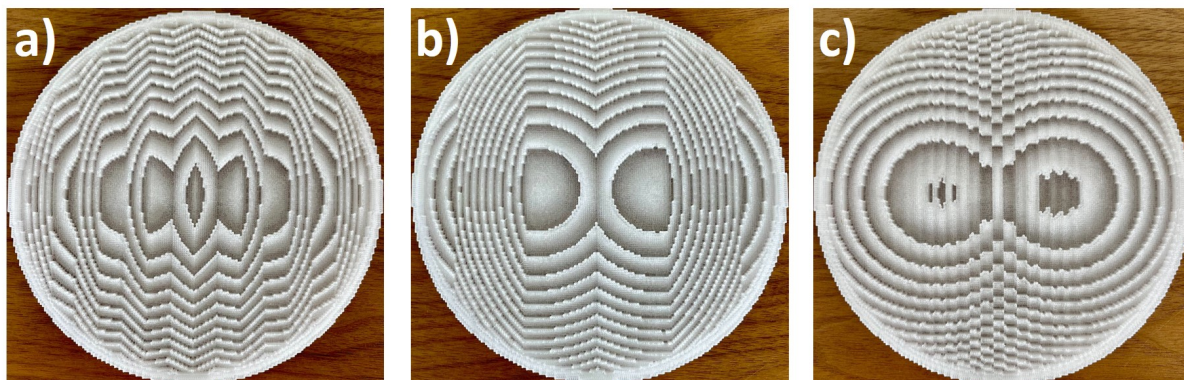
6.1.3 Modelowanie i wytwarzanie struktur MISO

Wykorzystując mapy fazowe przedstawione na Rysunku 6.2, stworzono modele przestrzenne struktur MISO. W tym celu użyto nowej metody modelowania przestrzennego dedykowanej do struktur dyfrakcyjnych o złożonych profilach przestrzennych, opisanej w Podrozdziale 4.6. Dla każdej struktury MISO każdy piksel macierzy w skali szaroodcieniowej został wyciągnięty przestrzennie w prostopadłościenny blok, którego wysokość została zdefiniowana zgodnie z jego wartością opisaną przy użyciu Równania (4.10). Dla wszystkich trzech struktur MISO rozmiar piksela był równy 0,9 mm (w obu wymiarach), co odpowiadało grubości dwóch wytłaczanych linii w procesie produkcyjnym. Maksymalna wysokość DOE była w przybliżeniu równa 5,60 mm. Dodatkowo dla każdej struktury dodano podłoże o grubości 1 mm, zapewniające stabilność DOE i zapobiegające deformacjom w procesie produkcyjnym.

Badanie właściwości optycznych materiałów polimerowych w zakresie częstotliwości THz pozwoliły na wybór transparentnego materiału o odpowiednim współczynniku załamania do wydrukowania struktur MISO (opisane w Podrozdziale 5.1). Materiał P7-SBC(Bendlay) został wybrany do produkowania struktur MISO przy użyciu druku przestrzennego w technologii FDM. Biorąc pod uwagę częstotliwość odpowiadającą DWL struktur, współczynnik załamania SBC jest równy 1,557. Co więcej, materiał SBC ma wyjątkowo niską wartość współczynnika absorpcji dla niskiego zakresu częstotliwości THz, co pozwoliło na otrzymać struktury nie wprowadzające znacznego tłumienia podczas działania w konfiguracji transmisyjnej.

Struktury MISO zostały wytworzone przy temperaturze druku ustawionej na 235°C i temperaturze platformy grzewczej równej 70°C. W celu zapewnienia dodatkowej przyczepności, platforma grzewcza została pokryta żelową powłoką na bazie alkoholu. Takie rozwiązanie minimalizuje powstanie odkształceń struktury podczas procesu jej chłodzenia i znajduje ono zastosowanie w przypadku niektórych grup materiałów polimerowych. Struktury zostały wydrukowane przy użyciu dyszy o średnicy 0,40 mm, co determinuje rozdzielczość poziomą druku równą 450 μm (grubość drukowanej linii). Rozdzielczość pionowa odpowiada wysokości drukującej warstwy i została ustawiona na 150 μm . W ten sposób każda struktura MISO składała się z 37 wydrukowanych warstw, wprowadzających opóźnienie fazowe w zakresie od 0 do 2π , co zgodnie z Tabelą 4.1 zagwarantowało

wysoką wydajność dyfrakcyjną. Struktury MISO zostały wydrukowane z minimalnym poziomem chłodzenia, gdzie prędkość wentylatora nie przekraczała 15% maksymalnej możliwej wartości, gwarantując powolny proces chłodzenia warstw, wysoką jednorodność struktury i odpowiednią przyczepność do platformy grzewczej. Fotografie wytworzonych struktur MISO przedstawiono na Rysunku 6.6.

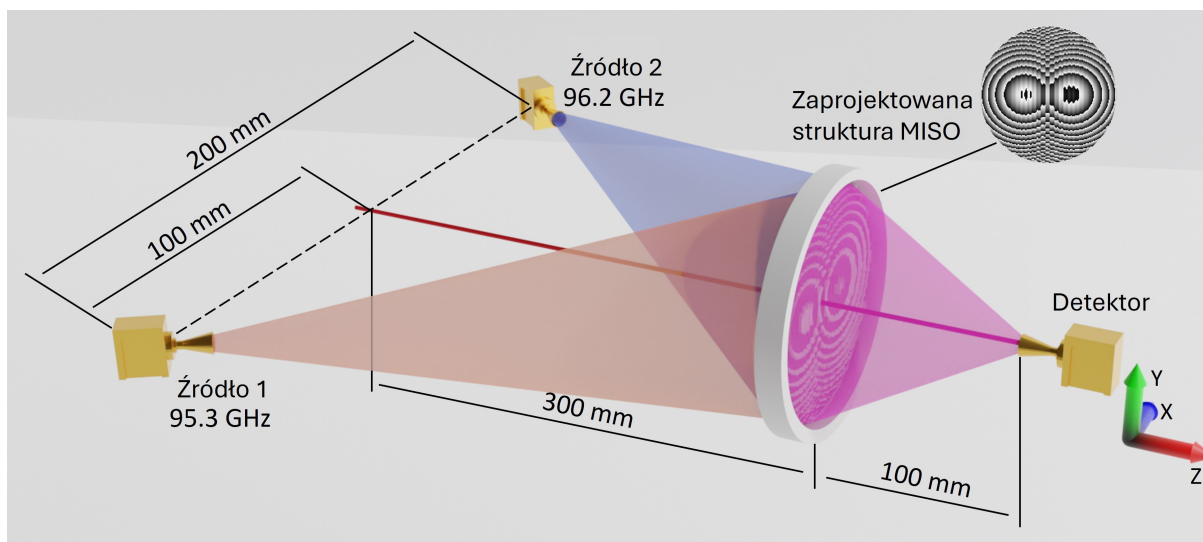


Rysunek 6.6: Zdjęcia wytworzonych struktur MISO przy użyciu druku 3D w technologii FDM z materiału SBC; a) i b) rozkłady struktur zostały uzyskane jako połączenie pozaosiowych segmentów soczewek skupiających; c) rozkład struktury został uzyskany przy użyciu algorytmu iteracyjnego [160].

6.1.4 Wyniki pomiarów eksperymentalnych

Poprawność działania struktur MISO wydrukowanych przy użyciu druku 3D w technologii FDM z materiału SBC została zweryfikowana poprzez pomiary eksperymentalne w układzie optycznym. Schemat układu optycznego zilustrowano na Rysunku 6.7.

W układzie eksperymentalnym użyto dwóch źródeł generujących bardzo wąskopasmowe wiązki promieniowania w zakresie sub-THz. Pierwszym źródłem promieniowania była dioda IMPATT (*ang. Impact Ionization Avalanche Transit Time*) firmy TeraSense. Dioda ta jest półprzewodnikiem dużej mocy, charakteryzującym się mocą wyjściową 900 mW, generującym sygnał o częstotliwości 95,3 GHz. Źródło to znajdowało się po prawej stronie głównej osi optycznej. Drugim źródłem promieniowania była również dioda IMPATT firmy TeraSense, umieszczona po drugiej stronie osi optycznej. Jednak drugie źródło promieniowania generowało moc wyjściową 100 mW i sygnał o częstotliwości 96,2 GHz. Oba źródła promieniowania THz generowały wiązki o rozkładach natężenia w przekroju stanowiących rozkład gaussowski. Źródła promieniowania zostały obrócone o kąt $18,4^\circ$



Rysunek 6.7: Schemat układu optycznego do eksperymentalnej weryfikacji wydajności struktur MISO, realizujących multipleksację przestrzenną promieniowania THz [160].

względem głównej osi optycznej, oświetlając w ten sposób całą badaną strukturę MISO. Pierwsze źródło zostało osłabione przy użyciu filtra, który przepuszczał 10% promieniowania w celu wyrównania mocy obu sygnałów. Należy podkreślić, że wygenerowane promieniowanie z obu źródeł promieniowania oświetlało oceniane struktury pod stosunkowo dużym kątem, a zatem część promieniowania była tracona z powodu odbić Fresnela. Co więcej, tylko część wygenerowanego promieniowania oświetlającego strukturę została wykorzystana w badaniach eksperymentalnych. Pozostały sygnał został stłumiony poprzez zastosowanie materiałów pochłaniających/odbijających, aby uniknąć niepożądanych efektów interferencyjnych w układzie optycznym. Niemniej jednak, wszystkie struktury poddane weryfikacji eksperymentalnej zostały zmierzone w tych samych warunkach, zapewniając spójne wyniki umożliwiające porównanie ilościowe badanych struktur.

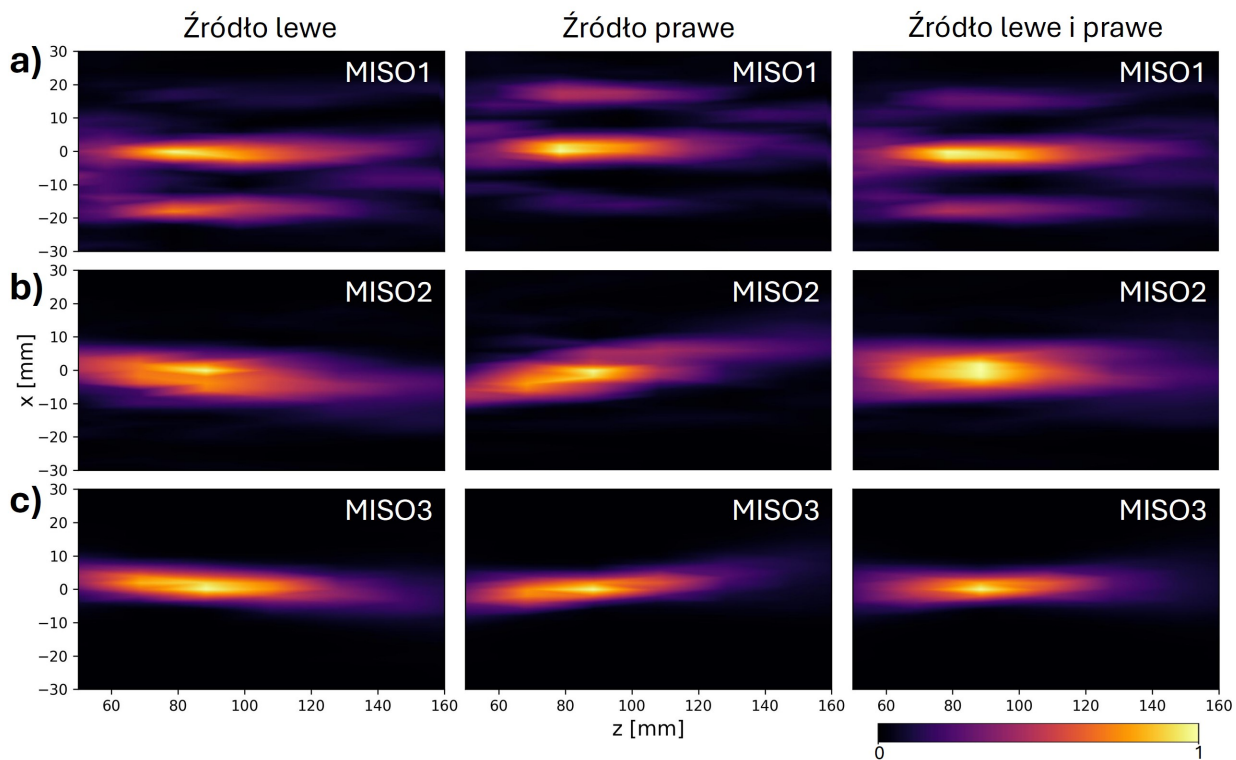
Oba źródła zostały umieszczone w odległości 300 mm od płaszczyzny struktury i przesunięte w bok o 100 mm względem głównej osi optycznej układu, jak pokazano na Rysunku 6.7. Każda weryfikowana eksperymentalnie struktura MISO była ustawiona podczas pomiarów prostopadle do głównej osi optycznej (zaznaczonej czerwonym kolorem na Rysunku 6.7). Sygnał THz przekierowany przez struktury MISO został zmierzony w odległości 100 mm za DOE przy użyciu detektora QOD (*ang. Quasi-Optical Detector*). Detektor QOD posiada diodę Schottky’ego zamontowaną na logarytmiczno-periodycznej antenie planarnej, która jest zainstalowana na powierzchni hemisferycznej soczewki

wykonanej z HR-Si (*ang. High-Resistivity Silicon*). Połączenie tej anteny i soczewki gwarantuje tzw. zysk anteny w zakresie od 24 dB do 30 dB. Zakres operacyjny detektora sięga od 0,1 THz do 1 THz. Detektor został zamontowany na automatycznych stolikach przesuwnych, co umożliwiło skanowanie przestrzenne płaszczyzny wyjściowej zbudowanego systemu poprzez zmianę położenia w trzech wymiarach.

Dla każdej wyprodukowanej struktury MISO w skanach przestrzennych wykryto plamkę ogniskową na głównej osi optycznej oraz wykonano pomiary rozkładu natężenia wzdłuż osi xz oraz xy (Rysunek 6.7). W ten sposób zweryfikowano i porównano działanie struktur MISO pod względem zdolności do przekierowywania sygnałów i kształtowania wiązek w układzie, a co za tym idzie zdolność do multipleksacji przestrzennej promieniowania THz. Pomiary zostały wykonane oddzielnie dla każdego ze źródeł promieniowania THz. Następnie przeprowadzono pomiary w przypadku, gdy oba źródła były włączone jednocześnie. Uzyskane znormalizowane rozkłady natężenia w płaszczyźnie poziomej xz przechodzącej przez ognisko znajdujące się na głównej osi optycznej przedstawiono na Rysunku 6.8.

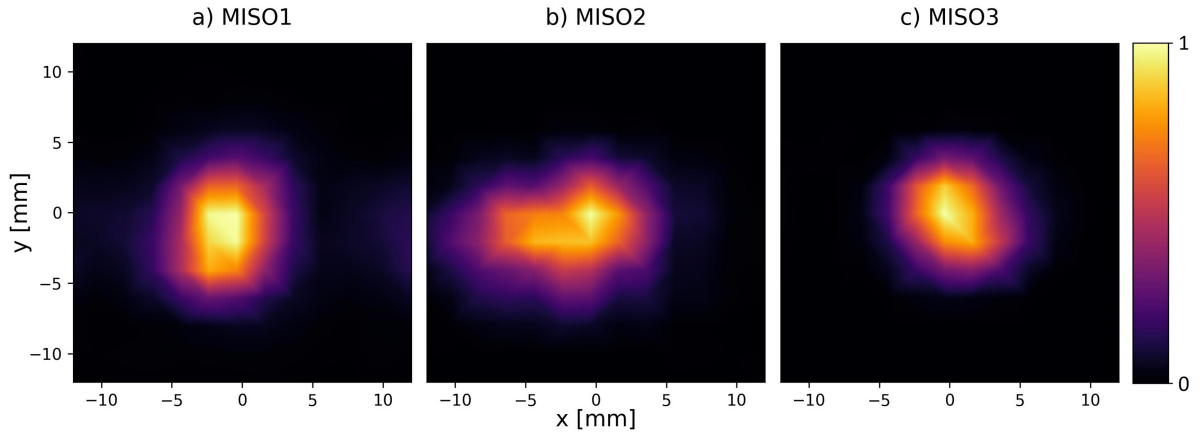
Następnie dla każdej ze struktur wykonano skany w płaszczyźnie xy w odległości, w której zaobserwowano maksymalne natężenie plamki ogniskowej. Uzyskane wyniki, przedstawione na Rysunku 6.9, dotyczą skanów wykonanych na stosunkowo niewielkim obszarze (20 mm x 20 mm). Miały one na celu weryfikację kształtów ognisk oraz występowania potencjalnych pików bocznych stanowiących szum w bliskim otoczeniu ognisk. W celu dokładniejszego odwzorowania rzeczywistego rozkładu natężenia w płaszczyźnie wyjściowej układu w procesie tworzenia Rysunku 6.8 i Rysunku 6.9 zastosowano interpolację liniową między punktami pomiarowymi.

Zgodnie z przewidywaniami, wszystkie trzy struktury MISO przekierowały promieniowanie w plamkę ogniskową znajdującą się na głównej osi optycznej w przybliżonej odległości 100 mm za każdą ze struktur. Na Rysunku 6.8a, dla struktury MISO1 można zaobserwować szum (piki boczne) w otoczeniu ogniska zgodnie z uzyskanymi wynikami symulacji numerycznych przedstawionymi w Tabeli 6.1 oraz na Rysunku 6.5. Można zauważyć, że dla wszystkich struktur MISO, kierunek wiązki jest nieznacznie obrócony względem osi optycznej, gdy wykonano pomiary przy użyciu pojedynczego źródła promieniowania (efekt ten można zaobserwować w pierwszych dwóch kolumnach na Rysunku 6.8).



Rysunek 6.8: Wyniki eksperymentalne dla trzech różnie zaprojektowanych struktur MISO realizujących funkcjonalność multipleksacji przestrzennej promieniowania THz. Przedstawione dane odnoszą się do znormalizowanych rozkładów natężenia w skanach podłużnych przechodzących przez ogniska zlokalizowane na głównej osi optycznej. Skany zostały wykonane w płaszczyźnie poziomej xz podczas działania "lewego" źródła promieniowania 96,2 GHz (lewa kolumna), "prawego" źródła promieniowania 95,2 GHz (środkowa kolumna) i obu źródeł promieniowania jednocześnie (prawa kolumna). Przedstawione wyniki dotyczą struktury: a) MISO1; b) MISO2; c) MISO3 [160].

Kolejnym zaobserwowanym zjawiskiem jest poszerzenie plamki ogniskowej dla struktury MISO2 w porównaniu do struktur MISO1 i MISO3. Poszerzenie to wystąpiło we wszystkich trzech skanach przedstawionych na Rysunku 6.8b oraz w przekroju przedstawionym na Rysunku 6.9b. Plamka ogniskowa jest poszerzona w płaszczyźnie poziomej (wzdłuż osi x). Ponadto, na podstawie Rysunku 6.9 można stwierdzić, że struktura MISO3 przekierowuje promieniowanie tworząc najmniejszą plamkę ogniskową spośród zweryfikowanych struktur, co jest pożądanym rezultatem. Dodatkowo analizując Rysunek 6.8c nie zaobserwowano znaczącego szumu pochodzącego od pików bocznych w pobliżu głównego ogniska. Wynika z tego, że struktura MISO3 przekierowała najwięcej sygnału w plamkę ogniskową znajdującą się na głównej osi optycznej.

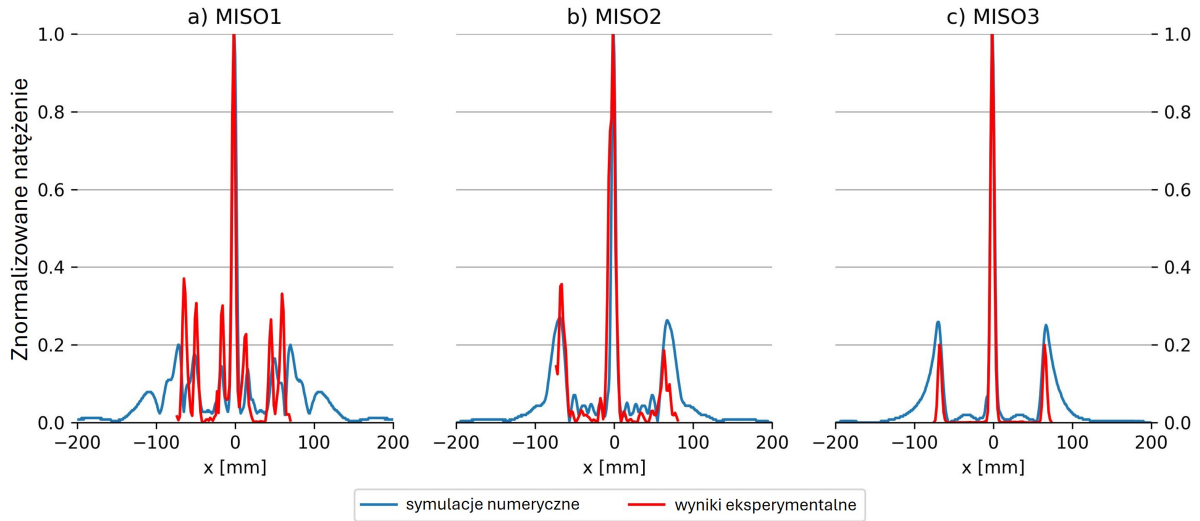


Rysunek 6.9: Wyniki eksperymentalne uzyskane dla trzech różnie zaprojektowanych struktur MISO. Przedstawione są znormalizowane dane rozkładu natężenia w płaszczyźnie xy w odległości ogniskowej przy uruchomionych dwóch źródłach promieniowania (96,2 GHz i 95,3 GHz) jednocześnie. Wyniki uzyskane dla struktury: a) MISO1; b) MISO2; c) MISO3 [160].

Dodatkowa analiza znormalizowanego rozkładu natężenia w poziomym przekroju przez plamki ogniskowe została przedstawiona na Rysunku 6.10. Analizowane dane dotyczą porównania wyników symulacji numerycznych i pomiarów eksperymentalnych dla trzech różnie zaprojektowanych struktur MISO. Oznaczenia od *a* do *c* odpowiadają wynikom uzyskanym odpowiednio dla struktur MISO1 do MISO3.

Ponadto wyniki eksperymentalne dotyczące znormalizowanych wartości natężenia odpowiadających maksimom pików ognisk oraz pików bocznych zostały poddane analizie ilościowej. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 6.2. Badany obszar dotyczył plamki ogniskowej zlokalizowanej na głównej osi optycznej (razem z otoczeniem o średnicy 147 mm), podobnie jak w symulacjach numerycznych.

Analizując dane przedstawione na Rysunku 6.10 i w Tabeli 6.2 można stwierdzić, że wyniki eksperymentalne są spójne z symulacjami numerycznymi. W przypadku struktury MISO1 (Rysunek 6.10a) rozkład natężenia pików bocznych pokrywa się przestrzennie z tym wygenerowanym przy użyciu symulacji numerycznych. Uzyskany poziom szumu w pomiarach eksperymentalnych był w przybliżeniu 76,16% wyższy niż w symulacjach. Piki boczne mają większe maksymalne wartości natężenia, jednak są węższe niż te przewidziane w symulacjach numerycznych. Zjawisko to może wynikać z mniejszej ilości sygnału przekierowywanego przez strukturę do głównego ogniska, niż przewidywano wcześniej



Rysunek 6.10: Porównanie symulacji numerycznych i wyników eksperymentalnych dla każdej z trzech struktur MISO. Przedstawione dane dotyczą znormalizowanego rozkładu natężenia w poziomym przekroju przez plamki ogniskowe znajdujące się na głównej osi optycznej, uzyskane przy jednoczesnym oświetleniu struktur dwoma źródłami, dla: a) MISO1; b) MISO2; c) MISO3 [160].

Tabela 6.2: Wyniki eksperymentalne przedstawiające porównanie trzech struktur MISO. Dane odnoszą się do znormalizowanej wartości natężenia maksymalnych wartości pików ogniska i pików bocznych (stanowiących szum) w pobliżu głównej plamki ogniskowej.

Struktura	Znormalizowane natężenie pików ogniska i szumu						
	-3. pik	-2. pik	-1. pik	ognisko	+1. pik	+2. pik	+3. pik
MISO1	0,370	0,307	0,301	1,000	0,228	0,265	0,331
MISO2	-	-	0,356	1,000	0,186	-	-
MISO3	-	-	0,200	1,000	0,200	-	-

w symulacji numerycznej. Warto zauważyć, że zarejestrowane eksperymentalnie piki boczne mają mniejsze szerokości, co może wynikać z kierunkowości detektora (tzw. kąta akceptacji, co było opisane szczegółowo w pracy [179]). Należy również podkreślić, że na etapie symulacji numerycznych, efekt cienia nie był brany pod uwagę [180], a może on mieć znaczący wpływ w przypadku pomiarów eksperymentalnych THz DOE przekierowujących promieniowanie pod dużymi kątami. Struktura MISO1 ma szybko zmieniający się profil przestrzenny, co może negatywnie wpływać na jej wydajność i powodować spadek ilości prawidłowo przekierowanego sygnału.

Wyniki eksperymentalne uzyskane dla struktury MISO2 wykazują podobny poziom szumu do symulacji numerycznych. Jedyna znacząca różnica widoczna jest na granicach weryfikowanego obszaru, gdzie występują piki boczne stanowiące sygnał bezpośrednio propagowany ze źródeł promieniowania bez ugięcia na strukturze. Poziom lewego piku bocznego jest 31,65% wyższy, a poziom prawego piku bocznego jest 29,34% niższy niż przewidywano w symulacjach numerycznych. Może to wynikać między innymi z nierównych natężeń obu źródeł lub jakiejś asymetrii w układzie. Natomiast lokalizacja obu pików bocznych jest zgodna z wcześniej przeprowadzonymi symulacjami.

Struktura MISO3 wykazuje wyższą względną wydajność w porównaniu do struktur MISO1 i MISO2. Uzyskany znormalizowany przekrój natężenia w pomiarach eksperymentalnych jest korzystniejszy w porównaniu z przeprowadzonymi symulacjami numerycznymi. Poziom szumu w postaci pików bocznych wokół ogniska jest w przybliżeniu 21,55% niższy niż przewidywano. Mniejsza szerokość pików bocznych zarejestrowanych eksperymentalnie może być spowodowana ograniczonym kątem akceptacji detektora [179], a dodatkowo skanowanie pola wyjściowego zostało wykonane prostopadłe do głównej osi optycznej – tak samo dla każdej struktury. W związku z tym obszar pomiarowy znajdujący się w pobliżu głównej osi optycznej był w pewien sposób uprzywilejowany, jednak ze względu na fakt, że wszystkie trzy weryfikowane eksperymentalnie struktury były badane w tych samych warunkach, to uzyskane wyniki mogą być względem siebie porównane. Struktura MISO3 charakteryzuje się mniejszymi pikami bocznymi oraz nie występują w tym przypadku praktycznie wcale efekty dyfrakcyjno-interferencyjne widoczne w postaci wielu dodatkowych mniejszych pików.

Dodatkowa analiza wyników eksperymentalnych została przedstawiona w Tabeli 6.3. Prezentowane dane dotyczą względnej wydajności struktur MISO, maksymalnego zarejestrowanego napięcia na detektorze oraz stosunku sygnału do szumu (*ang. Signal-to-Noise Ratio – SNR*). Względna wydajność jest zdefiniowana w taki sam sposób, jak w symulacjach numerycznych (Równanie 6.1), czyli jako stosunek sumy natężenia sygnału z obszaru ogniska do całkowitego natężenia w badanym obszarze o średnicy 147 mm. Maksymalne zmierzone napięcie odpowiada najwyższej wartości piku natężenia plamki ogniskowej w analizowanym przekroju. Należy wspomnieć, że zarejestrowana wartość napięcia odpowiada wartości natężenia promieniowania THz. Współczynnik SNR na potrzeby tego badania został zdefiniowany jako stosunek maksy-

malnej wartości natężenia plamki ogniskowej na głównej osi optycznej do maksymalnej wartości natężenia najwyższego piku bocznego.

Tabela 6.3: Analiza wyników eksperymentalnych przedstawiająca względną wydajność, maksymalną zarejestrowaną wartość napięcia przez detektor oraz wartości SNR dla trzech struktur MISO. Dane odnoszą się do obszaru otoczenia plamki ogniskowej zlokalizowanej na głównej osi optycznej. Pogrubione wartości odpowiadają najlepszym wynikom.

Struktura	Względna wydajność	Maksymalne zarejestrowane napięcie [mV]	SNR
MISO1	33,20%	0,419	2,70
MISO2	59,15%	0,489	2,81
MISO3	71,50%	1,081	5,00

Na podstawie danych przedstawionych w Tabeli 6.3 można stwierdzić, że ilość promieniowania THz przekierowana w plamkę ogniskową przez strukturę MISO3 jest znacznie wyższa w porównaniu z wynikami otrzymanymi dla struktur MISO1 i MISO2. Względna wydajność struktury MISO3 jest 115,36% wyższa niż struktury MISO1 i 20,88% wyższa niż struktury MISO2. Należy zauważyć, że przedstawione dane uwzględniają całkowitą szerokość plamki ogniskowej. Ze względu na poszerzenie rozmiaru plamki ogniskowej struktury MISO2 można stwierdzić, że uzyskana wydajność nie może być do końca porównana ilościowo z wydajnością struktury MISO3 ze względu na fakt, że sygnał rozkłada się na obszarze całej plamki ogniskowej, czyli maksymalna wartość natężenia jest znacznie mniejsza. Należy podkreślić, że maksymalna wartość napięcia (odpowiadająca natężeniu promieniowania) zmierzona dla struktury MISO3 była ponad dwukrotnie wyższa od tych wartości dla struktur MISO1 i MISO2. Obliczony współczynnik SNR dla struktury MISO3 był znacząco wyższy w porównaniu ze strukturami MISO1 oraz MISO2 i był równy 5.00.

Przedstawione wyniki wskazują, że implementacja odpowiedniej metody projektowania DOE do multipleksacji przestrzennej promieniowania umożliwia osiągnięcie wyższej wydajności. Struktura MISO3, ze względu na znacznie wyższą wydajność w porównaniu do pozostałych zaproponowanych struktur, została wybrana jako element do multipleksacji promieniowania THz w zaproponowanym systemie MIMO, opisanym w Podrozdziale 6.3.

6.2 Struktury SIMO realizujące demultipleksację przestrzenną promieniowania THz

Struktury typu SIMO realizujące funkcjonalność demultipleksacji przestrzennej promieniowania THz zostały szczegółowo opisane w pracach naukowych [140,181]. W tym podrozdziale zostaną szczegółowo opisane badania dotyczące struktur typu SIMO.

6.2.1 Projektowanie struktur SIMO

Struktury SIMO zaprojektowane zostały jako połączenie dwóch różnych rozkładów fazy DOE. Pierwszym DOE była kinoformowa soczewka skupiająca. Zadaniem tego komponentu było przekierowywanie padającego promieniowania w pojedynczą plamkę ogniskową w ściśle określonej odległości, gdzie miała miejsce detekcja sygnału.

Rozkład fazowy pierwszego komponentu został zaprojektowany zgodnie z Równaniem (4.11), które nie zawiera przybliżenia przyosiowego, dzięki czemu może być użyte do projektowania elementów optycznych przekierowujących promieniowania pod stosunkowo dużym kątem ugięcia. Drugi komponent struktur SIMO działał jako separator przestrzenny kanałów optycznych różniących się częstotliwością promieniowania oświetlającego strukturę. Separacja przestrzenna została osiągnięta poprzez użycie fazowej piłokształtnej siatki dyfrakcyjnej, której rozkład fazy opisany jest Równaniem (4.13). Siatki piłokształtne zapewniają asymetryczne ugięcie promieniowania względem osi optycznej (przekierowują promieniowanie w -1. rząd ugięcia). Należy zwrócić uwagę, że DOE to elementy optyczne projektowane dla konkretnej długości fali, dla której wydajność struktury jest najwyższa. Zmiana długości fali (częstotliwości) powoduje zmniejszenie wydajności struktury, natomiast w przypadku siatek dyfrakcyjnych również wpływa na kąt ugięcia promieniowania, jak już wspomniano w Podrozdziale 4.3. W ten sposób zaprojektowana struktura realizuje dwie funkcjonalności. Po pierwsze siatka piłokształtna asymetrycznie ugięta promieniowanie w -1. rząd dyfrakcji, gdzie następuje separacja przestrzenna częstotliwości, podczas gdy skupiająca soczewka kinoformowa jest odpowiedzialna za skupienie promieniowania na detektorze, co maksymalizuje wartość rejestrowanej energii.

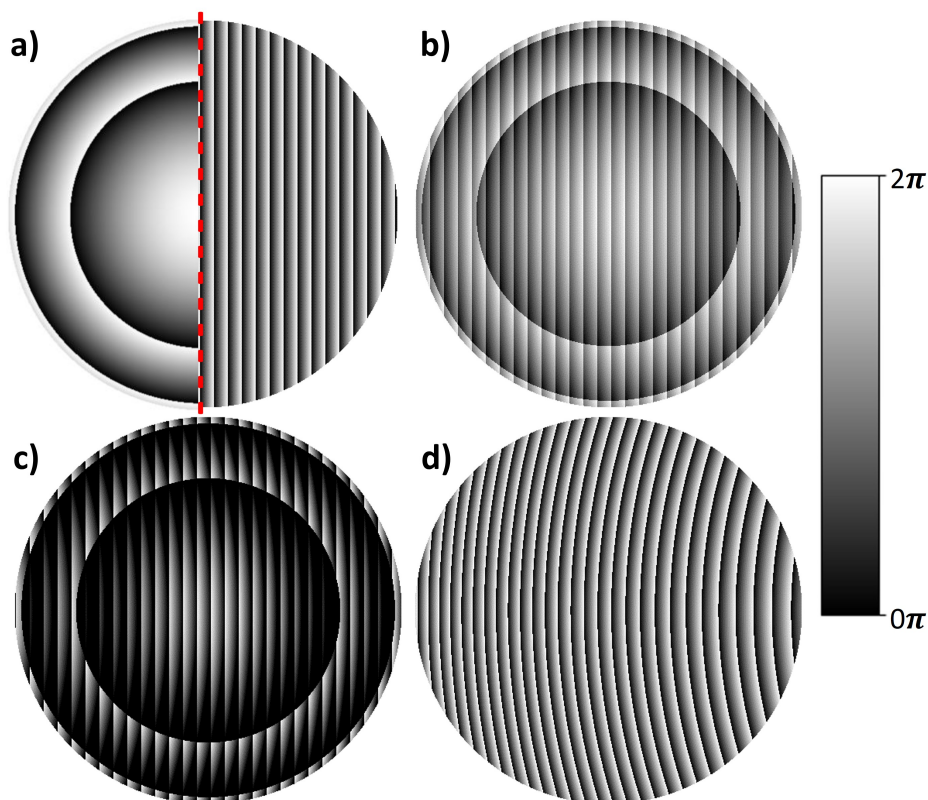
Zaletą tego rozwiązania jest efektywne przekierowanie znacznej części padającego na strukturę promieniowania w plamki ogniskowe, które są rozseparowane przestrzennie w zależności od częstotliwości padającego promieniowania. Wysoką wydajność dyfrakcyjną gwarantuje zastosowanie kodowania fazowego o ciągłej zmianie fazy w obydwu wspomnianych DOE (każdy z nich ma maksymalną teoretyczną wydajność 100% [165]), co pozwala na wykorzystanie całego padającego promieniowania na strukturę i przekierowanie go w zaprojektowany sposób. Inne, podobne rozwiązania oparte na DOE są obciążone większymi stratami sygnału. Na przykład amplitudowe DOE tłumią znaczną część promieniowania wejściowego, czy też rozwiązania uwzględniające fazowe siatki binarne dzielą promieniowanie w kilka rzędów dyfrakcyjnych [143]. Należy wspomnieć, że wydajne dzielenie częstotliwości ma miejsce, gdy przekierowanie promieniowania (a co za tym idzie jego detekcja) odbywa się w pojedynczym rzędzie dyfrakcji.

Każdy z komponentów DOE, z których składają się docelowe struktury SIMO został zaprojektowany w postaci mapy opóźnienia fazowego przedstawionej w symulacjach numerycznych jako szaroodcieniowy rozkład w postaci bitmapy. Wszystkie DOE zostały zaprojektowane dla DWL równego 1,874 mm, co odpowiada częstotliwości 160 GHz. Częstotliwość ta różni się od DWL struktur MISO. Została ona dobrana na podstawie zakresu pracy przestrzajalnego źródła użytego w badaniach eksperymentalnych (szczegółowy opis znajduje się w Podrozdziale 6.2.4). Dzięki temu możliwa była weryfikacja działania struktur SIMO w szerokim zakresie spektralnym. Natomiast do realizacji demultipleksacji w systemie MIMO zaprojektowano osobną strukturę SIMO5 dla częstotliwości 95,75 GHz opisaną w Podrozdziale 6.3.1.

Ogniskowa f kinoformu równa 700 mm i okres siatki dyfrakcyjnej d wynoszący 5,4 mm pozwoliły na separację przestrzenną częstotliwości THz różniących się o 10 GHz, co zostało dokładniej opisane w Podrozdziale 6.2.2 i w Podrozdziale 6.2.5. Mapy bitowe zostały zaprojektowane z próbkowaniem równym $300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$, a następnie na ich podstawie zaprojektowano modele przestrzenne struktur korzystając z klasycznej metody opisanej w Podrozdziale 4.6. Maksymalna wysokość struktur SIMO odpowiadająca zmianie fazy o 2π była równa 3,65 mm. Wysokość ta została określona korzystając z Równania (4.10) i obliczona zgodnie z właściwościami optycznymi materiału COC przedstawionymi w Podrozdziale 5.1. Średnica każdej struktury SIMO miała wartość 150 mm.

Rozkłady fazy czterech struktur SIMO zaprojektowanych jako połączenie dwóch różnych fazowych DOE, soczewek kinoformowych i piłokształtnych siatek dyfrakcyjnych, w różnych konfiguracjach przedstawiono w postaci bitmap w skali szarości na Rysunku 6.11. Rysunki 6.11a do 6.11d odpowiadają odpowiednio strukturom SIMO1 do SIMO4. Każda struktura SIMO została zaprojektowana tak, aby spełniać tę samą, wcześniej opisaną, funkcjonalność, jednak różnica w rozkładzie map opóźnień fazowych elementów obliczonych teoretycznie i możliwości produkcji determinują różnice w wydajności struktur SIMO. W związku z tym do oceny poprawności działania struktur SIMO, jak i weryfikacji ich wydajności konieczne było przeprowadzenie symulacji numerycznych, a co ważniejsze odpowiednio zaprojektowanych badań eksperymentalnych. W symulacjach numerycznych założono, że DOE jest cienkim elementem wprowadzającym określone opóźnienie fazowe w jednej konkretnej płaszczyźnie, podczas gdy w eksperymencie każda struktura ma określoną, rzeczywistą grubość. Odgrywa to znaczącą rolę, zwłaszcza gdy struktury są projektowane jako dwa połączone ze sobą DOE, co miało miejsce w przypadku struktur SIMO. Ponadto w badaniach eksperymentalnych wytwarzane struktury wprowadzają określone tłumienie związane ze współczynnikiem absorpcji materiału, jak i możliwa jest niepożądana dyfrakcja na elementach struktury, takich jak linie i warstwy druku, w szczególności gdy parametry druku przestrzennego są nieodpowiednio dobrane [177]. Należy również wspomnieć, że symulacje numeryczne nie uwzględniały zjawisk takich jak efekt cienia [180], którego wpływ jest zależny od rozkładu przestrzennego struktury.

Strukturę SIMO1 przedstawioną na Rysunku 6.11a uzyskano poprzez połączenie dwóch oddzielnych rozkładów fazowych. Pierwszym komponentem była soczewka kinoformowa o ciągłym rozkładzie fazy zmieniającym się w zakresie od 0 do 2π . Drugim komponentem była piłokształtna siatka dyfrakcyjna o rozkładzie fazy również zmieniającym się od 0 do 2π . Oba komponenty zostały połączone podstawami. Jeden z komponentów został obrócony o 180° względem osi optycznej i w ten sposób oba komponenty zostały połączone płaskimi powierzchniami swoich podłoży. Na Rysunku 6.11a obrót zaznaczono czerwoną przerywaną linią. W związku z tym zaprezentowana jest tylko połowa każdego komponentu. Taka konstrukcja w pełni wykorzystuje funkcjonalności obu komponentów, a co za tym idzie, straty sygnału wynikające z połączenia dwóch komponentów wydają się być zminimalizowane.



Rysunek 6.11: Rozkłady fazy struktur SIMO zaprojektowanych jako połączenie dwóch różnych typów fazowych DOE, soczewki kinoformowej oraz piłokształtnej siatki dyfrakcyjnej, w różnych konfiguracjach. Rozkłady zostały przedstawione jako następujące mapy bitowe w skali szarości: a) struktura SIMO1 - soczewka połączona przez podłoże z siatką odwróconą o 180° względem osi optycznej; obrót zaznaczony czerwoną przerywaną linią; b) struktura SIMO2 - zredukowane wartości macierzy obu rozkładów fazowych DOE, następnie zsumowane do zakresu fazy $0 - 2\pi$; c) struktura SIMO3 – rozkład uzyskany jako różnica rozkładu fazy soczewki oraz rozkładu siatki dyfrakcyjnej z warunkiem odcięcia wartości ujemnych; d) struktura SIMO4 – rozkład fazy soczewki odjęty od rozkładu fazy siatki dyfrakcyjnej z modulacją 2π [140].

Druga struktura, SIMO2, została przedstawiona na Rysunku 6.11b. Tym razem rozkład fazy soczewki kinoformowej został zredukowany do zakresu $0 - \pi$, co odpowiada wartościom pikseli bitmapy w skali szarości w zakresie od 0 do 127. To samo podejście zastosowano do drugiego komponentu, którym była piłokształtna siatka dyfrakcyjna. W kolejnym kroku wartości pikseli obu komponentów zostały zsumowane, tworząc nowy DOE (strukturę SIMO2) z fazą przyjmującą wartości w zakresie od 0 do 2π . Metoda

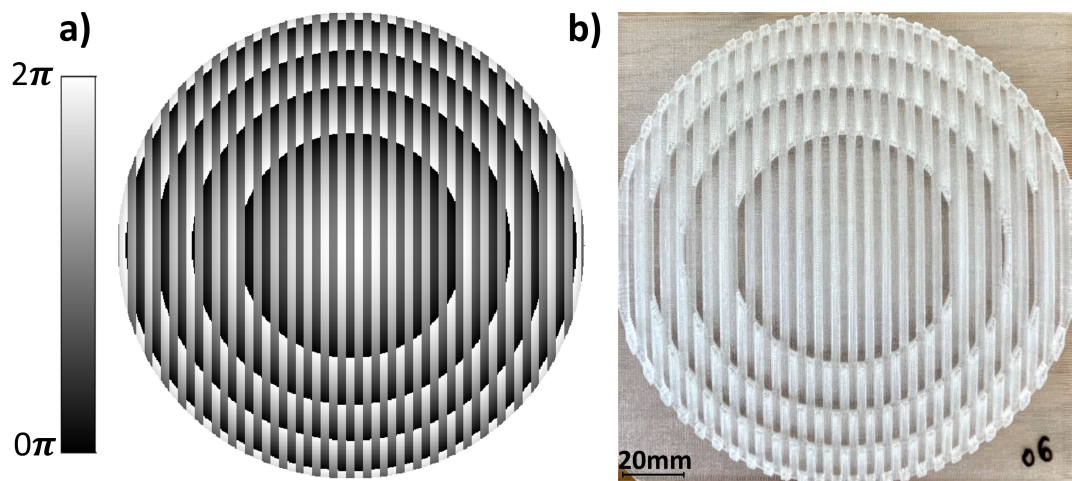
projektowania SIMO2 wprowadza mniejsze tłumienie promieniowania niż opisana wcześniej struktura SIMO1. Wynika to z całkowitej grubości struktury, która w przypadku SIMO1 jest lokalnie nawet dwukrotnie większa niż SIMO2. Ponadto elementy, które są płaskie z jednej strony są bardziej podatne na redukcję efektu cienia [180], który jest niepożądany w działaniu DOE.

Struktura SIMO3 została przedstawiona na Rysunku 6.11c. Została ona uzyskana przez odjęcie rozkładów fazy soczewki kinoformowej i piłokształtnej siatki dyfrakcyjnej. Rozkład fazy każdego z komponentów przyjmował wartości w zakresie od 0 do 2π . Dodatkowo, podczas procesu projektowania zaimplementowano warunek odcięcia ujemnych wartości z rozkładu i nadano im wartość równą 0. Rezultatem tej metody projektowania jest struktura przyjmująca niskie wartości pikseli w znaczącej części mapy fazowej, które są ciemnymi obszarami na bitmapie w skali szarości przedstawionej na Rysunku 6.11c. Te ciemne obszary miały znaczący wpływ na wydajność struktury SIMO3. Część padającego promieniowania na strukturę SIMO3 nie została poprawnie przekierowana w -1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego, natomiast została przepropagowana do 0. rzędu dyfrakcji, co zostało dokładniej opisane w sekcji wyników (Podrozdział 6.2.5). Z drugiej strony zaletami takiego rozwiązania jest niższe tłumienie promieniowania wewnątrz struktury ze względu na mniejszą grubość struktury, a także znacząco niższy czas produkcji struktury oraz koszt związany ze zużyciem materiału.

Rozkład fazy struktury SIMO4 przedstawiono na Rysunku 6.11d. Został on wygenerowany jako wynik różnicy rozkładu fazy soczewki kinoformowej i rozkładu fazy piłokształtnej siatki dyfrakcyjnej. Rozkłady fazy obu komponentów przyjmowały wartości w przedziale od 0 do 2π . W tym podejściu zastosowano modulację fazy 2π . Oznacza to, że strukturę SIMO4 można opisać jako pozaosiowy segment skupiającej soczewki kinoformowej, która przekierowuje padające na nią promieniowanie w pozaosiowe ognisko. Promieniowanie THz ugina się na strukturze pod kątem ugięcia α , zgodnie z Równaniem (4.14).

Dodatkowo zaprojektowano strukturę referencyjną składającą się z dwóch DOE. Pierwszym komponentem była soczewka kinoformowa charakteryzująca się ciągłymi zmianami rozkładu fazy od 0 do 2π . Drugim komponentem była binarna siatka dyfrakcyjna, która wprowadzała skokową zmianę fazy o 0 oraz π . Rozkład fazy siatki binarnej został w pracy opisany Równaniem (4.12) w Podrozdziale 4.3. Struktura referencyjna

została uzyskana jako suma rozkładów faz obu komponentów przy zastosowaniu warunku modulacji fazy 2π . Takie rozwiązanie pozwala strukturze referencyjnej na przekierowanie padającego promieniowania do -1. i 1. rzędu dyfrakcji. Podobne struktury i ich działanie zostały dokładniej opisane w pracy [143]. Struktura referencyjna została użyta do porównania względnej wydajności przekierowanego promieniowania do -1. rzędu dyfrakcji przez struktury SIMO 1-4. Uzyskany rozkład fazy struktury referencyjnej i wytworzonego DOE z materiału COC przedstawiono odpowiednio na Rysunku 6.12a i Rysunku 6.12b.



Rysunek 6.12: Struktura referencyjna zaprojektowana jako połączenie dwóch różnych typów fazowych DOE, soczewki kinoformowej i binarnej siatki dyfrakcyjnej; a) rozkład fazy uzyskany jako suma obu komponentów przy zastosowaniu modulacji fazy 2π ; b) struktura wytworzona przy użyciu druku 3D w technologii FDM z COC [140].

6.2.2 Wyniki symulacji numerycznych

Działanie zaprojektowanych struktur SIMO zostało zweryfikowane przy użyciu symulacji numerycznych korzystając z programu LightSword 6.0 wykorzystującego opis propagacji za pomocą zmodyfikowanej metody splotowej opisanej w Podrozdziale 4.4. Struktury SIMO oraz struktura referencyjna zostały umieszczone prostopadłe do osi optycznej i oświetlone falą płaską. W płaszczyźnie odpowiadającej ogniskowej f znajdującej się 700 mm za każdą strukturą, rozkład natężenia promieniowania THz został odtworzony dla częstotliwości w zakresie od 150 GHz do 220 GHz co 10 GHz.

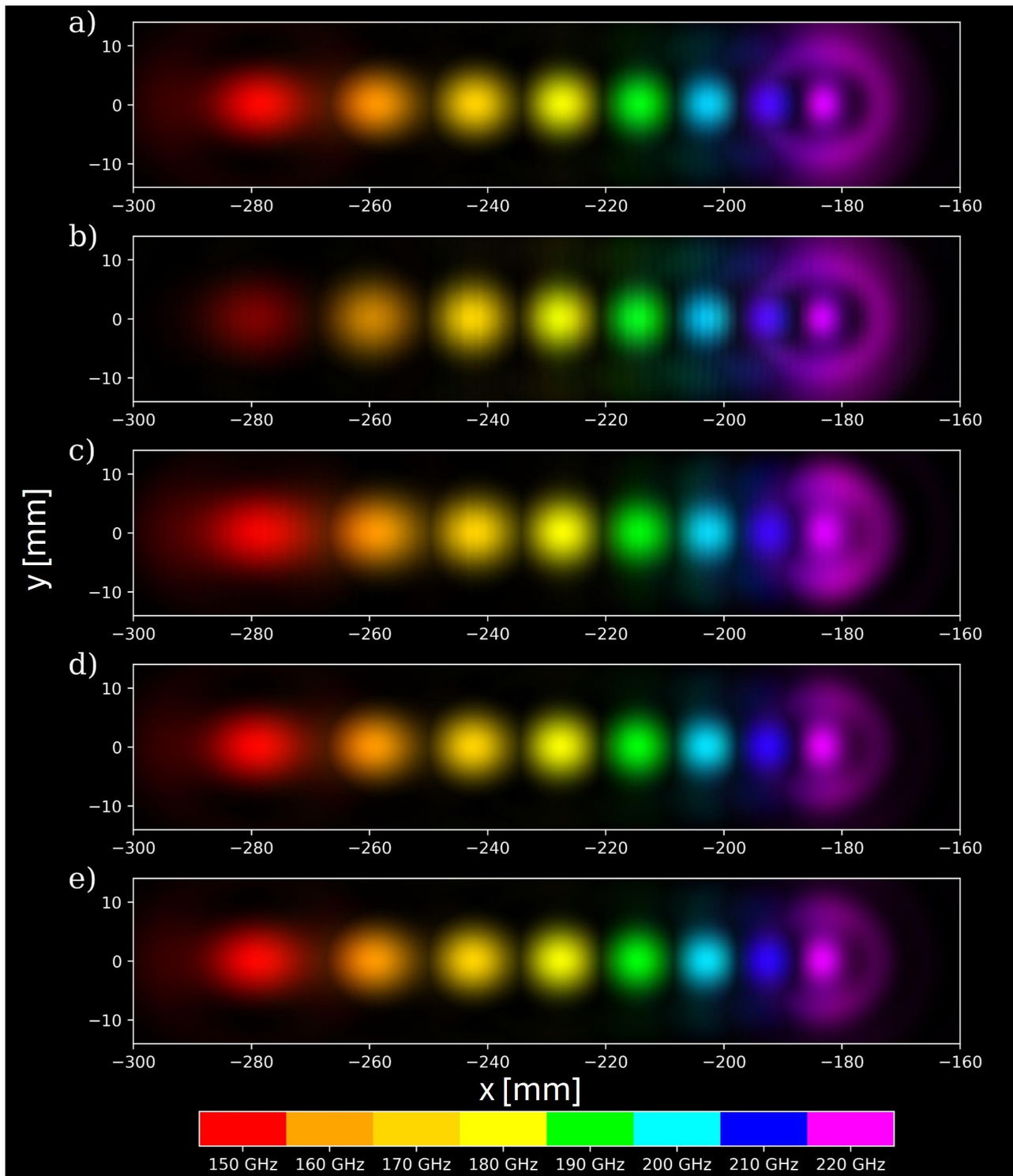
Wyniki uzyskane dla każdej struktury SIMO i struktury referencyjnej dla wspomnianych częstotliwości zostały wspólnie przedstawione na Rysunku 6.13. Przedstawione dane dotyczą obszaru -1. rzędu ugięcia dyfrakcyjnego. Różne kolory na Rysunku 6.13 odpowiadają różnym częstotliwościom zgodnie z legendą.

W Tabeli 6.4 porównano natężenie przekierowanego promieniowania dla każdej z analizowanych częstotliwości w -1. rzędzie ugięcia, przedstawiając wyniki w postaci znormalizowanego maksymalnego natężenia. Normalizacja została przeprowadzona osobno dla każdej z częstotliwości. Dodatkowo w Tabeli 6.5 zaprezentowano względną wydajność struktur SIMO1-4. Względna wydajność η_2 w tej części pracy opisuje stosunek maksymalnej wartości natężenia przekierowanego przez struktury SIMO1-4 I_{SIMO} względem maksymalnej wartości natężenia przekierowanego przez strukturą referencyjną I_{ref} dla -1. rzędu ugięcia dyfrakcyjnego. Tak zdefiniowana względna wydajność pozwala określić, o ile wyższa jest wydajność struktur SIMO względem struktury referencyjnej, i można ją przedstawić przy użyciu Równania (6.2).

$$\eta_2 = \left(\frac{I_{SIMO}}{I_{ref}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (6.2)$$

Tabela 6.4: Wyniki symulacji numerycznych przedstawiają porównanie czterech struktur SIMO oraz struktury referencyjnej. Dane dotyczą znormalizowanego maksymalnego natężenia zarejestrowanego w -1. rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego dla częstotliwości w zakresie od 150 GHz do 220 GHz. Pogrubione wartości wskazują najwyższe natężenie zarejestrowane dla danej częstotliwości.

Znormalizowane maksymalne natężenie					
Częstotliwość	SIMO1	SIMO2	SIMO3	SIMO4	Referencja
150 GHz	1,00	0,23	0,29	0,96	0,48
160 GHz	1,00	0,24	0,33	1,00	0,49
170 GHz	0,97	0,25	0,34	1,00	0,46
180 GHz	0,96	0,27	0,31	1,00	0,45
190 GHz	0,95	0,31	0,39	1,00	0,45
200 GHz	0,97	0,37	0,39	1,00	0,46
210 GHz	1,00	0,43	0,42	0,98	0,45
220 GHz	1,00	0,47	0,40	0,88	0,40



Rysunek 6.13: Wyniki symulacji numerycznych uzyskane dla czterech różnych struktur SIMO i struktury referencyjnej przedstawiające rozkład natężenia promieniowania w -1. rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego za strukturą. Różne kolory na wykresie odpowiadają różnym częstotliwościom promieniowania w zakresie od 150 GHz do 220 GHz co 10 GHz; a) do d) odpowiadają kolejno uzyskanym wynikom dla struktur SIMO1 do SIMO4; e) przedstawia uzyskane wyniki dla struktury referencyjnej (na podstawie źródła [140]).

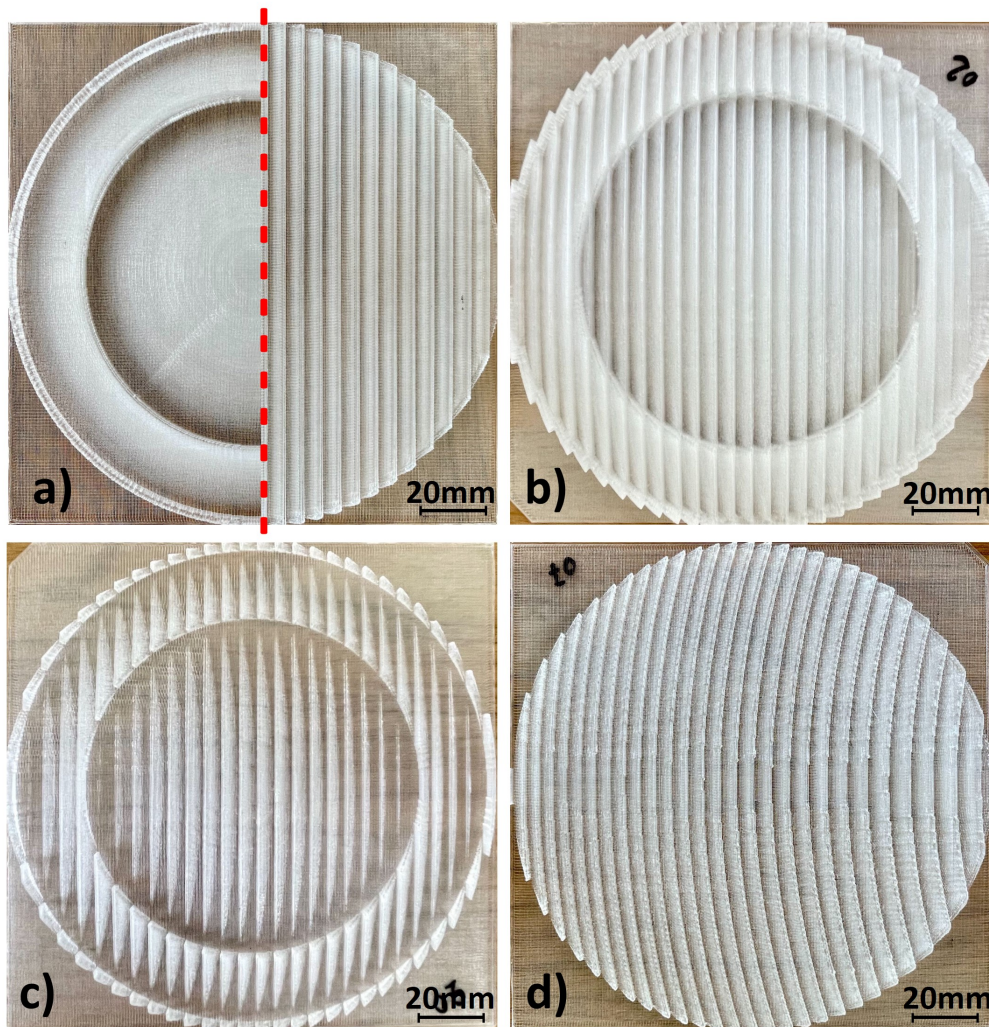
Tabela 6.5: Wyniki symulacji numerycznych przedstawiają porównanie wydajności czterech struktur SIMO względem struktury referencyjnej. Dane dotyczą względnej wydajności w -1. rzędzie dyfrakcji dla częstotliwości w zakresie od 150 GHz do 220 GHz. Pogrubione wartości wskazują najwyższe natężenie zarejestrowane dla danej częstotliwości.

Względna wydajność w -1. rzędzie dyfrakcji				
Częstotliwość	SIMO1	SIMO2	SIMO3	SIMO4
150 GHz	+109%	-52%	-39%	+101%
160 GHz	+103%	-52%	-34%	+103%
170 GHz	+111%	-46%	-25%	+117%
180 GHz	+114%	-39%	-31%	+123%
190 GHz	+110%	-31%	-15%	+121%
200 GHz	+112%	-19%	-14%	+119%
210 GHz	+120%	-5%	-8%	+116%
220 GHz	+152%	19%	0%	+122%
Średnia	+116%	-28%	-21%	+115%

Wyniki symulacji numerycznych wyraźnie wskazują na przestrzenną separację sygnałów w zależności od częstotliwości promieniowania THz. Tak więc, zgodnie z oczekiwaniami, każda z czterech struktur SIMO działa jako przestrzenny demultiplekser częstotliwości na etapie symulacji numerycznych. Podobnie w przypadku struktury referencyjnej stwierdzono prawidłowe działanie DOE. Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 6.4 oraz Tabeli 6.5 można stwierdzić, że struktury SIMO1 i SIMO4 znacząco przewyższają wydajnością strukturę referencyjną. Z kolei struktury SIMO2 i SIMO3 wykazują gorsze działanie w porównaniu do struktury referencyjnej. Należy jednak pamiętać, że są to wyniki symulacji numerycznych. W układzie eksperymentalnym występuje wiele czynników, które mają znaczący wpływ na poprawne działanie struktur, takich jak efekt cienia [180], absorpcja materiałowa, czy różne interferencje wynikające z koherencji źródła THz i działania w polu bliskim. Dlatego, aby określić prawidłowe działanie struktur, konieczne jest przeprowadzenie pomiarów eksperymentalnych w THz układzie optycznym.

6.2.3 Wytwarzanie struktur SIMO

Na podstawie wygenerowanych rozkładów map opóźnień fazowych struktur stworzono modele przestrzenne struktur korzystając z metody klasycznej opisanej w Podrozdziale 4.6. Następnie wydrukowano struktury SIMO korzystając z technologii druku przestrzennego FDM z materiału COC. Współczynnik załamania COC dla DWL odpowiadającej częstotliwości 160 GHz jest w przybliżeniu równy 1,51. Struktury SIMO wytworzono zgodnie z rekomendowanymi parametrami druku dla materiału COC przedstawionymi w Podrozdziale 5.2 i pracy naukowej [177]. Zdjęcia wydrukowanych struktur SIMO przedstawiono na Rysunku 6.14.



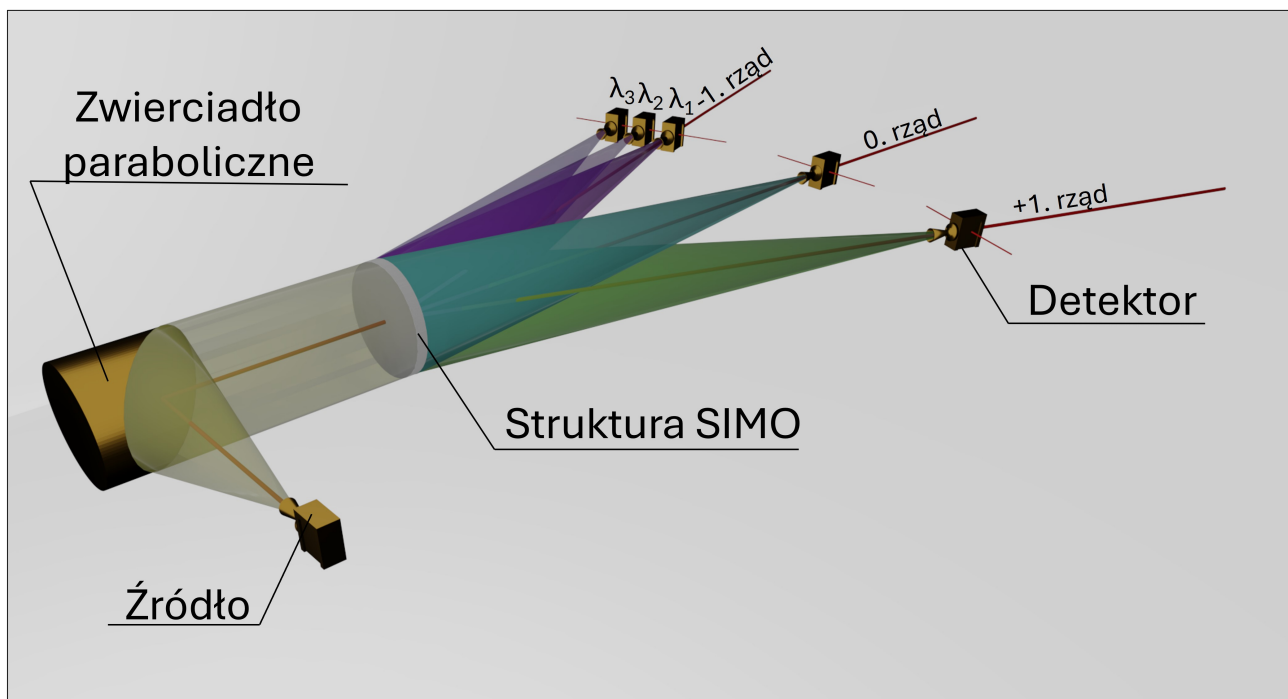
Rysunek 6.14: Zdjęcia wyprodukowanych struktur SIMO korzystając z technologii FDM druku 3D z COC. Notacja a) do d) odpowiada kolejno strukturom SIMO1 do SIMO4 [140].

6.2.4 Eksperymentalny układ pomiarowy

Układ optyczny wykonany eksperymentalnie zawierał: przestrajane źródło promieniowania THz, kolimujące zwierciadło paraboliczne, badaną strukturę i detektor promieniowania THz. Schemat układu został przedstawiony na Rysunku 6.15. Promieniowanie było emitowane ze źródła firmy VDI (*ang. Virginia Diodes Inc.*) opierającego swoje działanie na odpowiedniej konfiguracji diod Schottky’ego będących zwielokrotniaczami częstotliwości podstawowego źródła o bazowej częstotliwości z zakresu od 7 – 12 GHz. Emitowane promieniowanie charakteryzuje się dużym stopniem spójności czasowej i można je rozważać jako praktycznie monochromatyczne. Przestrajanie częstotliwości THz w zadanym zakresie uzyskuje się poprzez regulację oscylatora oraz zmianę częstotliwości bazowej. Dodatkowo, zmiana sekwencji powielaczy umożliwia modyfikację pasma, co pozwala na uzyskanie odpowiedniego zakresu częstotliwości. Następnie wygenerowana wiązka THz oświetlała pozaosiowe zwierciadło paraboliczne znajdujące się w odległości około 620 mm od źródła promieniowania, odpowiadającej jego odległości ogniskowej. W ten sposób gaussowski rozkład wiązki propagował się w postaci quasi-płaskiej fali monochromatycznej w wolnej przestrzeni. Skolimowane promieniowanie THz oświetlało weryfikowaną strukturę SIMO (bądź referencyjną). Struktura ugięła padające promieniowanie w -1. rzędzie dyfrakcji i skupiała je w plamkę ogniskową w określonej odległości, która odpowiadała parametrom użytym na etapie projektowania. Podczas pomiarów eksperymentalnych wykorzystany został detektor (dioda Schottky’ego umieszczona w falowodzie z dołączoną stożkową anteną) o kącie akceptacji 13° odpowiadającym pełnej szerokości wiązki 3 dB. Rysunek 6.15 przedstawia trajektorię propagacji wiązek optycznych, uwzględniając pożądaną -1. rząd ugięcia oraz niepożądane rzędy ugięcia (rząd 0. oraz 1.).

6.2.5 Wyniki pomiarów eksperymentalnych

Działanie wszystkich czterech wytworzonych struktur SIMO przedstawionych na Rysunku 6.14 i referencyjnej struktury SIMO pokazanej na Rysunku 6.12b zostało zweryfikowane w badaniach eksperymentalnych w THz układzie optycznym, którego schemat przedstawiono na Rysunku 6.15. Wykonano skany trzech obszarów odpowiadających -1., 0., 1. rzędowi ugięcia dyfrakcyjnego za strukturami SIMO.



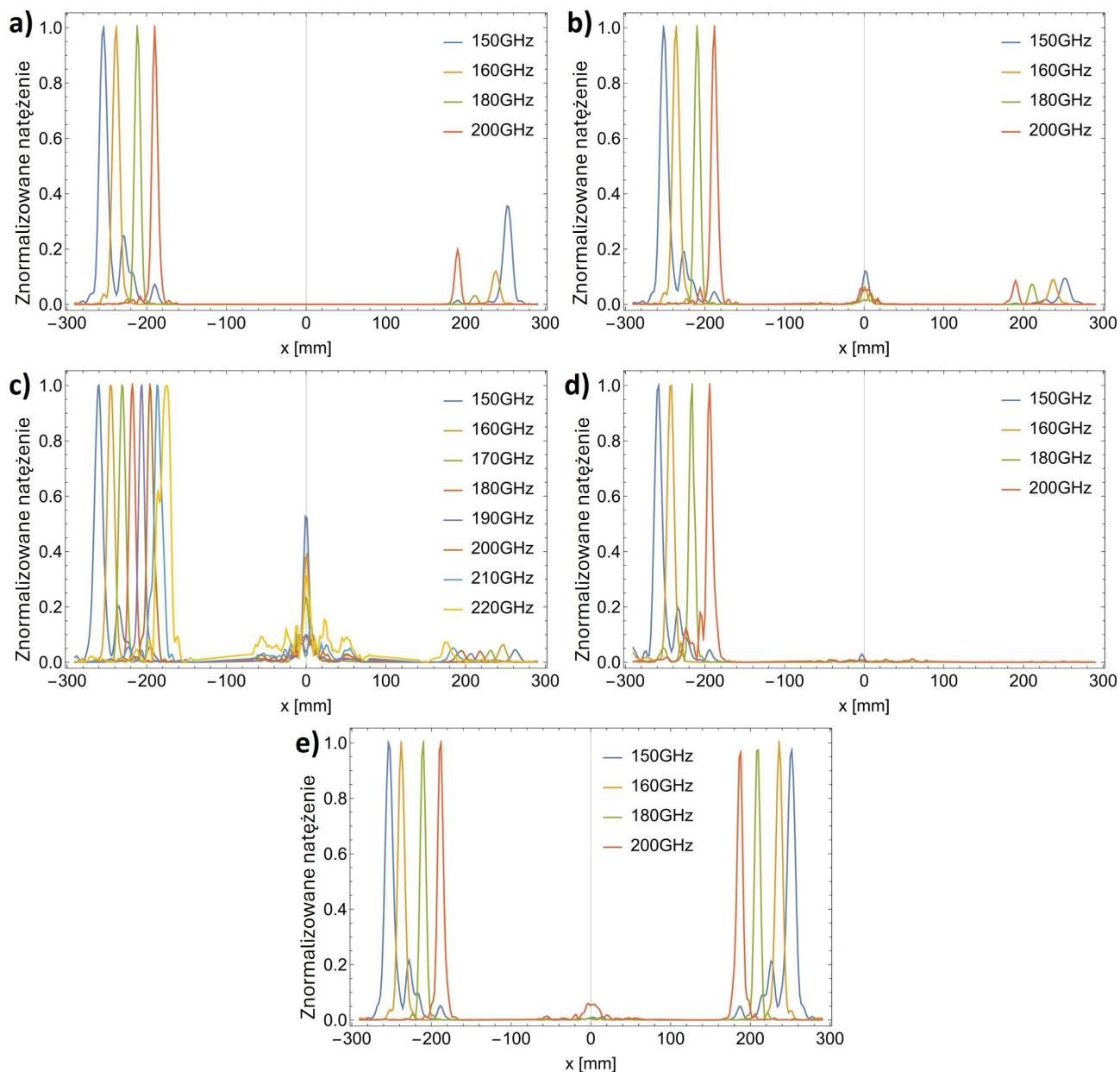
Rysunek 6.15: Schemat układu optycznego do pomiarów eksperymentalnych struktur SIMO pozwalający na pomiar natężenia promieniowania THz w -1., 0. oraz 1. rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego [140].

Zgodnie z założeniami i wynikami symulacji numerycznych, struktury SIMO przekierowały oraz skupiły znaczącą część promieniowania THz w -1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego przy jednoczesnej demultipleksacji przestrzennej częstotliwości. Pomiary 0. i -1. rzędu dyfrakcji umożliwiły określenie względnej wydajności opracowanych struktur. Co więcej, ilość promieniowania ugięta w 1. rząd dyfrakcji określiła stopień asymetrii przekierowania wprowadzony przez struktury SIMO, pokazujący czy struktury działają poprawnie.

Dla 0. rzędu dyfrakcji, skany zostały wykonane prostopadłe do osi optycznej. Jednak dla -1. oraz 1. rzędu dyfrakcji detektor został obrócony w taki sposób, że padające na niego promieniowanie było prostopadłe do badanego obszaru (jak pokazano na Rysunku 6.15). Dzięki temu padające promieniowanie na detektor było prawidłowo zarejestrowane w obrębie kąta akceptacji detektora [179]. Taka procedura jest konieczna, biorąc pod uwagę pomiary wykonywane poza główną osią układu optycznego.

Skany przeprowadzono w płaszczyźnie poziomej przechodzącej przez plamki ogniskowe dla każdego rozważanego rzędu dyfrakcji. Uzyskane przekroje rozkładu natężenia dla różnych częstotliwości przedstawiono na Rysunku 6.16. Dane przedsta-

wione na Rysunku 6.16a-d odpowiadają odpowiednio pomiarom przeprowadzonym dla struktur SIMO1-4. Przedstawione rozkłady natężenia są znormalizowane ze względu na charakterystykę widmową źródła.



Rysunek 6.16: Wyniki eksperymentalne dla czterech struktur SIMO i struktury referencyjnej, przedstawiające rozkład natężenia w poziomym przekroju przez -1., 0. oraz 1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego za strukturami dla różnych częstotliwości z zakresu promieniowania THz; a) do d) odpowiadają kolejno uzyskanym wynikom dla struktur SIMO1 do SIMO4; e) wyniki dla struktury referencyjnej [140].

Dla struktury SIMO3 przeprowadzono szczegółowe pomiary w zakresie częstotliwości od 150 GHz do 220 GHz co 10 GHz. Zaobserwowano przestrzenną separację częstotliwości. Następnie zbadano funkcjonalność pozostałych struktur SIMO oraz struktury referencyjnej dla czterech częstotliwości 150 GHz, 160 GHz, 180 GHz i 200 GHz. Analiza tych czterech częstotliwości pozwala zweryfikować zarówno rozdzielczość spektralną (separacja 150 GHz i 160 GHz jest pokazana dla każdej struktury), jak i działanie struktur w zakresie od 150 GHz do 200 GHz.

Należy podkreślić, że część częstotliwości użytych w pomiarach znacząco odbiega od DWL co wpływa niekorzystnie na działanie struktur. Niemniej jednak osiągnięcie zamierzonej funkcjonalności dla różniących się od siebie częstotliwości jest celem tej części pracy i interesującym tematem do dalszej dyskusji.

Należy zauważyć, że plamka ogniskowa dla częstotliwości 150 GHz jest znacznie przesunięta względem osi optycznej co skutkuje jej poszerzeniem w przypadku każdej struktury SIMO. Ponadto pozycję detektora podczas pomiarów dobrano tak, aby jego kąt odchylenia odpowiadał położeniu ogniska dla środkowej częstotliwości z badanego zakresu, co w tym przypadku oznaczało odchylenie mniejsze niż optymalne dla tego konkretnego pomiaru. W rezultacie wystąpiły pewne zniekształcenia sygnału, które można zaobserwować jako artefakty po prawej stronie piku natężenia odpowiadającemu częstotliwości 150 GHz. Zjawisko to jest widoczne dla każdej z charakterystyk na Rysunku 6.16. Zniekształcenia te są prawdopodobnie wynikiem wewnętrznych odbić w stożkowej antenie, która jest zewnętrznym elementem detektora.

Porównanie działania struktur SIMO1-4 oraz struktury referencyjnej przedstawiono w Tabeli 6.6 i Tabeli 6.7. Dane dotyczą maksymalnych zmierzonych wartości napięcia w obszarach -1., 0. oraz 1. rzędu dyfrakcji. Zarejestrowane na detektorze napięcie jest wprost proporcjonalne do natężenia promieniowania THz. Tabela 6.6 przedstawia dane dla częstotliwości 150 GHz i 160 GHz, natomiast Tabela 6.7 odnosi się do częstotliwości 180 GHz i 200 GHz. Pierwszy rząd ugięcia dyfrakcyjnego struktury referencyjnej nie jest dalej omawiany, ponieważ nie znajduje się w obszarze zainteresowania tego badania. Należy podkreślić, że DOE zawierający binarny komponent siatki dyfrakcyjnej przekierowuje promieniowanie symetrycznie do -1. oraz 1. rzędu dyfrakcji, co zostało dokładniej opisane w pracy [143]. Dodatkowo, w Tabeli 6.8 przedstawiono względną wydajność struktur SIMO1-4. Względna wydajność w tej części pracy została określona w taki sam sposób,

jak w symulacjach numerycznych dotyczących struktur SIMO, zgodnie z Równaniem (6.2).

Tabela 6.6: Porównanie wyników eksperymentalnych dla czterech różnych struktur SIMO oraz struktury referencyjnej. Dane przedstawiają maksymalne wartości zmierzonego napięcia w -1., 0. oraz 1. rzędzie dyfrakcji dla częstotliwości 150 GHz i 160 GHz. Zmierzone wartości są proporcjonalne do natężenia promieniowania.

	Zmierzone napięcie [mV]					
Częstotliwość	150 GHz			160 GHz		
Rząd dyfrakcji	-1.	0.	1.	-1.	0.	1.
SIMO1	0,85	-	0,30	3,67	-	0,44
SIMO2	0,94	0,11	0,09	3,26	0,21	0,29
SIMO3	0,72	0,38	0,03	1,74	0,68	0,11
SIMO4	1,06	0,03	0,00	3,50	0,03	0,01
Referencja	0,64	0,01	0,63	2,37	0,01	2,37

Tabela 6.7: Porównanie wyników eksperymentalnych dla czterech różnych struktur SIMO oraz struktury referencyjnej. Dane przedstawiają maksymalne wartości zmierzonego napięcia w -1., 0. oraz 1. rzędzie dyfrakcji dla częstotliwości 180 GHz i 200 GHz. Zmierzone wartości są proporcjonalne do natężenia promieniowania.

Częstotliwość	Zmierzone napięcie [mV]					
	180 GHz			200 GHz		
	Rząd dyfrakcji	-1.	0.	1.	-1.	0.
SIMO1	10,39	-	0,33	5,16	-	1,02
SIMO2	7,63	0,31	0,56	3,57	0,21	0,31
SIMO3	5,46	0,54	0,22	3,04	0,27	0,13
SIMO4	8,42	0,03	0,01	3,83	0,05	0,01
Referencja	5,76	0,04	5,61	2,78	0,17	2,68

Analizując dane przedstawione w Tabeli 6.8, można stwierdzić, że wydajności struktur SIMO1, SIMO2 i SIMO4 są znacznie wyższe niż struktury referencyjnej SIMO (dla struktury referencyjnej względna wydajność przyjmuje wartość 0%, ponieważ względem niej następuje porównanie).

Tabela 6.8: Względna wydajność struktur SIMO. Przedstawione dane dotyczą -1. rzędu dyfrakcji dla częstotliwości 150 GHz, 160 GHz, 180 GHz i 200 GHz. Pogrubiono wyniki, dla których uzyskano najwyższą względną wydajność.

Częstotliwość	150 GHz	160 GHz	180 GHz	200 GHz	Średnia
SIMO1	+32%	+55%	+81%	+86%	+63%
SIMO2	+46%	+38%	+33%	+28%	+36%
SIMO3	+13%	-26%	-5%	+10%	-2%
SIMO4	+64%	+48%	+46%	+38%	+49%

Wyniki eksperymentalne uzyskane dla struktury SIMO1 przedstawione zostały na Rysunku 6.16a. Struktura przekierowała znaczącą część promieniowania w -1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego. Wszystkie badane częstotliwości zostały przestrzennie rozseparowane, co można zaobserwować w postaci przestrzennie rozdzielonych pików natężenia w lewej części Rysunku 6.16a. Gdy częstotliwości zaczynają odbiegać od DWL, można zaobserwować pojawiające się artefakty w pobliżu głównego pików sygnału dla analizowanej częstotliwości. Zjawisko to jest szczególnie widoczne dla długości fal dłuższych niż DWL. Wynika to z faktu, że gdy struktura jest oświetlana zbyt długą falą, DOE nie wprowadza odpowiedniego opóźnienia fazowego. Ponadto ognisko, które powstaje za strukturą, jest znacznie rozciągnięte przestrzennie, a jego położenie jest znacząco przesunięte względem osi optycznej, co utrudnia prawidłową detekcję. Dla wyższych częstotliwości od DWL zniekształcenia były mniejsze. Można również zauważyć, że natężenie niepoprawnie przekierowanego promieniowania w 1. rzędzie dyfrakcji jest najwyższe dla częstotliwości 150 GHz i 200 GHz. Dla częstotliwości bliższych DWL efekt ten nie jest znacząco istotny. 0. rząd dyfrakcji dla struktury SIMO1 nie został odpowiednio zmierzony, dlatego też dane nie zostały uwzględnione w tej analizie. Jednak podczas pomiarów w 0. rzędzie ugięcia nie zaobserwowano wyraźnego sygnału poza szumem widmowym. Zgodnie z danymi przedstawionymi w Tabeli 6.6 i Tabeli 6.7, spośród analizowanych struktur, struktura SIMO1 przekierowała najwyższe natężenie w -1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego dla częstotliwości 160 GHz, 180 GHz i 200 GHz. Ponadto, jak widać w Tabeli 6.8, względna wydajność struktury SIMO1 jest o 86% wyższa dla częstotliwości 200 GHz w porównaniu ze strukturą referencyjną. Ponadto, w przypadku struktury SIMO1, średnia wartość natężenia promieniowania THz (dotycząca pomiarów

w zakresie częstotliwości od 150 GHz do 200 GHz) ugięta do -1. rzędu dyfrakcji jest o 63% wyższa w porównaniu ze strukturą referencyjną.

Rysunek 6.16b przedstawia wyniki eksperymentalne dla struktury SIMO2. Wszystkie cztery badane częstotliwości (150 GHz, 160 GHz, 180 GHz i 200 GHz) zostały przestrzennie rozseparowane w -1. rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego. W przypadku struktury SIMO2 niepożądane artefakty w -1. rzędzie dyfrakcji były mniej znaczące niż w przypadku struktury SIMO1. Jednocześnie mniejsza część promieniowania została przekierowana do 1. rzędu ugięcia dyfrakcyjnego, gdzie poziom znormalizowanego sygnału dla wszystkich badanych częstotliwości był podobny. Nieznaczna część promieniowania została przekierowana do 0. rzędu ugięcia, gdzie najwyższa wartość została zaobserwowana dla częstotliwości 150 GHz. Niemniej jednak, zgodnie z danymi przedstawionymi w Tabeli 6.6, Tabeli 6.7 oraz Tabeli 6.8, struktura SIMO2 przekierowywała mniejszą część sygnału THz do -1. rzędu ugięcia dyfrakcyjnego w porównaniu ze strukturami SIMO1 i SIMO4. Odnosi się to do wszystkich częstotliwości z wyjątkiem 150 GHz, dla której struktura SIMO2 wykazała lepsze działanie niż struktury SIMO1 i SIMO3, zarazem przekierowując o 46% więcej sygnału do -1. rzędu dyfrakcyjnego od struktury referencyjnej. Biorąc pod uwagę wszystkie cztery częstotliwości, względna wydajność struktury SIMO2 była o 36% wyższa niż struktury referencyjnej.

Wyniki eksperymentalne uzyskane dla struktury SIMO3 przedstawiono na Rysunku 6.16c. Pomiar dla struktury SIMO3 zostały wykonane przy użyciu ośmiu częstotliwości w zakresie od 150 GHz do 220 GHz co 10 GHz. Wszystkie osiem częstotliwości zostało poprawnie przekierowanych i skupionych w -1. rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego. Sygnał o różnych częstotliwościach zostały rozdzielony przestrzennie, co zostało zilustrowane w lewej części Rysunku 6.16c jako przesunięte piki wzdłuż osi x , gdzie różne częstotliwości są reprezentowane przez różne kolory zgodnie z przedstawioną legendą. W przypadku, gdy częstotliwość odtwarzająca znacząco odbiegała od częstotliwości odpowiadającej DWL, piki zaczynały się na siebie nakładać, co można zauważyć na wykresach przedstawionych dla wyższych częstotliwości, takich jak 200 GHz, 210 GHz i 220 GHz. Przekrywanie się pików nie występuje powyżej 70% ich maksymalnej wartości. W ten sposób wszystkie osiem różnych częstotliwości zostało wyraźnie rozseparowanych, a co za tym idzie udowodniono możliwość przestrzennej demultipleksacji promieniowania THz w dziedzinie częstotliwości przez zaprezentowane struktury SIMO.

Należy jednak podkreślić, że pełna separacja częstotliwości, do zastosowań aplikacyjnych została uzyskana w zakresie od 150 GHz do 210 GHz, co 10 GHz.

Analizując dane przedstawione w Tabeli 6.6, Tabeli 6.7 oraz Tabeli 6.8, można stwierdzić, że w przypadku struktury SIMO3 nieznaczna część promieniowania została przekierowana do 1. rzędu dyfrakcji. Zauważono, że znaczna część promieniowania została ugięta w 0. rząd ugięcia dyfrakcyjnego. Jest to wynik metody projektowania struktury SIMO3. Z powodu warunku odcięcia wartości ujemnych na etapie projektowania, wyprodukowana struktura SIMO3 zawiera płaskie obszary nie wprowadzające odpowiedniej modulacji fazy padającego na nią promieniowania. W rezultacie większa część promieniowania, w porównaniu do pozostałych struktur SIMO, została przekierowana do 0. rzędu dyfrakcji. Jednakże natężenie zmierzone dla najwyższego piku w 0. rzędzie dyfrakcyjnym nadal nie przekraczało 53% wartości odpowiadającej mu wartości w -1. rzędzie dyfrakcji. Należy wspomnieć, że największy wpływ 0. rzędu ugięcia zaobserwowano dla częstotliwości 150 GHz oraz 220 GHz, przy czym częstotliwość 220 GHz znacznie odbiega od DWL. Biorąc pod uwagę dane przedstawione w Tabeli 6.8, wydajność struktury SIMO3 jest najgorsza z weryfikowanych eksperymentalnie struktur SIMO1-4, ale nadal jej wartość jest podobna do struktury referencyjnej. Osiągnięciem przedstawionym w tej części pracy jest przestrzenna separacja ośmiu różnych częstotliwości w zakresie od 150 GHz do 220 GHz co 10 GHz przy użyciu pojedynczego DOE. Należy podkreślić, że już struktura SIMO3 była w stanie zapewnić poprawną separację przestrzenną danych częstotliwości, a co więcej, warto zauważyć, że pozostałe struktury działały lepiej pod względem wydajności. Innym ważnym aspektem jest to, że podejście zastosowane w przypadku struktury SIMO3 wymaga znacznie mniejszego zużycia materiału w procesie produkcyjnym co może być korzystnym rozwiązaniem w niektórych przypadkach.

Wyniki eksperymentalne dla struktury SIMO4 pokazano na Rysunku 6.16d, a maksymalne zarejestrowane wartości natężenia sygnałów w Tabeli 6.6 i Tabeli 6.7. Należy zauważyć, że dla analizowanej struktury SIMO4 nie zaobserwowano znaczących wartości natężenia promieniowania THz, które zostało przekierowane do 0. oraz 1. rzędu dyfrakcyjnego. Jednak nieoczekiwanie, w -1. rzędzie dyfrakcji, dla dwóch częstotliwości (150 GHz i 200 GHz) pojawiły się niepożądane artefakty (piki boczne) w zarejestrowanym sygnale, których nie zaobserwowano dla częstotliwości 200 GHz dla

innych badanych struktur SIMO. Analizując Tabelę 6.8, można zauważyć, że pomimo artefaktów, struktura SIMO4 przekierowała najwyższą wartość natężenia do -1. rzędu dyfrakcyjnego dla częstotliwości 150 GHz, która jest o 64% wyższa w porównaniu ze strukturą referencyjną. Biorąc pod uwagę wszystkie cztery badane częstotliwości w -1. rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego średnia wydajność struktury SIMO4 jest o 49% wyższa niż wydajność struktury referencyjnej.

Podsumowując tę część wykonanych badań, pokazano cztery różne metody projektowania, wyniki symulacji numerycznych, metodę produkcji, jak i wyniki pomiarów eksperymentalnych przeprowadzonych w THz układzie optycznym dla czterech różnych struktur SIMO. Otrzymane wyniki porównano ze strukturą referencyjną, której parametry optyczne odpowiadały zaprojektowanym strukturom SIMO. Przedstawione wyniki wykazują możliwość demultipleksacji przestrzennej promieniowania w dziedzinie częstotliwości przez wszystkie zaprezentowane struktury SIMO. Struktury SIMO1 oraz SIMO4 są rekomendowane do przedstawionego zastosowania aplikacyjnego w telekomunikacji THz ze względu na wyższą względną wydajność dla zadanej funkcjonalności.

6.3 System MIMO

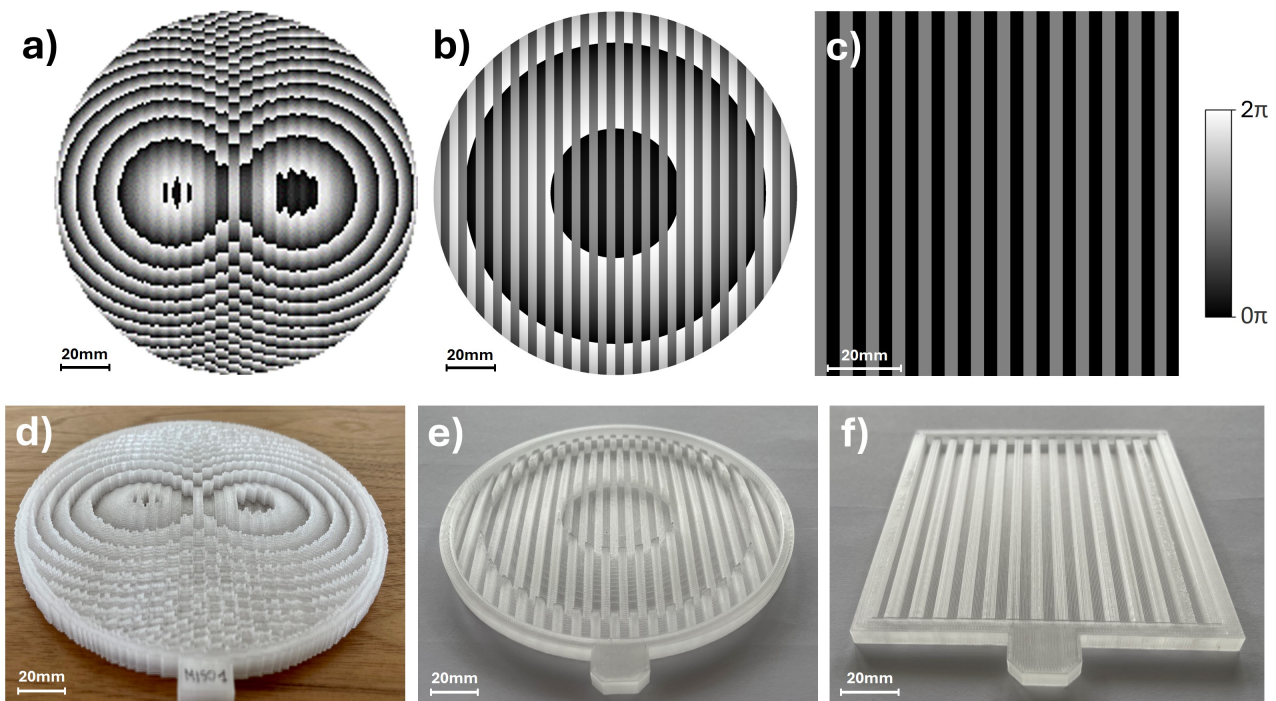
Koncepcja struktur MISO i SIMO opisanych w Podrozdziale 6.1 oraz Podrozdziale 6.2 została wykorzystana do zbudowania dwukanałowego układu optycznego typu MIMO. Zadaniem systemu MIMO była multipleksacja przestrzenna promieniowania THz wygenerowanego z dwóch źródeł (95,3 GHz oraz 96,2 GHz), aby propagowały się wspólnym torem optycznym w wolnej przestrzeni, a następnie rozdzielenie (demultipleksacja) przestrzenne wiązek THz umożliwiające równoczesną detekcję obu sygnałów. W niniejszym podrozdziale została przedstawiona metoda zaprojektowania i wytwarzania DOE użytych do budowy systemu typu MIMO, opisany został zbudowany układ optyczny oraz uzyskane wyniki eksperymentalne [182–184].

6.3.1 Zaprojektowanie i wytworzenie DOE do systemu MIMO

Do stworzenia systemu typu MIMO użyto trzech DOE. Pierwszym elementem, którego zadaniem była multipleksacja promieniowania THz w pojedynczy tor optyczny, była struktura MISO3 szczegółowo opisana w Podrozdziale 6.1. Została ona wybrana ze względu na najwyższą wydajność spośród badanych struktur przeznaczonych do multipleksacji promieniowania THz oraz najniższy poziom szumu zaobserwowany w pobliżu ogniska w pomiarach eksperymentalnych.

Do rozdzielenia przestrzennego promieniowania THz użyto dwóch DOE. Zastosowanie dwóch elementów jest kluczowe, aby możliwa była separacja spektralnie bliskich częstotliwości, które były użyte w tym układzie (95,3 GHz oraz 96,2 GHz). Drugim z trzech elementów była struktura SIMO5, która została zaprojektowana jako połączenie dwóch komponentów – skupiającej soczewki kinoformowej oraz fazowej siatki binarnej. Rozkład fazy soczewki został opisany w pracy Równaniem (4.11), natomiast siatki Równaniem (4.12). Zdecydowano się na użycie komponentu siatki binarnej ze względu na wysoką precyzję wytwarzania tego typu DOE. Należy jednak podkreślić, że w przyszłości komponent siatki binarnej może zostać zastąpiony siatką pilokształtną zdecydowanie zwiększając wydajność dyfrakcyjną struktury. W celu odpowiedniego uformowania promieniowania przez strukturę SIMO5 rozkłady fazy obu wspomnianych komponentów (soczewki i siatki dyfrakcyjnej) zostały zsumowane z zastosowaniem łącznej modulacji 2π . Struktura SIMO5 została zaprojektowana dla częstotliwości 95,75 GHz, która odpowiadała DWL równej 3,131 mm. Ogniskowa struktury f była równa 500 mm, średnica – 100 mm, a stała siatki Λ to 7.2 mm. W przypadku separacji częstotliwości 95,3 GHz oraz 96,2 GHz przy użyciu pojedynczego DOE stała siatki musiałaby mieć rozmiar subfalowy, co wykluczało poprawne działanie tego typu struktury, dlatego też konieczne było użycie trzeciej struktury. Była to fazowa binarna siatka dyfrakcyjna, która również użyta była do demultipleksacji promieniowania THz. Zgodnie z Równaniem (4.14) kąt ugięcia promieniowania na siatce dyfrakcyjnej jest zależny od długości fali (częstotliwości), która oświetla siatkę, więc zastosowanie dodatkowej siatki binarnej w układzie pozwala na wymuszenie większej separacji wiązek. Została ona zaprojektowana z parametrem stałej siatki Λ równym 7,2 mm, dla DWL równej 3,123 mm (96 THz). Długość każdego z boków struktury była równa 150 mm.

Stworzono modele przestrzenne binarnej siatki dyfrakcyjnej oraz struktury SIMO5 korzystając z klasycznej metody opisanej w Podrozdziale 4.6. Następnie wydrukowano obie struktury przy użyciu druku przestrzennego w technologii FDM z materiału COC (oznaczonego P54 w Tabeli A2). Współczynnik załamania dla DWL materiału COC był równy 1.512, co pozwoliło na poprawne wyznaczenie odpowiedniej wysokości maksymalnej struktur. Na Rysunku 6.17a-c przedstawiono zaprojektowane mapy bitowe ilustrujące mapy opóźnienia fazowego wprowadzanego przez odpowiednie elementy oraz na Rysunku 6.17d-e przedstawiono zdjęcia wydrukowanych struktur MISO3, SIMO5 i siatki dyfrakcyjnej.



Rysunek 6.17: Struktura MISO3, SIMO5 oraz siatka dyfrakcyjna użyte do zbudowania systemu typu MIMO; a) do c) odpowiada kolejno mapom opóźnienia fazowego zaprojektowanych struktur; d) do e) przedstawia kolejno zdjęcia wydrukowanych struktur.

6.3.2 Układ eksperymentalny MIMO

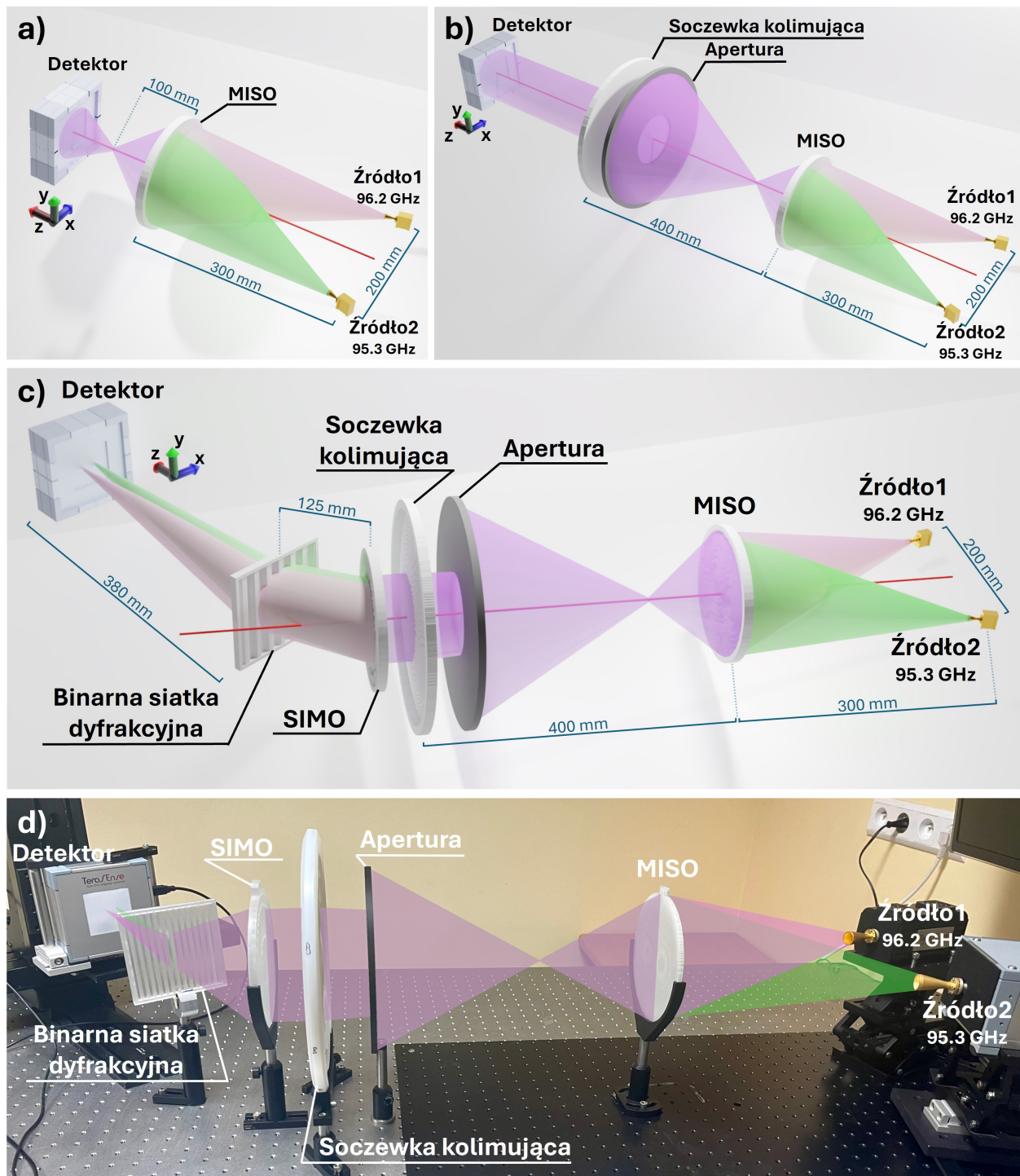
Na Rysunku 6.18a przedstawiono schemat układu do pomiaru rozkładu natężenia za strukturą MISO3. Na Rysunku 6.18b przedstawiono schemat układu do pomiaru rozkładu natężenia sygnałów propagowanych wspólnym torem optycznym w wolnej przestrzeni. Na Rysunku 6.18c przedstawiono schemat systemu MIMO, natomiast na

Rysunku 6.18d pokazano zdjęcie zbudowanego układu eksperymentalnego z oznaczoną kolorami trajektorią propagacji wiązek promieniowania THz.

W układzie MIMO użyto tych samych dwóch źródeł, które opisane były w Podrozdziale 6.1.4 i oświetlały one strukturę MISO3, która połączyła obie wiązki we wspólny tor optyczny oraz skupiła je w ognisku w przybliżonej odległości 100 mm za strukturą. W przybliżonej odległości 300 mm za ogniskiem umieszczono soczewkę kolimującą, a przed nią aperturę ograniczającą wiązkę. Soczewka skupiająca o średnicy 300 mm i ogniskowej 300 mm wytworzona została z HDPE metodą toczenia oraz szczegółowo opisana w pracy [185]. Wstawiając soczewkę w odległości ogniskowej od ogniska uzyskano za nią falę quasi-płaską. Apertura umieszczona przed soczewką kolimującą posiadała średnicę 100 mm. Apertura została wydrukowana przy użyciu druku 3D w technologii FDM z kompozytu PETG z dodatkiem włókna węglowego (materiał P58 w Tabeli A2). Jest to materiał o bardzo wysokim współczynniku absorpcji, dlatego apertura pełniła dwa zadania; ograniczała rozmiar frontu falowego obu wiązek oraz chroniła pozostałą część układu optycznego przed niechcianym promieniowaniem THz powstałym m.in. wyniku pasożytniczych interferencji w układzie.

Za soczewką kolimującą obie wiązki propagowały się wspólnym torem optycznym w wolnej przestrzeni w postaci fali quasi-płaskiej. Następnie w układzie umieszczono strukturę SIMO5, która skupiła i wstępnie rozdzieliła obie wiązki. Promieniowanie zostało ugięte pod kątem równym w przybliżeniu 26° . W odległości 125 mm umieszczono binarną siatkę dyfrakcyjną obróconą pod kątem 26° do płaszczyzny padającego na nie promieniowania, żeby wzmocnić separację wiązek [186]. W przybliżonej odległości 380 mm za siatką zaobserwowano rozseparowane przestrzenie ogniska pod kątem ok. 52° do głównej osi optycznej układu. Do rejestracji obu sygnałów pola wyjściowego użyto kamery firmy TeraSense. Jest to detektor o czułości w temperaturze pokojowej sięgającej wartości 50 kV/W i mocy równoważnej szumowi $1 \text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$ w zakresie częstotliwości 10 GHz – 1 THz. Obszar zbierania danych przez detektor odpowiada macierzy 32 x 32 piksele o rozmiarze każdego z pikseli równym 1,5 mm. Detektor został zamontowany na zmotoryzowanych stolikach XYZ, co umożliwiło skanowanie przestrzenne płaszczyzny wyjściowej zbudowanego układu poprzez zmianę położenia w trzech wymiarach.

Budując układ MIMO struktura MISO3 oraz źródła promieniowania zostały ustawione w ten sposób, aby otrzymać maksymalnie jednorodne oświetlenie soczewki

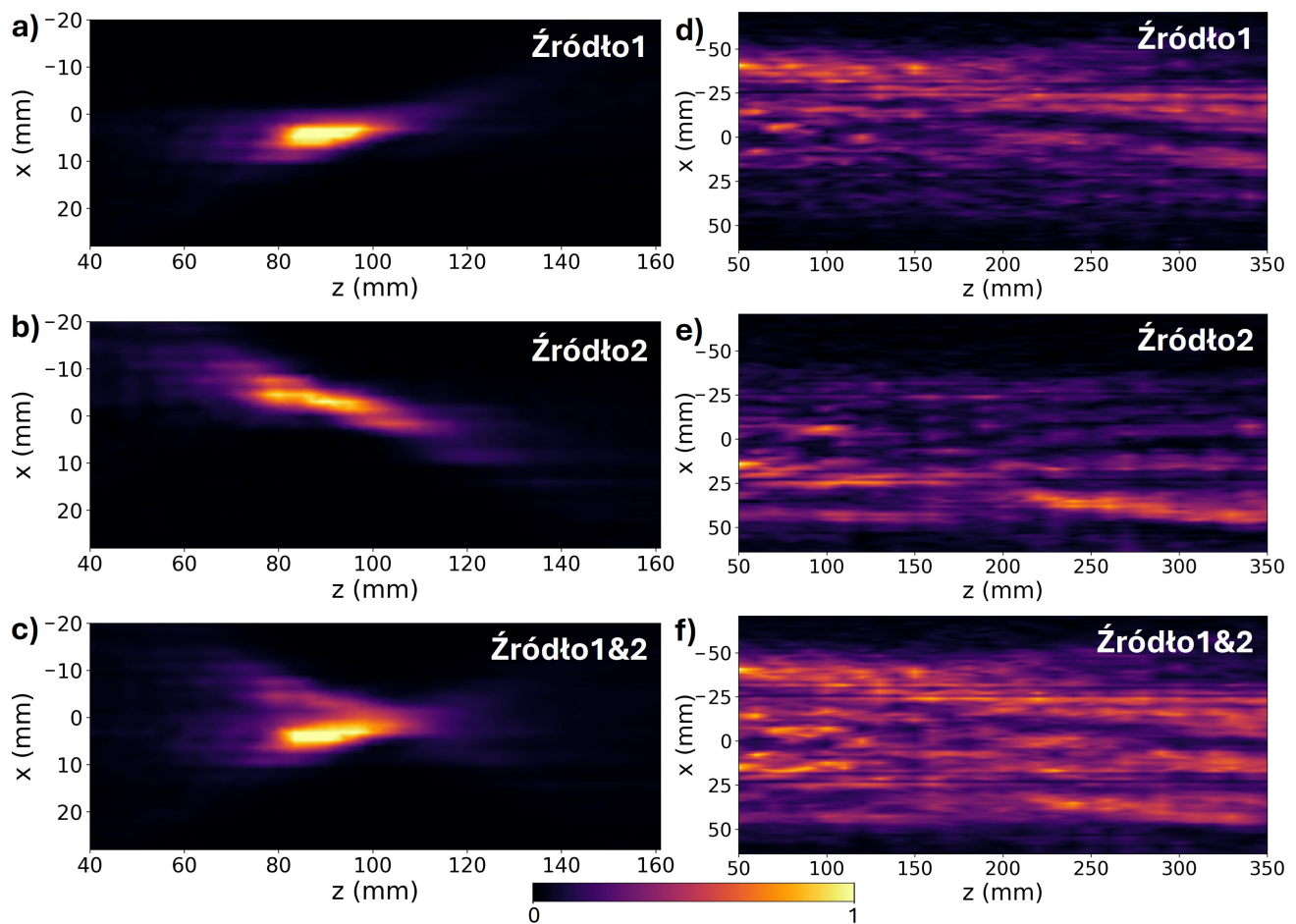


Rysunek 6.18: a) Schemat układu do pomiaru rozkładu natężenia za strukturą MISO3; b) schemat układu do pomiaru rozkładu natężenia sygnałów propagowanych w wolnej przestrzeni w pojedynczym kanale optycznym; c) schemat układu systemu MIMO; d) zdjęcie zbudowanego układu eksperymentalnego z oznaczoną kolorami trajektorią propagacji wiązek THz.

kolimującej. Rozkłady natężenia w układzie MIMO są bardzo czułe na niewielkie zmiany położenia źródeł. Wynika to między innymi z faktu, że pomiary były robione w strefie bliskiej (strefie Fresnela), a użyte źródła charakteryzują bardzo dużą drogą spójności (szacowaną nawet na kilkadziesiąt metrów). Skutkowało to licznymi interferencjami w układzie, które z niewielką zmianą położenia źródeł zmieniały swój rozkład przestrzenny. Po precyzyjnym ustawieniu wspomnianych elementów układu wykonano skany podłużne xz rozkładu natężenia za strukturą MISO3, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 6.18a. Następnie wprowadzono do układu aperturę i soczewkę kolimującą oraz wykonano skany podłużne xz rozkładu natężenia wiązek połączonych we wspólny tor optyczny propagujący się w podstacji fali quasi-płaskiej w wolnej przestrzeni (zgodnie ze schematem pokazanym na Rysunku 6.18b). Uzyskane rozkłady za strukturą MISO3 w okolicach plamki ogniskowej przy włączonym każdym ze źródeł osobno oraz dwoma źródłami włączonymi jednocześnie przedstawiono na Rysunku 6.19a-c, natomiast rozkłady za soczewką kolimującą na Rysunku 6.19d-f. W tym podrozdziale wszystkie dane przedstawione na wykresach poddano normalizacji i interpolacji liniowej. Normalizacja pozwala na przedstawienie danych w porównywalnych zakresach barwnych, a interpolacja umożliwia wypełnienie braków między punktami pomiarowymi, co sprawia, że wizualnie łatwiej jest porównać zarejestrowane obrazy.

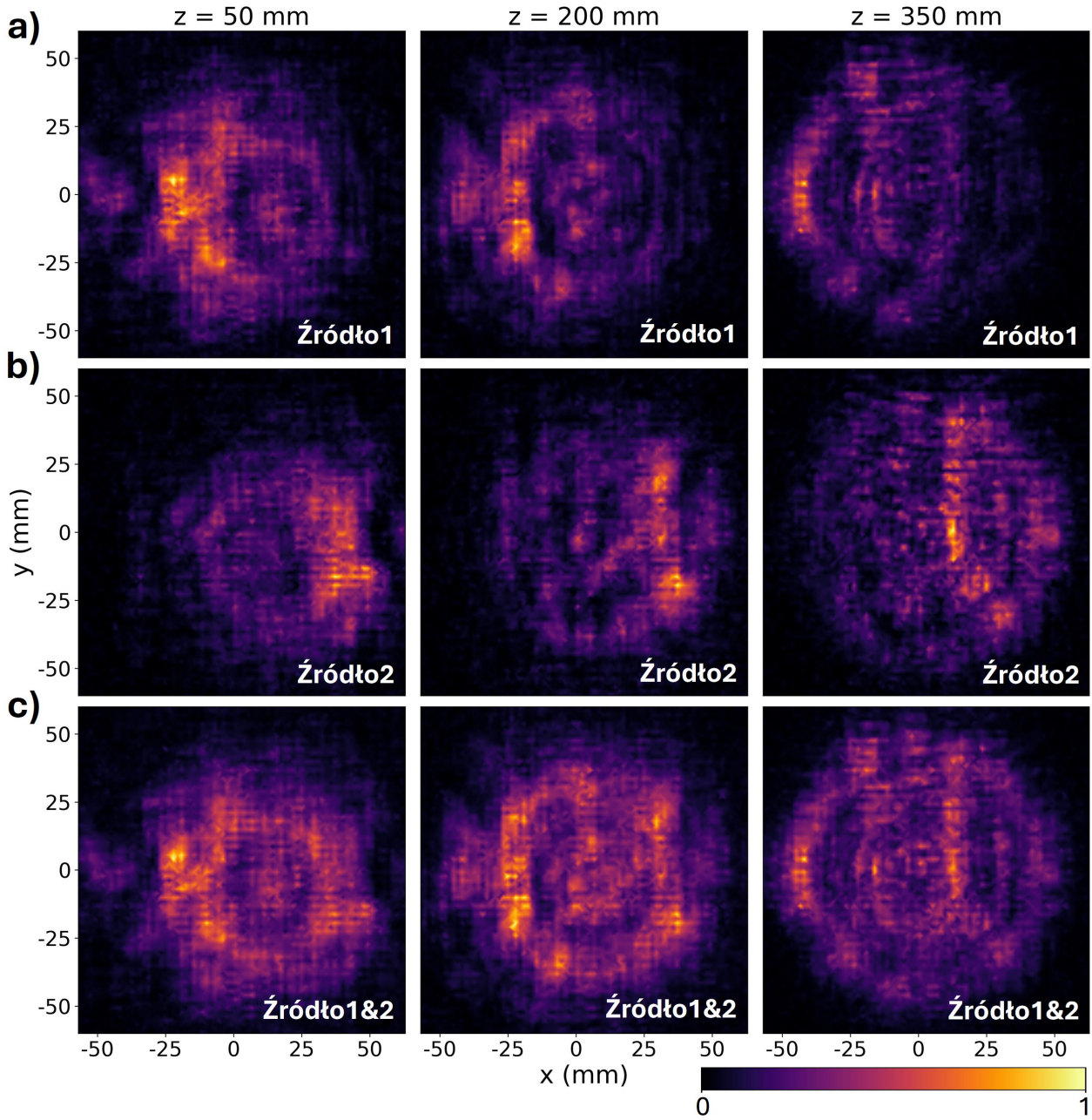
Dodatkowo, na Rysunku 6.20 przedstawiono skany poprzeczne pola xy za soczewką kolimującą zarejestrowane w odległości 50 mm, 200 mm oraz 350 mm za soczewką. Kolumny na Rysunku 6.20 opowiadają kolejnym wspomnianym odległościom, podczas gdy wiersze z notacją od a) do c) przedstawiają otrzymane rozkłady natężenia z włączonym źródłem 1., 2. oraz dwoma źródłami włączonymi jednocześnie. Na Rysunku 6.19 oraz Rysunku 6.20 pozycja "0" na skali osi x i y oznacza główną oś optyczną układu oznaczoną czerwoną linią na Rysunku 6.18, podczas gdy wartości na osi z odnoszą się do odległości od rozpatrywanego elementu optycznego do skanowanej płaszczyzny xy w układzie.

Analizując dane przedstawione na Rysunku 6.19a-c można stwierdzić, że struktura MISO3 przekierowuje i skupia w plamkę ogniskową promieniowanie pochodzące zarówno z jednego, jak i drugiego źródła w pobliżu zaprojektowanej odległości 100 mm za strukturą. Ognisko drugiego źródła charakteryzuje się rozciągnięciem i większym nachyleniem w stosunku do osi optycznej, co wynika z trudności w prawidłowym pozycjonowaniu tego elementu. Oba ogniska są względem siebie



Rysunek 6.19: Podłużny znormalizowany rozkład natężenia przy włączonym każdym ze źródeł osobno oraz dwoma źródłami włączonymi jednocześnie; a) do c) rozkłady uzyskane za strukturą MISO3 w okolicach płamki ogniskowej zmierzone w układzie przedstawionym na Rysunku 6.18a; d) do e) rozkłady uzyskane za soczewką kolimującą zmierzone w układzie przedstawionym na Rysunku 6.18b.

nieznacznie przesunięte. Wynika to z użytej metody justowania układu, która miała na celu uzyskanie jednorodnego rozkładu natężenia promieniowania w płaszczyźnie soczewki kolimującej. Należy jednak podkreślić, że różnica w pozycji ognisk jest niewielka, rzędu długości fali (około 3 mm). Dodatkowo, za ogniskami (około 120 mm od struktury MISO3), obserwujemy rozkład fali rozbieżnej, co sugeruje możliwość połączenia obu wiązek we wspólny tor optyczny. Aby zweryfikować to założenie, użyto soczewki kolimującej z dodatkową aperturą ograniczającą.

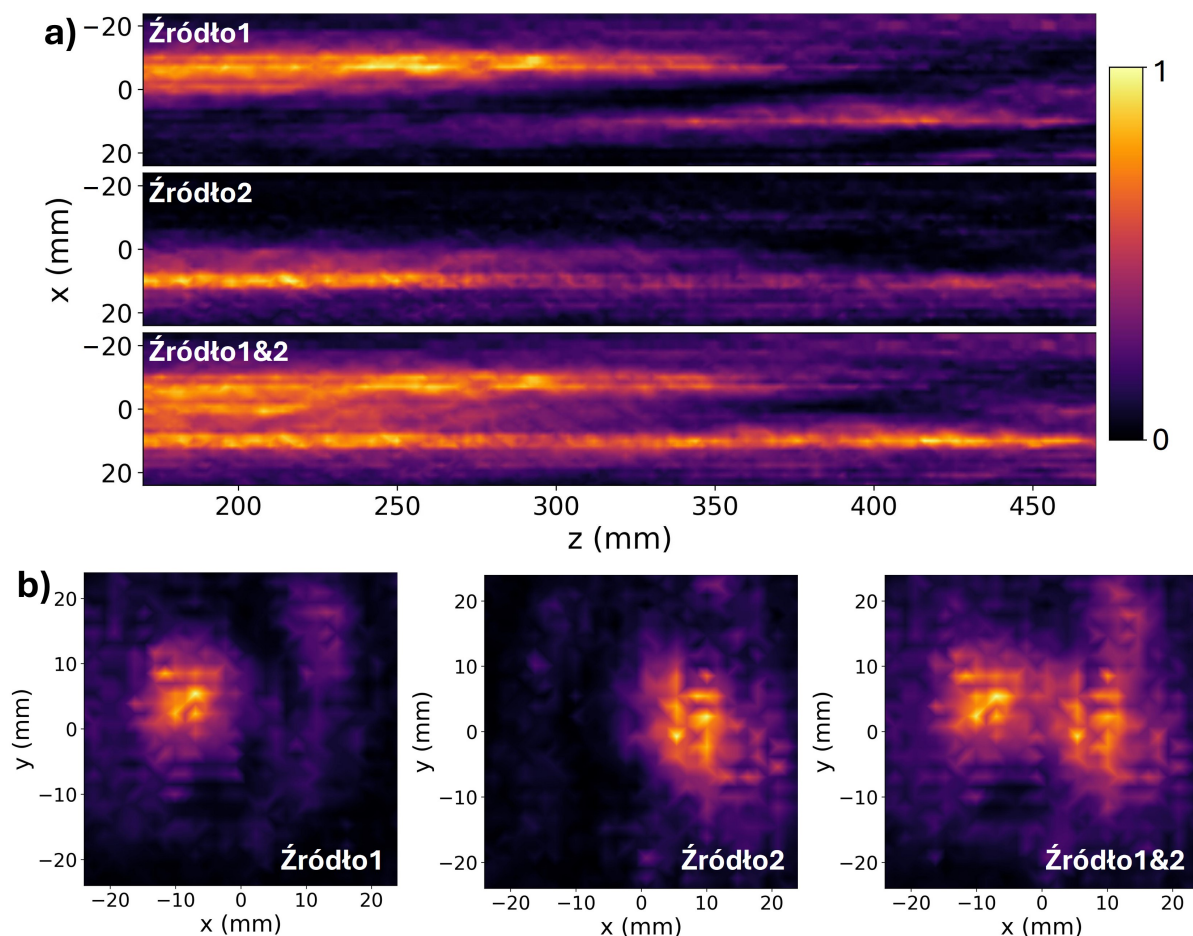


Rysunek 6.20: Poprzeczne znormalizowane rozkłady natężenia promieniowania zarejestrowane w płaszczyznach xy . Kolejne kolumny przedstawionych danych odpowiadają skanom w odległościach 50 mm, 200 mm oraz 350 mm za soczewką kolimującą zgodnie ze schematem pokazanym na Rysunku 6.18b; kolejne rzędy dotyczą skanów wykonanych przy włączonym: a) pierwszym źródle; b) drugim źródle; c) obu źródłach jednocześnie.

W zakresie odległości 50–350 mm od soczewki zaobserwowano, że dla obu źródeł powstaje fala quasi-płaska, co jest znaczącym osiągnięciem. Analizując każdy z sygnałów indywidualnie, widać, że wiązka ze źródła 1 została poprawianie przekierowana, podczas gdy wiązka z źródła 2 wykazuje pewne odchylenia, co wynikało z problemów z jego precyzyjnym pozycjonowaniem oraz kompensacją natężenia (zastosowanie filtra, który dodatkowo wprowadził kolejne płaszczyzny płaskie w układzie). Mimo to znaczna część frontu falowego propaguje się wspólnym torem optycznym, a odchylenia są niewielkie, zważywszy na propagację na odległość 350 mm. W rezultacie, obie wiązki promieniowania zostały skutecznie połączone we wspólny tor optyczny, z niewielkimi stratami związanymi z wiązką pochodzącą ze źródła 2.

Następnym etapem była przestrzenna separacja obu wiązek optycznych. W tym celu do układu optycznego dodana została struktura SIMO5 oraz binarna siatka dyfrakcyjna, po czym wykonane zostały skany przestrzenne rozkładu natężenia zgodne z przedstawionym schematem na Rysunku 6.18c oraz zdjęciem układu na Rysunku 6.18d. Wynikiem tych pomiarów było uzyskanie podłużnych rozkładów xz za siatką dyfrakcyjną, a także poprzecznych rozkładów xy w przybliżonej odległości 370 mm za siatką, gdzie zaobserwowano wyraźną separację przestrzenną sygnałów. Otrzymane wyniki zostały przedstawione na Rysunku 6.21.

Analizując dane przedstawione na Rysunku 6.21a zaobserwowano przestrzenną separację sygnałów widoczną w szerokim zakresie odległości za siatką dyfrakcyjną (od 250 mm do 470 mm). Wraz z odległością (oś z) sygnały THz wygenerowane z obu źródeł są coraz mocniej rozseparowane. Dodatkowo na Rysunku 6.21b zaprezentowano poprzeczne przekroje ilustrujące dwie plamki ogniskowe, które są przestrzennie rozdzielone w odległości 370 mm za siatką dyfrakcyjną. Wyniki te wskazują na uzyskanie przestrzennej demultipleksacji obu sygnałów. Należy podkreślić, że oba sygnały różniły się częstotliwością jedynie o 0,9 GHz. Rozdzielenie tak wąskiego pasma częstotliwości jest zadaniem niebanalnym, zwłaszcza w kontekście ograniczeń dyfrakcyjnych (wielkość ognisk) dla rozważanych częstotliwości. Niemniej jednak, uzyskane wyniki mają kluczowe znaczenie dla rozwoju telekomunikacji THz, ponieważ w tej dziedzinie bardzo istotna jest możliwość separacji częstotliwości o niewielkich różnicach, co umożliwia zastosowanie wielokanałowej transmisji danych, a tym samym zwiększenie liczby równocześnie przesyłanych sygnałów.



Rysunek 6.21: Skany prezentujące wyniki demultipleksacji przestrzennej promieniowania przy włączonym każdym ze źródeł osobno oraz dwoma źródłami włączonymi jednocześnie wykonane zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 6.18c oraz zdjęciem układu na Rysunku 6.18d; a) podłużne znormalizowane rozkłady natężenia w płaszczyźnie xz za siatką dyfrakcyjną; b) poprzeczne znormalizowane rozkłady natężenia w płaszczyźnie xy w przybliżonej odległości 370 mm za siatką dyfrakcyjną (na wyjściu układu).

W tej części pracy przedstawiono system typu MIMO umożliwiający multipleksację przestrzenną sygnałów o nieznacznie różniących się częstotliwościach, następnie propagację sygnałów w wolnej przestrzeni w postaci wspólnego kanału optycznego oraz demultipleksację przestrzenną sygnałów w obszarze detekcji. Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność postawionej tezy: **”Możliwe jest opracowanie wielokanałowego systemu transmisji sygnałów w oparciu o dyfrakcyjne elementy optyczne realizujące funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz.”**

Przyszłe prace w tym zakresie powinny skupić się nad bezpośrednim przesyłem danych w zaproponowanym systemie telekomunikacyjnym oraz porównaniu otrzymanych wyników z innymi rozwiązaniami zaprezentowanymi przez inne jednostki badawcze, które są dostępne w literaturze.

Kolejnym krokiem jest zaprojektowanie struktur pełniących funkcjonalność systemu MISO do (de)multipleksacji większej ilości sygnałów z zakresu promieniowania THz. Następnie zbudowanie układu MIMO umożliwiającego jednoczesny przesył większej ilości sygnałów, a co za tym idzie większej ilości danych.

W zaproponowanym systemie użyto dwóch struktur (SIMO5 oraz fazowej binarnej siatki dyfrakcyjnej) do osiągnięcia pełnej separacji wiązek THz. W przyszłości należy podjąć pracę nad metodą wdrożenia do systemu pojedynczej struktury SIMO pozwalającej na rozdzielenie sygnałów THz. Rozwiązanie to pozwoli na zwiększenie wydajności dyfrakcyjnej układu (zmniejszenie strat w systemie wynikających z użycia dodatkowych elementów optycznych o ograniczonej wydajności dyfrakcyjnej). Na przykład, można wykorzystać inne, gwarantujące wyższą rozdzielczość, metody wytwarzania struktur SIMO w celu zastąpienia komponentu siatki binarnej struktury SIMO5 przez siatkę piłokształtną, zgodnie z metodą opisaną w Podrozdziale 6.2. Pozwoli to na zwiększenie wydajności dyfrakcyjnej struktury w pojedynczym rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego.

Rozdział 7

Analiza niepewności pomiarowych

7.1 Symulacje numeryczne i modelowanie 3D

Na etapie numerycznego projektowania DOE, struktury były reprezentowane przez rozkłady fazowe przedstawione w pracy w postaci map bitowych. Podczas wykonywania symulacji numerycznych obliczano rozkład amplitudy i fazy w zadanych płaszczyznach (oba rozkłady w niniejszej pracy opisano przy użyciu map szaroodcieniowych). Mapy szaroodcieniowe, czy też bitmapy, zostały opisane przy użyciu macierzy o zadanym rozmiarze oraz wartości próbkowania, która ściśle określa wielkość pojedynczego piksela pola wejściowego. Są to kluczowe parametry, które trzeba odpowiednio dobrać, żeby w jak najwyższym stopniu odwzorować funkcjonalność struktury, a w rezultacie zminimalizować błędy powstałe na etapie wstępnego projektu DOE.

W użytym programie LightSword 6.0 opierającym swoje działanie na zmodyfikowanej metodzie splotowej zastosowane próbkowanie powinno być odpowiednio duże w porównaniu do rozważanej długości fali. Zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu wielkość próbkowania powinna spełniać kryterium Nyquista, które mówi o tym, że częstotliwość próbkowania powinna być przynajmniej dwukrotnie wyższa niż najwyższa częstotliwość analizowanego sygnału. Wybór odpowiedniego rozmiaru piksela jest kluczowy w kontekście odpowiedniej reprezentacji zmian fazowych w zadanych rozkładach. Gdy rozmiar piksela jest zbyt duży prowadzi to do skokowych zmian fazy (a nie ciągłych) co jest niepożądanym efektem. Zbyt mały rozmiar pikseli skutkuje albo ograniczeniem powierzchni symulacji do małego obszaru, albo dużą ilością obliczeń, albowiem koniecz-

ne jest stosowanie dużych macierzy obliczeniowych. Dodatkowo, trzeba odpowiednio dobrać próbkowanie, aby uniknąć błędów aliasingu. W programie użytym do liczenia propagacji promieniowania zastosowana jest dodatkowa modyfikacja metody splotowej, która pozwala na dzielenie odległości propagacji na mniejsze kroki, co gwarantuje redukcję błędów aliasingu. Dodatkowo podczas symulacji zastosowano rozmiar macierzy dwukrotnie większy niż rozpatrywana ilość próbek (odpowiadający dopełnieniem macierzy obliczeniowej zerami). Jest to szczególnie istotne w przypadku propagacji na znaczące odległości i pozwala na uniknięcie błędów wynikających z aliasingu [35, 185].

W pracy do modelowania przestrzennego struktur MISO użyto nowatorskiej metody (opisanej w Podrozdziale 4.6) w celu uzyskania dokładnej reprezentacji pikseli w procesie wytwarzania struktur. W metodzie było konieczne zastosowanie stosunkowo dużych pikseli o rozmiarze 0,9 mm odpowiadającym dwóm liniom druku przestrzennego w technologii FDM dla dyszy o średnicy 0,4 mm. Należy jednak podkreślić, że struktury MISO zostały zaprojektowane dla DWL równej 3,131 mm, która jest 3,5 krotnie wyższa od wielkości użytego piksela. Aby zmniejszyć rozmiar piksela można zaprojektować DOE, w których piksele będą reprezentowane przez pojedynczą linię druku. Innym rozwiązaniem jest użycie dyszy o mniejszej średnicy (na przykład równej 0,25 mm lub 0,15 mm), które gwarantują wyższą rozdzielczość druku. Należy jednak pamiętać, że użyta metoda modelowania przestrzennego umożliwiła dokładną reprezentację mapy fazowej w postaci modelu przestrzennego, a w rezultacie wydrukowanej struktury. Dzięki czemu uniknięto błędów związanych z interpolacją wartości między sąsiadującymi pikselami.

W przypadku projektowania struktur SIMO użyto klasycznego podejścia tworzenia modeli przestrzennych. Rozmiar pikseli map opóźnień fazowych był znacznie mniejszy i był równy $300\ \mu\text{m}$. Natomiast w etapie modelowania przestrzennego powstały nieznaczne odstępstwa od pierwotnie obliczonych rozkładów fazowych wynikające z interpolacji wartości między sąsiadującymi pikselami. W przypadku DOE o relatywnie ciągłych profilach fazowych, którymi są struktury SIMO, nie wprowadza to znaczącego błędu (jest on znacznie niższy niż rozdzielczość druku przestrzennego).

7.2 Wytwarzanie DOE

Struktury przedstawione w pracy zostały wytworzone przy użyciu druku przestrzennego w technologii FDM. W procesie produkcji użyto dyszy o średnicy 0,4 mm oraz ustawień wysokości pojedynczej warstwy równej 100 μm (lub 150 μm w przypadku grubszych struktur) i szerokości pojedynczej linii równej 450 μm . Stanowi to pionową oraz poziomą rozdzielczość druku. Należy jednak pamiętać, że technologia FDM umożliwia wypełnienie przestrzeni międzyliniowych materiałem, dlatego rozmiar poziomy drukowanego obiektu nie musi być ograniczony do wielokrotności grubości pojedynczej linii (na przykład możliwy jest quasi-jednorodny wydruk obiektu o szerokości 1,125 mm składającego się z 2,5 linii). W przypadku wytwarzania struktur MISO3 oraz SIMO5 rozkłady fazy w zakresie od 0 do 2π reprezentowane był przez 37 warstw wydruku. Stanowi to quasi-ciągłą reprezentację fazy gwarantującą wydajność przekraczającą wartość 99% [33].

Głównym czynnikiem wprowadzającym niedokładność i błędy wydruków jest lepko-sprężysta natura materiałów polimerowych, z których korzysta się w technologii FDM. Polimery to ciecze nienewtonowskie i można z nich wyróżnić polimery zarówno zagęszczane ścinaniem (o niskiej lepkości), jak i rozrzedzane ścinaniem (o wysokiej lepkości). Większość polimerów stosowanych w druku 3D jest rozrzedzana ścinaniem. Gdy materiał polimerowy zostaje uplastyczniony (przez podgrzanie) przepływa on przez dyszę drukarki formując drukowane linie. Podczas względnie powolnego przepływu polimeru przez dyszę występuje przepływ swobodny materiału. Natomiast gdy prędkość przepływu jest zbyt wysoka, dochodzi do przepływu turbulentnego, co jest niepożądanym zjawiskiem prowadzącym do znaczących odkształceń w wytwarzanym obiekcie. W procesie druku szczególne znaczenie mają efekty Barusa oraz naprężeń normalnych podczas przepływu polimeru przez dyszę [152, 153]. Efekty te prowadzą do poszerzenia strugi i/lub pęcznienia wytłaczanego materiału. Ponadto efekty te mają różne natężenie w zależności od danego rodzaju polimeru. Z tego względu zadaniem nietrywialnym jest ustawienie odpowiedniego przepływu materiału z odpowiednią prędkością przez dyszę drukarki, tak aby nie powstały szczeliny między drukowanymi dyszami czy też linie wydruku nie nachodziły na siebie prowadząc do deformacji i artefaktów drukowanego obiektu. Kolejnym efektem prowadzącym do deformacji wydruków jest skurcz materiałów polimerowych w procesie chłodzenia wydruku. Prowadzi on do odkształcenia (wygięcia) drukowanego obiektu w szczególności

w przypadku stosunkowo dużych płaskich obiektów, którymi są DOE. Efekt ten prowadzi do znaczących błędów w prawidłowym funkcjonowaniu DOE, ponieważ przestają one wprowadzać odpowiednie opóźnienie fazowe w zadanej płaszczyźnie.

W związku z opisanymi wyzwaniami dotyczącymi druku przestrzennego w technologii FDM (podobne i inne zmagania występują w innych technologiach druku 3D) przeprowadzono szczegółowe badania wpływu parametrów druku 3D na właściwości optyczne wytwarzanych obiektów (opisane w Podrozdziale 5.2). Umożliwiły one określenie odpowiednich parametrów druku dla transparentnego w zakresie promieniowania THz materiału COC, gwarantując wytwarzanie wysokiej jakości wydajnych DOE.

7.3 Pomiary THz TDS

Niepewność pomiarów THz TDS przedstawionych w niniejszej pracy wynika z wielu czynników. Głównymi aspektami do prawidłowego przeprowadzenia pomiarów jest utrzymanie stabilnej temperatury i wilgotności w środowisku badawczym oraz stabilnej pracy lasera femtosekundowego, użytego do generowania promieniowania THz. Pomiary przeprowadzono w komorze, do której pompowano suche powietrze w celu redukcji wpływu absorpcji pary wodnej znajdującej się w powietrzu. Warunki w laboratorium, w którym znajduje się system THz TDS, były monitorowane, aby zapobiec zmianom (takim jak wahania temperatury czy wilgotności), które mogłyby prowadzić do rozstrojenia urządzenia pomiarowego, a w rezultacie błędów pomiarowych.

Jednym z istotnych aspektów jest geometria mierzonych próbek. Część impulsu propagowanego przez płasko-równoległe cylindryczne próbki wielokrotnie odbija się od powierzchni próbki skutkując wtórnym pasożytniczym impulsem rejestrowanym przez detektor. W rezultacie zjawisko to prowadzi do zniekształcenia mierzonego sygnału i błędów pomiarowych. W celu redukcji negatywnego wpływu tego zjawiska starannie dobrano grubość próbek pomiarowych (zazwyczaj była ona równa 4 mm) oraz pozycję linii opóźniającej urządzenia. Dodatkowo na etapie analizy danych zastosowano apodyzację danych przy użyciu filtra BH4. Pomiar danego rodzaju próbek jest obciążony błędami losowymi i systematycznymi, które mogą wynikać z metody pomiaru grubości próbki oraz jej niepewności, wyosianiem (ustawieniem) próbki podczas wykonywania pomiaru, niejednorodnościami w badanych próbkach (które mogą być znaczące w przypadku próbek wytwarzanych przy użyciu druku 3D).

Innym istotnym czynnikiem są zakłócenia sygnału spowodowane przez komponenty elektroniczne, optyczne, mechaniczne, które można zredukować przez poprawną kalibrację urządzenia. W rezultacie skutkują one wprowadzeniem dodatkowego szumu w pomiarach oraz zmniejszeniem poziomu sygnału docierającego do detektora. Niższy stosunek sygnału do szumu prowadzi do wzrostu niepewności pomiarowych i potencjalnych błędów pomiarowych. Wspomniane zakłócenia są również jedną z przyczyn błędów systematycznych występujących w pomiarach THz TDS.

Szczegółowy opis wspomnianych aspektów można znaleźć w literaturze [187–189].

7.4 Pomiarzy eksperymentalne

Na etapie symulacji numerycznych DOE są reprezentowane przez dwuwymiarowe bitmapy. Nie został tam analizowany wpływ efektu cienia [180]. Rzeczywista struktura w eksperymencie fizycznym ma przestrzenny wymiar (3D), dlatego gdy promieniowanie THz pada na DOE, obszary ze skokami fazy mogą rzucać "cień" na sąsiednie obszary struktury. To może prowadzić do nieprawidłowego ugięcia promieniowania w tych obszarach, co deformuje wyjściowy rozkład dyfrakcyjny.

Ponadto źródła promieniowania THz użyte w układach eksperymentalnych przedstawionych w tej pracy posiadają relatywnie dużą drogę spójności (szacowaną nawet na kilkadziesiąt metrów). Promieniowanie THz doskonale się odbija od wszelkich elementów układu (często wielokrotnie) tworząc niepożądane efekty interferencyjne. Pomimo stosowania przysłon i elementów tłumiących pasożytnicze odbicia w THz układach eksperymentalnych trzeba się zmagać z licznymi efektami interferometrycznymi występującymi w postaci dodatkowego poziomu szumu pochodzącego z promieniowania odbitego od większych powierzchni lub niepożądanych jasnych punktów np. w postaci spekli. Ponadto pomiary wykonywane były w polu bliskim Fresnela, co dodatkowo wzmacnia występowanie efektów dyfrakcyjnych.

DOE są projektowane dla konkretnej długości fali (DWL). Kiedy częstotliwość promieniowania używanego w eksperymentach różni się od DWL, struktury te przekierowują promieniowanie mniej efektywnie. Wynika to z niedopasowania rozkładu przestrzennego DOE oraz opóźnienia fazowego wprowadzanego przez DOE względem rozpatrywanej częstotliwości, co negatywnie wpływa na wydajność i precyzję działania DOE,

a w rezultacie zwiększa poziom szumu. W pracy w szczególności funkcjonalność struktur SIMO została zweryfikowana w stosunkowo szerokim zakresie promieniowania THz (od 150 GHz do 220 GHz). Zaobserwowano znaczące pogorszenie działania struktur dla częstotliwości znacząco odbiegających od DWL. Niemniej jednak badania te pozwoliły określić potencjalny zakres, dla którego przedstawione DOE mogą zostać wykorzystane do multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz.

Rozdział 8

Wnioski i podsumowanie

8.1 Badania właściwości optycznych materiałów w zakresie promieniowania THz

Przeprowadzono badania właściwości optycznych 103. różnych materiałów przy użyciu technologii THz TDS. Badania te dotyczyły 60. próbek wytworzonych przy użyciu technik wytwarzania przyrostowego, takich jak FDM i SLS, z materiałów polimerowych i kompozytowych, a także 43. próbek wytworzonych metodą odlewniczą z różnych rodzajów glin, wosków, czekolad i mydeł.

Analiza wyników wykazała znaczące różnice we współczynnikach absorpcji, a także w opóźnieniach fazowych wprowadzanych przez materiały polimerowe i kompozyty używane w druku 3D w technologii FDM. Współczynniki załamania zmierzonych próbek przyjmowały wartości w szerokim zakresie od 1,34 do 2,03 dla częstotliwości 300 GHz, co umożliwiło dobór odpowiednich materiałów do konkretnych zastosowań aplikacyjnych. W analizowanym zakresie spektralnym od 100 GHz do 1 THz nie zaobserwowano znaczącej dyspersji materiałowej. Jednocześnie zaobserwowano wzrost współczynnika absorpcji wraz ze wzrostem częstotliwości dla większości materiałów polimerowych i kompozytów polimerowych. Należy jednak podkreślić, że istnieje grupa materiałów o wyjątkowo niskich wartościach współczynnika absorpcji w całym badanym spektrum. Te materiały to P5-HIPS(1), P6-HIPS(2), P7-SBC(1)(BendLay), P8-SBC(2)(CrystalFlex), P9-PP(1), P10-PP(2)(Centaur), P12-PP(4), P33-HDPE, P34-LLDPE, P47-Cleaner(2) oraz P54-COC. Ich niskie wartości współczynnika absorpcji

(poniżej $2,34 \text{ cm}^{-1}$ dla częstotliwości 1 THz) czyni je pożądanymi materiałami do produkcji pasywnych elementów optycznych, takich jak DOE. Z kolei różnice we współczynniku załamania (od 1,34 do 1,57 dla częstotliwości 300 GHz) pozwalają na wybór konkretnego materiału odpowiedniego do potrzeb danego układu zaprojektowanego dla zakresu promieniowania THz.

Z analizowanej grupy polimerów stosowanych w druku 3D w technologii FDM, materiały P54-COC oraz P7-SBC(1)(Bendlay) zostały wybrane do wytworzenia DOE przedstawionych w tej rozprawie. Oba materiały charakteryzują się wyjątkowo niskim współczynnikiem absorpcji w analizowanym zakresie częstotliwości od 100 GHz do 1 THz. Dodatkowo, są one stosunkowo łatwe w obróbce podczas druku 3D, w przeciwieństwie do pozostałych przezroczystych materiałów dla zakresu THz. Niewielki skurcz materiałów P54-COC oraz P7-SBC(1)(Bendlay) sprawia, że wydrukowane obiekty nie ulegają odkształceniom, co jest kluczowe w przypadku wytwarzania DOE, które są projektowane z myślą o wprowadzeniu konkretnego opóźnienia fazowego. Odpowiedni dobór parametrów druku 3D pozwala wydrukować z nich względnie jednorodne obiekty bez delaminacji.

8.2 Wpływ parametrów druku 3D na właściwości optyczne wytworzonych obiektów z COC

Materiał P54-COC został wybrany do szczegółowej analizy wpływu parametrów druku na właściwości optyczne drukowanych obiektów. Należy podkreślić, że określone parametry druku przestrzennego użyte do wytworzenia próbek polimerowych z wykorzystaniem technologii FDM mogą być bezpośrednio wykorzystane do prototypowania lub produkcji pasywnych elementów optycznych, ponieważ zmierzone właściwości optyczne bezpośrednio odpowiadają właściwościom wytwarzanych elementów optycznych, takich jak DOE.

Wyniki przedstawione w pracy wskazują, że niektóre parametry druku w technologii FDM mają znaczący wpływ na właściwości optyczne wytwarzanych struktur. Parametrami tymi są szerokość wytłaczanych linii, poziom chłodzenia wydruku, współczynnik przepływu materiału przez dyszę oraz grubość linii (wysokość warstwy) wydruku. Niewłaściwie sprecyzowane i dobrane parametry druku skutkują pogorszeniem właściwości optycznych struktury, np. znacznym spadkiem współczynnika załamania

lub kilkukrotnym wzrostem współczynnika absorpcji wytworzonego obiektu. Co więcej, mogą one prowadzić do powstawania defektów w wydrukowanej strukturze. Szczegółowa analiza danych pozwoliła na określenie optymalnych parametrów druku przestrzennego z biokompatybilnego materiału COC. Parametry te pozwalają na maksymalizację wydajności wytwarzanych DOE dla zakresu THz oraz redukcję strat wynikających ze zjawisk dyfrakcyjnych i odbić Fresnela.

Dodatkowo w pracy w Podrozdziale 4.6 przedstawiono nowatorską metodę modelowania przestrzennego DOE przeznaczonego dla struktur o złożonych rozkładach przestrzennych. Zaproponowana metoda pozwala na dokładne odwzorowanie dwuwymiarowych rozkładów map opóźnień fazowych w postaci trójwymiarowego modelu przestrzennego. Rozwiązanie to umożliwia uzyskanie modelu 3D i wytworzenie struktury, która precyzyjnie odzwierciedla rozkład fazy poddany weryfikacji za pomocą symulacji numerycznych, a następnie w rzeczywistym eksperymencie układowym optycznym. Precyzyjne odwzorowanie struktury gwarantuje wyższą spójność uzyskanych wyników symulacyjnych z wynikami przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych, w konsekwencji gwarantując zwiększenie wydajności DOE.

8.3 Multipleksacja przestrzenna promieniowania THz – struktury MISO

W pracy zaprezentowano trzy różnie zaprojektowane struktury realizujące funkcjonalność multipleksacji przestrzennej promieniowania THz. Dwie struktury, MISO1 i MISO2, zostały zaprojektowane poprzez segmentację periodyczną pozaosiowych części soczewek kinoformowych. Tymczasem rozkład struktury MISO3 został wygenerowany przy użyciu algorytmu iteracyjnego.

Wydajność wszystkich struktur została zweryfikowana za pomocą symulacji numerycznych opartych na zmodyfikowanej metodzie splotowej. Wszystkie trzy struktury MISO wykazały prawidłowe działanie poprzez przekierowanie i skupienie promieniowania z dwóch przestrzennie rozdzielonych źródeł promieniowania THz w plamkę ogniskową zlokalizowaną na głównej osi optycznej układu. Modele przestrzenne struktur zostały wytworzone przy użyciu nowatorskiej techniki przedstawionej w Podrozdziale 4.6

i wytworzone przy użyciu technologii FDM druku przestrzennego z transparentnego materiału SBC. Końcowym etapem tej części badań było przeprowadzenie pomiarów eksperymentalnych w THz układzie optycznym.

Przedstawione metody projektowania każdej ze struktur MISO pozwoliły na uzyskanie ciągłego rozkładu fazy, gwarantującego wysoką wydajność dyfrakcyjną. W przypadku struktury MISO1 zaobserwowano znaczące pasożytnicze efekty interferencyjne w pobliżu plamki ogniskowej za strukturą na głównej osi optycznej. W przypadku struktury MISO2 wystąpiło poszerzenie głównego ogniska, co również jest niepożądanym rezultatem. Jednak wydajność struktury MISO3 znacznie przewyższyła wydajności dwóch wcześniej wspomnianych struktur. Dla struktury MISO3 zarejestrowano ponad dwukrotnie wyższe maksymalne natężenie w ognisku za strukturą w porównaniu z pozostałymi strukturami MISO. Co więcej, względna wydajność struktury MISO3 była 115,36% wyższa niż struktury MISO1 oraz 20,88% wyższa niż struktury MISO2. Dlatego też do zaprojektowania układu MIMO zdecydowano się na użycie struktury typu MISO3 projektowanej metodą iteracyjną.

8.4 Demultipleksacja przestrzenna promieniowania THz – struktury SIMO

W pracy przedstawiono cztery różnie zaprojektowane struktury realizujące demultipleksację przestrzenną promieniowania THz w dziedzinie częstotliwości. Zaprezentowane struktury przekierowują promieniowanie THz w pojedynczy -1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego, co gwarantuje minimalizację strat sygnału. Zaproponowana metoda projektowania struktur pozwoliła na osiągnięcie uśrednionej względnej wydajności o 63% wyższej dla struktury SIMO1 i o 49% wyższej dla struktury SIMO4 względem opisaney w literaturze struktury o działaniu opartym na zastosowaniu siatki binarnej. Biorąc pod uwagę poszczególne częstotliwości 180 GHz i 200 GHz, dla struktury SIMO1 uzyskano wyniki o 81% i o 86% wyższe niż dla wspomnianej struktury binarnej. Dlatego też struktury SIMO1 i SIMO4 są rekomendowane do dalszych badań i potencjalnych zastosowań w przyszłej technologii telekomunikacyjnej 6G. Należy jednak podkreślić, że SIMO4 została wytworzona jako pojedynczy komponent. W przeciwieństwie do tego, struktura

SIMO1 została wyprodukowana w dwóch oddzielnych częściach, które zostały ze sobą połączone. W związku z tym na granicy połączenia ze sobą ośrodków mogą wystąpić niechciane odbicia Fresnela, które należy skompensować poprzez zastosowanie środka wiążącego, takiego jak np. wosk lub transparentne oleje odpowiednie dla zakresu promieniowania THz. Z tego powodu struktura SIMO1 stanowi większe wyzwanie pod względem prawidłowej produkcji docelowego DOE. Biorąc jednak pod uwagę metody produkcji, które pozwalają na wytwarzanie struktury SIMO jako pojedynczego elementu, struktura SIMO4 rekomendowana jest do przyszłych zastosowań telekomunikacyjnych.

Wszystkie cztery zweryfikowane struktury prawidłowo rozdzieliły częstotliwości THz. Jednak struktura SIMO1 wykazała najwyższą względną wydajność, biorąc pod uwagę -1. rząd ugięcia dyfrakcyjnego. Natomiast struktura SIMO4 zapewniła najniższe straty w 0. oraz 1. rzędach dyfrakcji. Tak więc struktury SIMO1 i SIMO4 mogą być wybrane do dalszych badań w tym obszarze i potencjalnych zastosowań w przyszłych technologiach telekomunikacyjnych. Zaprezentowane rozwiązania jednoznacznie stanowią o uzyskaniu znacznie wyżej wydajności względem wcześniej przedstawionych koncepcji [143].

8.5 System MIMO

W pracy przedstawiono układ MIMO umożliwiający multipleksację przestrzenną dwóch sygnałów o nieznacznie różniących się częstotliwościach (95,3 GHz oraz 96,2 GHz). Następnie propagację sygnałów w wolnej przestrzeni w postaci wspólnego toru optycznego oraz demultipleksację przestrzenną sygnałów w obszarze detekcji. Przedstawione wyniki wskazują na prawidłowe połączenie obu sygnałów we wspólny tor optyczny, a następnie na pełną separację przestrzenną sygnałów.

Szczególnym osiągnięciem przedstawionym w tej części pracy jest separacja sygnałów o niewielkich różnicach częstotliwości emitowanych przez zastosowane źródła (jedynie 0,9 GHz). Jest to szczególnie pożądaný wynik z punktu widzenia zastosowań telekomunikacyjnych.

Przyszłe prace w tym zakresie powinny skupić się nad bezpośrednią transmisją danych w zaproponowanym systemie telekomunikacyjnym oraz porównaniu otrzymanych wyników z innymi rozwiązaniami zaprezentowanymi przez inne jednostki badawcze, które są dostępne w literaturze.

Kolejnym krokiem jest zaprojektowanie struktur pełniących funkcjonalność systemu MISO do (de)multipleksacji większej ilości sygnałów z zakresu promieniowania THz. Następnie zbudowanie układu MIMO umożliwiającego jednoczesny przesył większej ilości sygnałów, a co za tym idzie większej ilości danych.

W zaproponowanym systemie użyto dwóch struktur (SIMO5 oraz fazowej binarnej siatki dyfrakcyjnej) do osiągnięcia pełnej separacji wiązek THz. W przyszłości należy podjąć pracę nad metodą wdrożenia do systemu pojedynczej struktury SIMO pozwalającej na rozdzielenie sygnałów THz. Rozwiązanie to pozwoli na zwiększenie wydajności optycznej systemu, poprzez zmniejszenie strat w systemie, wynikających z użycia dodatkowych elementów optycznych o ograniczonej wydajności optycznej. Ponadto można wykorzystać inne, gwarantujące wyższą rozdzielczość, metody wytwarzania struktur SIMO w celu zastąpienia komponentu siatki binarnej struktury SIMO5 przez siatkę piłokształtną zgodnie z metodą opisaną w Podrozdziale 6.2. Pozwoli to na zwiększenie wydajności dyfrakcyjnej struktury w pojedynczym rzędzie ugięcia dyfrakcyjnego.

Do zaprojektowania układ typu MIMO do multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz z wykorzystaniem DOE, spełniono dodatkowe konieczne wymagania opisane w Rozdziale 2. Zaprojektowano dedykowane elementy typu MISO do multipleksacji oraz typu SIMO do demultipleksacji przestrzennej promieniowania THz. Użyto zaawansowanej metody prototypownia THz DOE, która obejmowała precyzyjne modelowanie przestrzenne DOE, wybór odpowiednich nisko-tłumiących materiałów dla zakresu promieniowania THz oraz dopasowanie parametrów druku 3D w technologii FDM. W rezultacie zwiększono wydajność wytworzonych elementów dyfrakcyjnych i zbudowano układ MIMO.

Wyniki przeprowadzonych badań opisane w rozprawie i artykułach naukowych potwierdzają słuszność tezy rozprawy: **”Możliwe jest opracowanie wielokanałowego systemu transmisji sygnałów w oparciu o dyfrakcyjne elementy optyczne realizujące funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz.”**

Wyniki badań zaprezentowane w niniejszej pracy zostały opublikowane w następujących artykułach naukowych, które zostały wcześniej wymienione w Rozdziale 2:

- **Kaluza, M.**, Komorowski, P., Surma, M., Nieradka, A., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Advanced diffractive optical elements implementing multiple-input spatial multiplexing of terahertz radiation,” *Optics and Lasers in Engineering* 184, 108606 (Jan. 2025).
- **Kaluza, M.**, Walczakowski, M., and Siemion, A., “Exploring the impact of 3D printing parameters on the THz optical characteristics of COC material,” *Materials* 17, 5104 (Oct. 2024).
- **Kaluza, M.**, Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Terahertz focusing blazed diffractive optical elements for frequency demultiplexing,” *Advanced Optical Technologies* 12 (Dec. 2023).
- Surma, M., **Kaluza, M.**, Czerwińska, P., Komorowski, P., and Siemion, A., “Neural-network based approach to optimize THz computer generated holograms,” *Photonics Letters of Poland* 13, 88 (Dec. 2021).

Dodatkowo przedstawione badania zostały opublikowane w następujących artykułach konferencyjnych:

- **Kaluza, M.**, Walczakowski, M., Komorowski, P., and Siemion, A., “Influence of 3D printing parameters on the THz optical properties of COC material,” in [2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)], 1–2, IEEE (Sept. 2024).
- Zagrajek, P., Komorowski, P., Walczakowski, M., **Kaluza, M.**, and Siemion, A., “Optical MIMO system for THz data transmission,” in [2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)], 1–2, IEEE (Sept. 2024).
- **Kaluza, M.**, Komorowski, P., Nieradka, A., Surma, M., Zagrajek, P., and Siemion, A., “MIMO systems for 6G THz data transmission links,” in [2024 25th International Microwave and Radar Conference (MIKON)], 100–102, IEEE (July 2024).

- Surma, M., **Kaluza, M.**, Czerwińska, P., Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Iterative design of multiple-input-single-output structures for THz signal multiplexing,” in [*2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1-2, IEEE (Sept. 2023).
- **Kaluza, M.**, Surma, M., Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “3D printed diffractive optical elements for THz spatial multiplexing,” in [*2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1-2, IEEE (Sept. 2023).
- **Kaluza, M.**, Surma, M., Komorowski, P., Walczakowski, M., and Siemion, A., “THz optical properties of different 3D printing polymer materials in relation to FTIR, raman, and XPS evaluation techniques,” in [*2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], IEEE (Aug. 2022).

Ponadto omówione w niniejszej pracy zagadnienia pośrednio przyczyniły się również do opublikowania następujących artykułów naukowych:

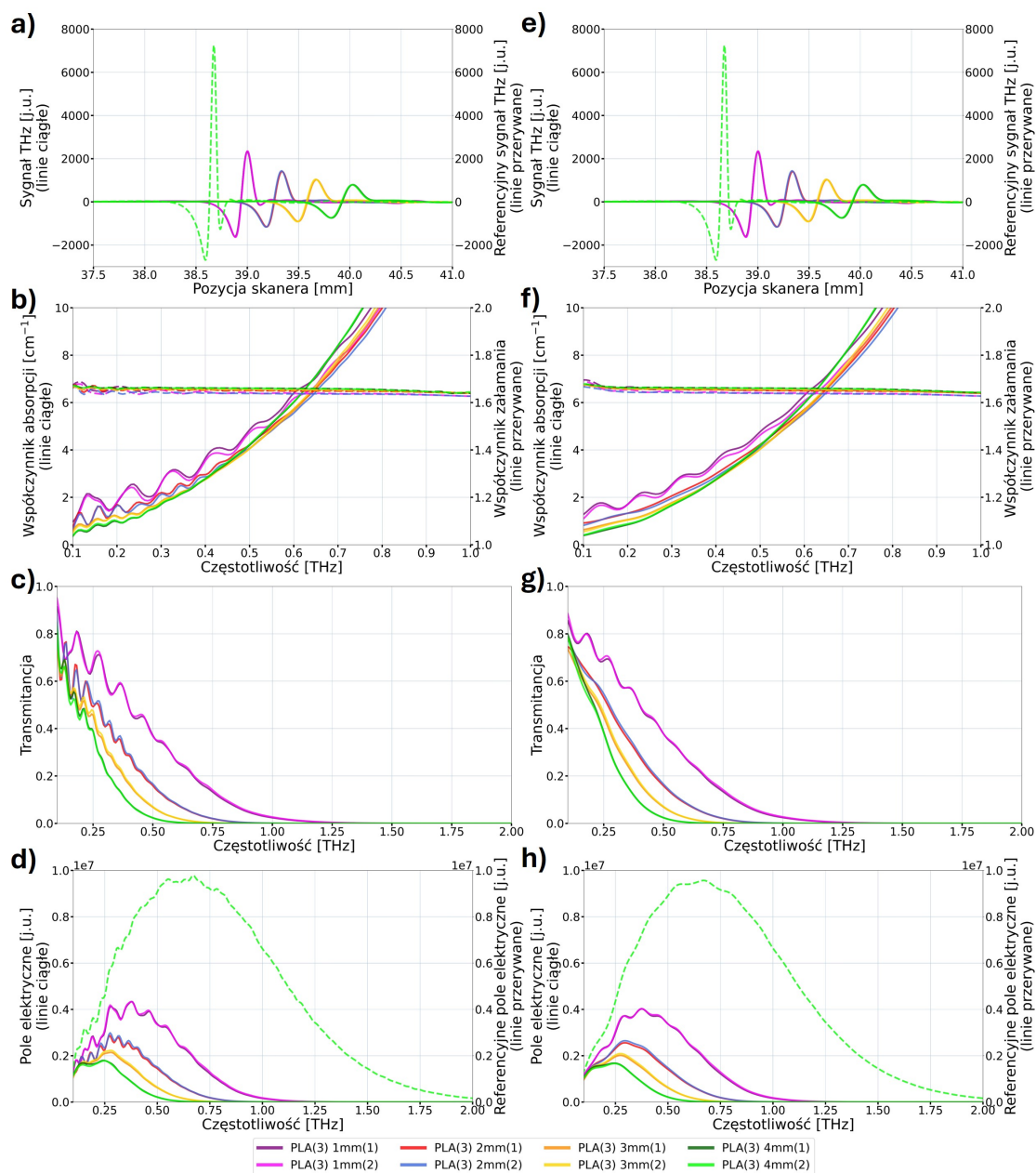
- Komorowski, P., Kurowska, M., **Kaluza, M.**, Czerwińska, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Neural network-based design of two-focal-spot terahertz diffractive optical elements,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 14, 228–237 (Mar. 2024)
- Surma, M., **Kaluza, M.**, Komorowski, P., and Siemion, A., “Segmentation of THz holograms for homogenous illumination,” *Scientific Reports* 14, 12733 (June 2024).
- Komorowski, P., **Kaluza, M.**, Surma, M., and Siemion, A., “3D printed diffractive lenses operating at 1 THz,” *Lithuanian Journal of Physics* 63 (Nov. 2023).
- Komorowski, P., Czerwińska, P., **Kaluza, M.**, Surma, M., Zagrajek, P., Sobczyk, A., Ciurapiński, W., Piramidowicz, R., and Siemion, A., “Frequency division multiplexing of terahertz waves realized by diffractive optical elements,” *Applied Sciences* 11, 6246 (July 2021).

Omówione zagadnienia w pracy pośrednio przyczyniły się również do opublikowania artykułów konferencyjnych:

- Komorowski, P., **Kałuza, M.**, Zagrajek, P., and Siemion, A., “Multi-focal-spot terahertz lenses designed using a neural network-based algorithm,” in [*2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1–2, IEEE (Sept. 2024).
- Nieradka, A., **Kaluza, M.**, Komorowski, P., and Siemion, A., “Phase contrast method in spatial filtering of terahertz beams,” in [*2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1–2, IEEE (Sept. 2024).
- Nieradka, A., **Kaluza, M.**, Rudyk, H., Komorowski, P., and Siemion, A., “3D printed polarisers for THz spectral range,” in [*2024 25th International Microwave and Radar Conference (MIKON)*], 238–240, IEEE (July 2024).
- Nieradka, A., Komorowski, P., **Kaluza, M.**, Surma, M., and Siemion, A., “Terahertz optical setups using spatial filtering methods to image low-absorbing samples,” in [*Terahertz Photonics III*], SPIE (June 2024).
- Komorowski, P., Czerwińska, E., Zagrajek, P., **Kaluza, M.**, Palka, N., and Siemion, A., “Diffraction Grating-Based Tool for Spectral Characterization of THz Beams,” in [*2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*], 283–285, IEEE (Nov. 2023).
- Surma, M., **Kaluza, M.**, Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Terahertz hologram for homogenous illumination,” in [*2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1–2, IEEE (Aug. 2022).

Aneks

Załącznik 1: Szczegółowa analiza pomiarów THz TDS dla próbek P15-PLA(3)



Rysunek A1: Wyniki pomiarów THz TDS próbek różnej grubości wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM z materiału PLA (materiał P15 w Tabeli A1). Wykresy: a) do d) utworzono w oparciu o surowe dane pomiarowe; e) do h) utworzono z przetworzonych danych przy użyciu filtra apodyzacyjnego BH4.

Załącznik 2: Specyfikacja materiałów polimerowych

Pomiary THz TDS przeprowadzono na sześćdziesięciu różnych próbkach polimerów, z których pięćdziesiąt jeden zostało wyprodukowanych przy użyciu druku 3D w technologii FDM, a dziewięć przy użyciu druku 3D w technologii SLS. Lista badanych materiałów polimerowych została przedstawiona w Tabeli A1 i Tabeli A2. Przedstawione dane obejmują informacje o identyfikatorze próbki (numerze wprowadzonym do celów identyfikacji próbek na potrzeby dalszych analiz), rodzajach materiałów (rodzina chemiczna bazowego polimeru), dodatkach w bazie polimerowej, nazwach handlowych materiału i producentach. Rodzina chemiczna bazowego materiału w przypadku obu tabeli została przedstawiona w języku angielskim. Nazwy i identyfikatory próbek wyprodukowanych w technologii SLS są pogrubione i zaznaczone niebieskim kolorem. Próbki polimerów i kompozytów podzielono na dziesięć grup. Tabela A1 przedstawia informacje o grupach takich jak: styreny, PP, PLA, PETG i PA (nylony), podczas gdy Tabela A2 przedstawia informacje o grupach takich jak: PC i PE, elastomery, polimery rozpuszczalne, kompozyty węglowe i "innych" materiałach polimerowych.

Tabela A1: Specyfikacja próbek wytworzonych przy użyciu technologii druku 3D FDM i SLS (pogrubione i zaznaczone na niebiesko). Właściwości optyczne wytworzonych próbek zostały następnie określone przy użyciu THz TDS.

Grupa	ID próbki	Nazwa: typ polimeru (numer/nazwa handlowa/dodatki)	Rodzina chemiczna bazowego polimeru	Producent
Styreny	P1	ABS(1)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (>60%) and Acrylic Copolymer (<40%)	Fiberlogy
	P2	ABS(2)	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Rosa3D
	P3	ASA(1)	Acrylonitrile Styrene Acrylate Copolymer	Fiberlogy
	P4	ASA(2)	Acrylonitrile Styrene Acrylate Copolymer	Rosa3D
	P5	HIPS(1)	High Impact Polystyrene	DevilDesign
	P6	HIPS(2)	High Impact Polystyrene	Fiberlogy
	P7	SBC(1)(BendLay)	Styrene Butadiene Copolymer	OrbiTech
	P8	SBC(2)(CrystalFlex)	Styrene Butadiene Copolymer	FormFutura
PP	P9	PP(1)	Polypropylene	Fiberlogy
	P10	PP(2)(Centaur)	Polypropylene	FormFutura
	P11	PP(3)(Pegasus)	Polypropylene	FormFutura
	P12	PP(4)	Polypropylene	Sinterit
	P13	PLA(1)	Polylactic Acid	DevilDesign
PLA	P14	PLA(2)	Polylactic Acid	3DJake
	P15	PLA(3)	Polylactic Acid	Rosa3D
	P16	PLA(4)(high-density)	Polylactic Acid	DevilDesign
	P17	PLA(5)(Wood)	Polylactic Acid (wood additive)	Rosa3D
	P18	PLA(6)(Wood)	Polylactic Acid (wood additive)	Fiberlogy
	P19	PLA(7)(Stone)	Polylactic Acid (stone additive)	FormFutura
	P20	PLA(8)(Stone)	Polylactic Acid (stone additive)	FormFutura
	P21	PLA(9)(Metal)	Polylactic Acid (copper additive)	FormFutura
	P22	PETG(1)	Polyethylene Terephthalate Glycol	Spectrum
PETG	P23	PETG(2)	Polyethylene Terephthalate Glycol	PrusaPolymers
	P24	PETG(3)(Z-Glass)	Polyethylene Terephthalate Glycol (glass additive)	ZortaxMaterials
	P25	PETG(4)(MDT)	Polyethylene Terephthalate Glycol (iron oxide additive)	SmartMaterials3D
PA (Nylony)	P26	PA6/PA66(Normid1030)	Polyamide 6/66 (Nylon 6/66)	DMS
	P27	PA11	Polyamide 11 (Nylon 11)	Sinterit
	P28	PA12(1)	Polyamide 12 (Nylon 12)	Fiberlogy
	P29	PA12(2)	Polyamide 12 (Nylon 12)	OrbiTech
	P30	PA12(3)	Polyamide 12 (Nylon 12)	Sinterit

Tabela A2: Specyfikacja próbek wytworzonych przy użyciu technologii druku 3D FDM i SLS (pogrubione i zaznaczone na niebiesko). Właściwości optyczne wytworzonych próbek zostały następnie określone przy użyciu THz TDS.

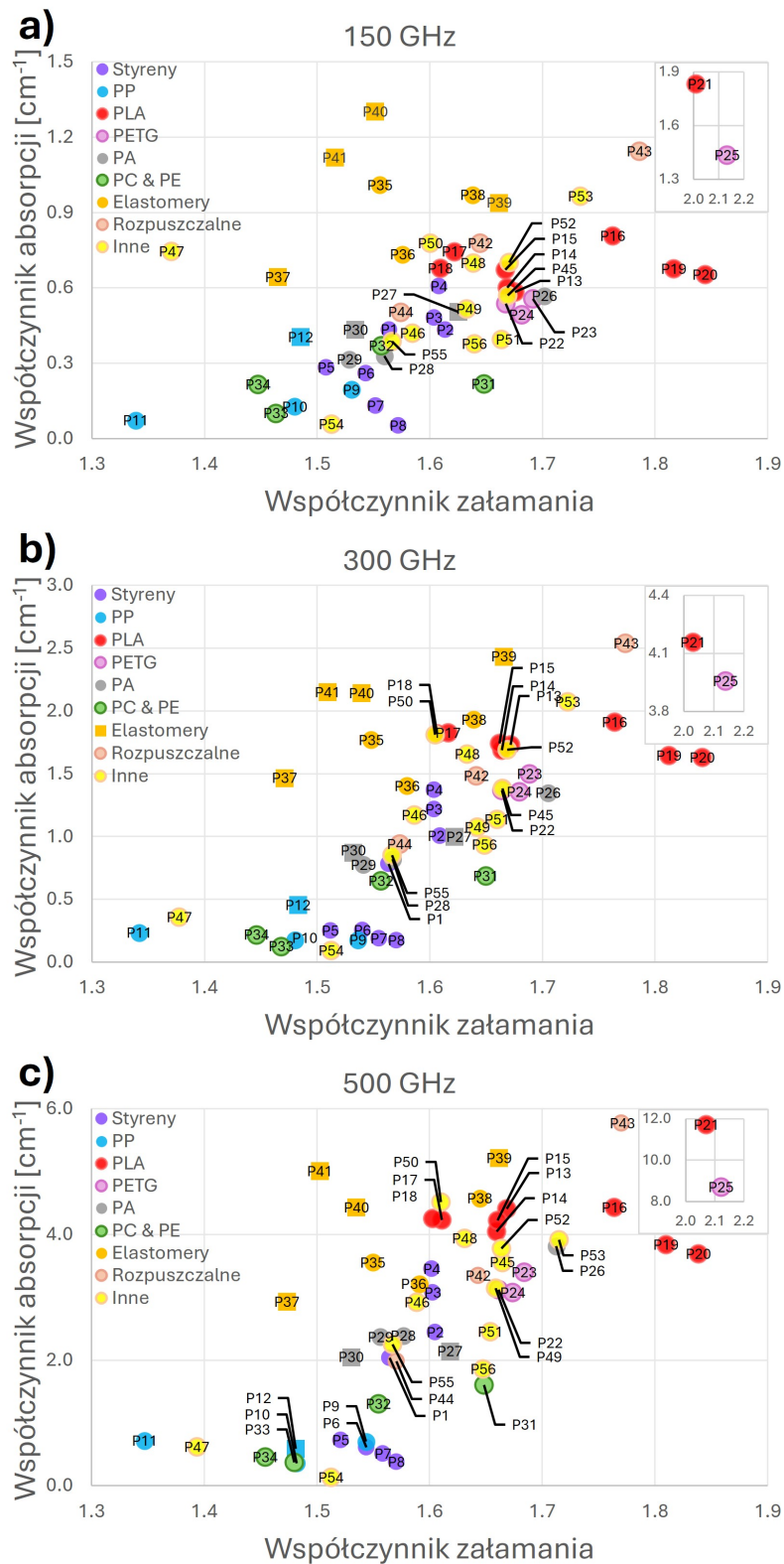
Grupa	ID próbki	Nazwa: typ polimeru (numer/nazwa handlowa/dodatki)	Rodzina chemiczna bazowego polimeru	Producent
PC i PE	P31	PC	Polycarbonate	OrbiTech
	P32	PC+PTFE	Mixture of Polycarbonate and Polytetrafluoroethylene	Rosa3D
	P33	HDPE	High-Density Polyethylene	FilamentsCa
	P34	LLDPE	Linear Low-Density Polyethylene	FilamentsCa
	P35	TPE(1)(FiberFlex30D)	Butylene Poly(alkylene ether) Phthalate Copolymer	Fiberlogy
Elastomery	P36	TPE(2)(FiberFlex40D)	Butylene Poly(alkylene ether) Phthalate Copolymer	Fiberlogy
	P37	TPE(3)	Thermoplastic Elastomer	Sinterit
	P38	TPU(1)(PolyFlex)	Thermoplastic Polyurethane (TPU95)	Polymaker
	P39	TPU(2)(Flexa-Bright)	Thermoplastic Polyurethane	Sinterit
	P40	TPU(3)(Flexa-Grey)	Thermoplastic Polyurethane	Sinterit
Polimery rozpuszczalne	P41	TPU(4)(Flexa-Soft)	Thermoplastic Polyurethane	Sinterit
	P42	BVOH	Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer	Fiberlogy
	P43	PVA(AquaSolve)	Polyvinyl Alcohol	FormFutura
	P44	PVB	Polyvinyl Butyral	Rosa3D
	P45	BioCreate	Biopolymer (nie określony)	Rosa3D
Inne	P46	Cleaner(1)	nie określony	F3D
	P47	Cleaner(2)	nie określony	Noctuo
	P48	FiberSilk	Biopolymer (nie określony)	Fiberlogy
	P49	LayBrick	Polymerblend based on copolyesters, calcium carbonate, water, plasticizer (PEG)	OrbiTech
	P50	MoldLay	Copolyester, Wax-Resin (nie określony)	OrbiTech
Kompozyty węglowe	P51	nGen	Copolyester (Eastman Amphora AM3300 3D Polymer)	ColorFabb
	P52	Silk	Poly lactide resin (copolymer of neopentyl glycol and ethylene glycol terephthalate)	DevilDesign
	P53	Skulpt-Thriba3D	2-Oxepanone	MCPP
	P54	COC	Cyclic Olefin Copolymer	Creamelt
	P55	PMMA(3Diakon)	Polymethyl Methacrylate	MCPP
	P56	POM(Tarfuse)	Polyoxymethylene Copolymer	GrupaAzoty
	P57	PETG(CarbonFil)	Polyethylene Terephthalate Glycol (carbon additive)	FormFutura
	P58	PETG(XT-CF20)	Polyethylene Terephthalate Glycol (carbon additive)	ColorFabb
	P59	PA11(CF)	Polyamide 11 (carbon additive)	Sinterit
	P60	PA11(ESD)	Polyamide 11 (carbon additive)	Sinterit

Załącznik 3: Właściwości optyczne polimerów w zakresie promieniowania THz

Właściwości optyczne wytworzonych próbek opisanych w Podrozdziale 5.1 zostały zbadane przy użyciu THz TDS zgodnie z opisem z Podrozdziału 4.1. Określono współczynnik absorpcji i współczynnik załamania materiałów polimerowych, materiałów kompozytowych oraz materiałów odlewniczych. Graficzne przedstawienie obu parametrów optycznych dla częstotliwości 150 GHz, 300 GHz oraz 500 GHz dla próbek wytworzonych metodami druku przestrzennego przedstawiono na Rysunku A2 oraz dla próbek wytworzonych metodą odlewniczą znajduje się na Rysunku A6 w Aneksie do pracy w Załączniku 6. Na Rysunku A2 próbki wyprodukowane w technologii FDM oznaczono kółkami, a próbki wyprodukowane w technologii SLS oznaczono kwadratami. Próbki polimerowe zostały podzielone na dziewięć grup, biorąc pod uwagę rodzaj polimeru, podczas gdy próbki odlewnicze podzielono na cztery grupy.

Materiały polimerowe zawierające dodatki włókna węglowego praktycznie całkowicie tłumiły promieniowanie THz. Materiały z dodatkami węglowymi oznaczono jako P57 do P60 w Tabeli A2. Biorąc pod uwagę ich niezwykle wysoki współczynnik absorpcji, precyzyjne określenie ich właściwości optycznych było obarczone dużym błędem, dlatego też właściwości optyczne wspomnianych materiałów nie zostały uwzględnione w dalszych analizach. Należy jednak podkreślić, że elementy wytwarzane z materiałów z dodatkiem węglowym znajdują zastosowanie w THz układach optycznych jako elementy blokujące promieniowanie THz, które chronią elementy układów THz przed niepożądanym promieniowaniem THz [190,191].

Analizując Rysunek A2a – A2c można zauważyć, że znacząca część danych pomiarowych rozmieszczona jest wzdłuż przekątnej każdego z wykresów. Dlatego materiały o niskiej wartości współczynnika absorpcji posiadają przeważnie stosunkowo niskie wartości współczynnika załamania. Natomiast, materiały wykazujące wysokie wartości współczynnika absorpcji posiadają wysoki współczynnik załamania. Ponadto, w przypadku większości polimerów wartość współczynnika absorpcji silnie wzrasta wraz z częstotliwością. Wartości współczynników załamania materiałów dla wszystkich trzech analizowanych częstotliwości nieznacznie się różnią, na co wskazuje podobne położenie



Rysunek A2: Właściwości optyczne próbek wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM oraz SLS w odniesieniu do częstotliwości THz; a) – c) dane pomiarowe przedstawione odpowiednio dla częstotliwości 150 GHz, 300 GHz i 500 GHz. Próbki wykonane w technologii FDM oznaczono kółkami, a próbki wykonane w technologii SLS oznaczono kwadratami.

prezentowanych danych na osi poziomej (osi x) na każdym z wykresów. W związku z tym przedstawione wyniki nie wykazują znaczącej dyspersji materiałowej w badanym zakresie spektralnym.

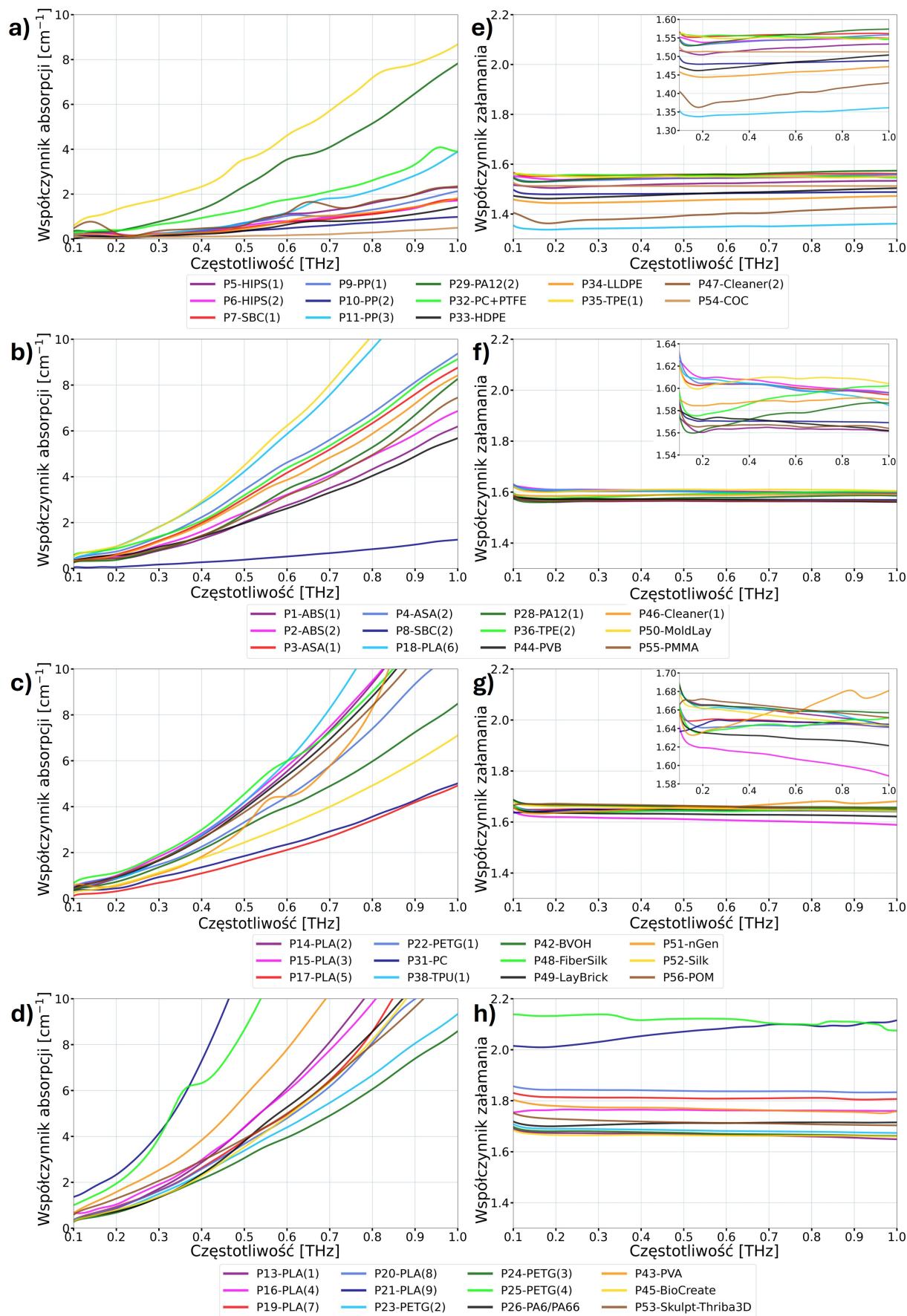
Próbki wydrukowane w technologii SLS i FDM z tych samych rodzajów materiałów nie posiadają znacząco różniących się właściwości optycznych w badanym zakresie promieniowania THz. Próbki należące do grupy elastomerów (P35 – P41), PA (P26 – P30), PLA (P13 – P21), PETG (P22 – P25), materiałów rozpuszczalnych (P42 – P44) oraz znacząca część "innych materiałów" (grupa oznaczona jako P45 – P56) wykazują znacznie wyższe wartości współczynników absorpcji w porównaniu do pozostałych próbek. Większość materiałów styrenowych (P1 – P8) i PP (P9 – P12), a także próbki takie jak: P54-COC, P33-HDPE i P34-LLDPE mają najniższe wartości współczynnika absorpcji ze wszystkich badanych materiałów dla wszystkich trzech analizowanych częstotliwości. Jednocześnie ich współczynnik załamania przyjmuje wartości od 1,34 do 1,57. Sprawia to, że są one materiałami o odpowiednich właściwościach optycznych do produkcji fazowych DOE dla systemów działających w zakresie promieniowania THz. Ponadto, różnice w wartościach współczynnika załamania wspomnianych materiałów pozwalają na wybór odpowiedniego materiału w oparciu o konkretne wymagania aplikacyjne czy też projektowe.

Następnie próbki polimerowe wydrukowane w technologii FDM podzielono na cztery grupy. Podziału dokonano na podstawie współczynnika załamania próbek, z których każda grupa przedstawia właściwości optyczne dwunastu (lub trzynastu) materiałów. Wyniki pomiarów THz TDS zostały przedstawione na Rysunku A3, gdzie notacja a–d odpowiada charakterystyce współczynnika absorpcji każdej grupy, natomiast notacja e–h odpowiada charakterystyce współczynnika załamania (od najmniejszych do największych wartości). Do analizy danych przedstawionych na Rysunku A3 wybrano wspólny zakres współczynnika absorpcji (od 0 cm^{-1} do 10 cm^{-1}) oraz współczynnika załamania światła (od 1,3 do 2,2), umożliwiając rzetelne porównanie uzyskanych wyników pomiarów. Dodatkowo dla Rysunków A3e-A3g dodano dodatkowe wstawki pozwalające na szczegółowe rozróżnienie współczynników załamania badanych próbek. Wszystkie wykresy wykreślone zostały w dziedzinie częstotliwości dla zakresu promieniowania od 0,1 THz do 1 THz. Zakres ten odpowiada częstotliwościom, dla których najczęściej wytwarza się pasywne elementów optycznych działające

w zakresie promieniowania THz przy użyciu druku 3D. Właściwości optyczne materiałów odlewniczych w dziedzinie częstotliwości z zakresu THz zostały przedstawione w Aneksie do pracy w Załączniku 6 na Rysunku A7.

Dane przedstawione na Rysunku A3a i Rysunku A3e dotyczą 13 materiałów o najniższych wartościach współczynnika załamania ($n < 1,56$) spośród badanych próbek polimerów (biorąc pod uwagę częstotliwość 0,5 GHz). Większość materiałów w tej grupie posiada niskie wartości współczynnika absorpcji w całym analizowanym zakresie od 0,1 THz do 1 THz. Współczynnik załamania większości materiałów mieści się w zakresie od 1,45 do 1,56. P54-COC jest wyróżniającym się materiałem z analizowanej grupy, ponieważ jego wyjątkowo niska wartość współczynnika absorpcji i współczynnik załamania w przybliżeniu równy 1,51 sprawiają, że P54-COC jest wysoce transparentnym odpowiednikiem szkła dla promieniowania THz. Innym materiałem o charakterystycznych właściwościach optycznych jest P11-PP(3)(Pegasus). P11-PP(3)(Pegasus) posiada niską wartość współczynnika załamania (równą w przybliżeniu 1,34). Sprawia to, że może być on użyty do zastosowań, w których do stworzenia elementu optycznego wymagane jest połączenie dwóch komponentów wykazujących różne właściwości optyczne (zwłaszcza różne współczynniki załamania), np. do struktur falowodowych [192]. W przypadku elementów optycznych wytworzonych z materiałów o wyższych współczynnikach załamania, P11-PP(3)(Pegasus) może być również stosowany jako powłoka antyrefleksyjna, która zmniejsza wpływ strat związanych z niepożądanymi odbiciami Fresnela.

Rysunek A3b, Rysunek A3c, Rysunek A3f i Rysunek A3g ilustrują uzyskane wyniki dla grup próbek posiadających wartości współczynnika załamania światła w zakresie od 1,56 do 1,61 i od 1,61 do 1,66 (biorąc pod uwagę częstotliwość 0,5 GHz). Należy podkreślić, że próbki te wykazują typowe zmiany właściwości optycznych wraz ze wzrostem częstotliwości z zakresu THz dla materiałów polimerowych. Dla niskich częstotliwości sub-THz, wartość współczynnika absorpcji materiałów jest stosunkowo niska, co czyni próbki transparentnymi obiektami w zakresie promieniowania sub-THz. Wraz ze wzrostem częstotliwości wzrasta tłumienie promieniowania wprowadzane przez te materiały. Sprawia to, że ta grupa materiałów nie jest odpowiednia do typowych zastosowań optycznych dla wyższych częstotliwości z zakresu promieniowania THz. Należy wspomnieć, że P8-SBC(2)(CrystalFlex), który jest jednym z materiałów w analizowanych grupach, ma znacznie niższe wartości współczynnika absorpcji niż pozostałe.



Rysunek A3: Właściwości optyczne próbek polimerowych wytworzonych przy użyciu druku 3D w technologii FDM w zakresie promieniowania od 0,1 THz do 1 THz; a) – d) współczynnik absorpcji; e) – h) współczynnik załamania.

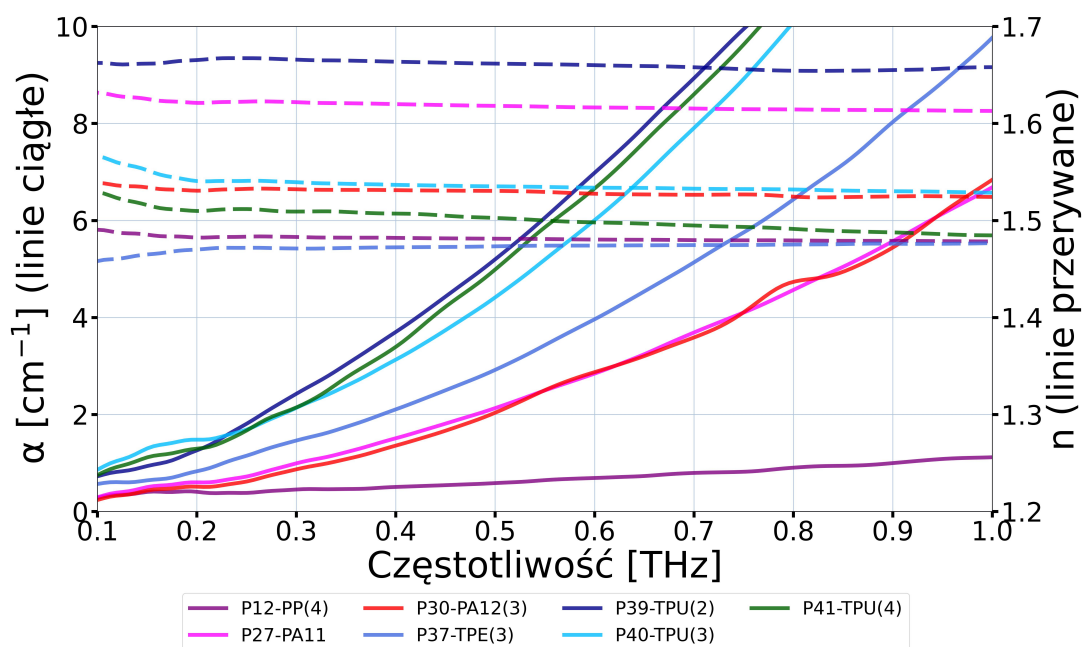
Próbka wytworzona z P8-SBC(2)(CrystalFlex) ma najwyższą wartość współczynnika załamania równą w przybliżeniu 1,57 w porównaniu z innymi transparentnymi materiałami polimerowymi dla analizowanego zakresu promieniowania THz w tej pracy. P8-SBC(2)(CrystalFlex) ma nieznacznie wyższą wartość współczynnika absorpcji niż wcześniej wspomniany P54-COC, jednak stosunkowo wysoka wartość współczynnika załamania P8-SBC(2)(CrystalFlex) czyni go odpowiednią alternatywą do produkcji DOE.

Właściwości optyczne ostatniej grupy próbek posiadających wartości współczynnika załamania powyżej 1,67 (biorąc pod uwagę częstotliwość 0,5 GHz) przedstawiono na Rysunku A3d oraz Rysunku A3h. Próbki te posiadają najwyższą wartość współczynnika załamania spośród badanych polimerów, ale także najwyższą wartość współczynnika absorpcji. W tej grupie dominują materiały PETG i PLA z różnymi rodzajami dodatków. Dodatki te umożliwiają zwiększenie wartości współczynnika załamania bazowego materiału polimerowego, dzięki czemu polimery stają się nowym rodzajem materiałów kompozytowych. W analizowanej grupie dwa materiały (P25 – PETG(4) i P21 – PLA(9)) przyciągają szczególną uwagę ze względu na ich wartości współczynnika załamania, które znacznie przekraczają 2. Wymienione materiały są kompozytami bazy polimerowej z dodatkiem sproszkowanego metalu. Należy podkreślić, że wyższy współczynnik załamania zwiększa straty odbiciowe Fresnela na granicy dwóch ośrodków, przy założeniu, że pomiary są wykonywane w powietrzu/próżni (gdzie współczynnik załamania promieniowania jest równy 1).

Wartości współczynnika załamania większości materiałów polimerowych (przedstawione na Rysunku A3) nie zmieniają się znacząco w analizowanym zakresie częstotliwości, dlatego też nie stwierdzono znaczącej dyspersji materiałowej polimerów dla analizowanego zakresu spektralnego. Należy podkreślić, że materiały polimerowe wykazują różne właściwości optyczne zarówno w odniesieniu do współczynnika absorpcji, jak i współczynnika załamania. Stanowi to istotną różnorodność w doborze właściwości materiałów w procesie projektowania elementów optycznych dla systemów działających w zakresie promieniowania THz.

Załącznik 4: Właściwości optyczne polimerów używanych w druku 3D w technologii SLS

Właściwości optyczne próbek drukowanych 3D przy użyciu technologii SLS z materiałów polimerowych w postaci proszku zostały zmierzone przy użyciu THz TDS. Wyniki pomiarów przedstawiono na Rysunku A4. Linie ciągłe odpowiadają wartościom współczynnika absorpcji α mierzonych próbek w zakresie częstotliwości od 100 GHz do 1 THz. Linie przerywane przedstawiają wartości współczynnika załamania n zmierzonych próbek w tym samym zakresie spektralnym.



Rysunek A4: Właściwości optyczne próbek wydrukowanych w technologii SLS. Rysunek przedstawia wartości współczynnika załamania (linie przerywane) i współczynnika absorpcji (linie ciągłe) w zakresie częstotliwości od 0,1 THz do 1 THz.

Analizując Rysunek A4 zaobserwowano znacznie niższe wartości współczynnika absorpcji próbki materiału P12-PP(4) w porównaniu z innymi próbkami. Półki wydrukowane przy użyciu elastomerów wykazywały najwyższe wartości współczynnika absorpcji z analizowanej grupy, zwłaszcza próbki TPU. Współczynnik absorpcji próbek nylonowych (P27-PA11 i P30-PA12(3)) był ponad dwukrotnie niższy niż współczynnik absorpcji próbek TPU. Należy podkreślić, że pomimo podobnych wartości

współczynnika załamania obu próbek nylonu, PA11 posiada znacznie wyższe wartości współczynnika załamania (różnica równa w przybliżeniu 0,09 dla częstotliwości 500 GHz). Nie zaobserwowano znaczących różnic we właściwościach optycznych próbek wytworzonych w technologii SLS w porównaniu do tych wyprodukowanych w technologii FDM. Dodatkowo warto zauważyć, że dwa z badanych materiałów, P59-PA11(CF) i P60-PA11(ESD), nie zostały uwzględnione w charakterystyce ze względu na bardzo dużą wartość tłumienia materiału spowodowaną obecnością dodatków węglowych w bazie polimerowej.

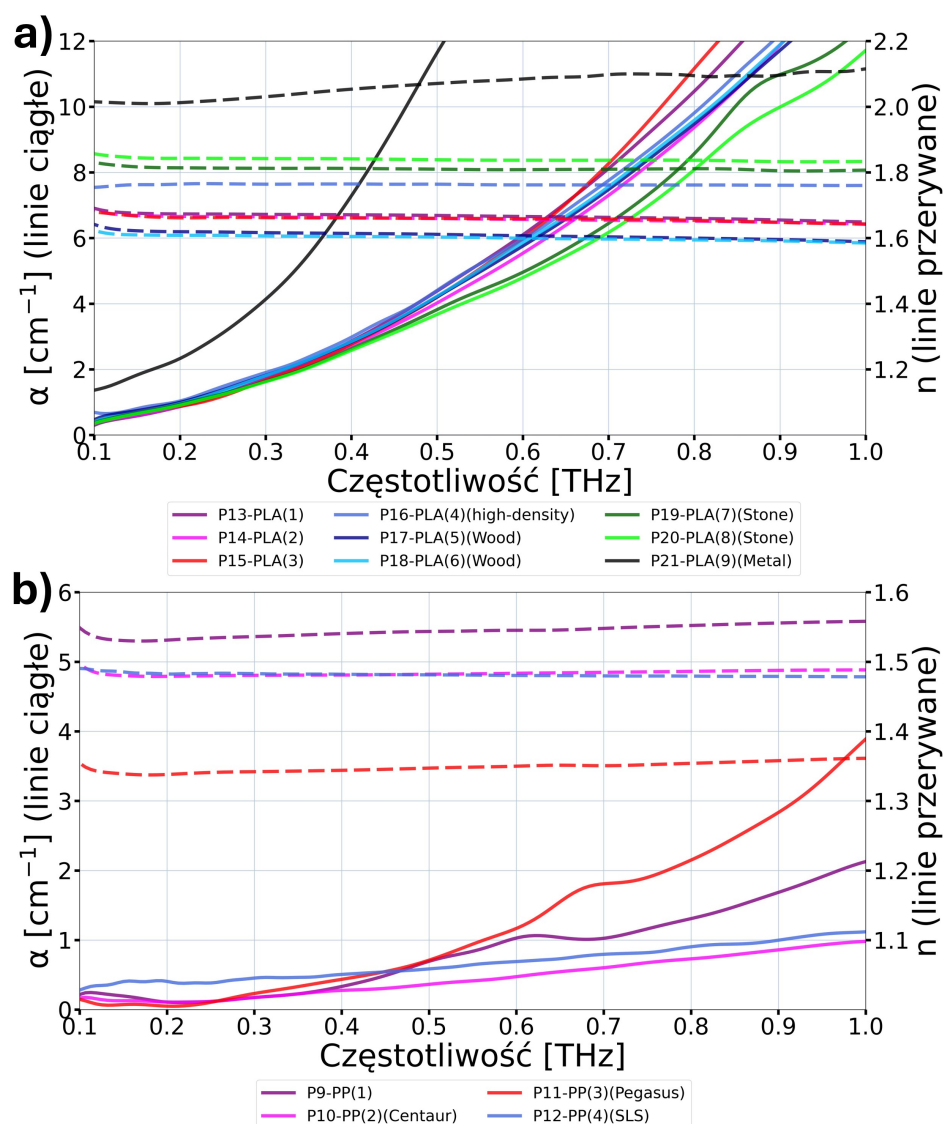
Należy również podkreślić, że w technologii SLS jest dostępnych znacznie mniej rodzajów materiałów niż w technologii FDM. Technologia SLS jest jednak dobrą alternatywą do wytwarzania DOE działających w zakresie promieniowania THz, na przykład z transparentnego materiału P12-PP(4), zwłaszcza biorąc pod uwagę, że technologia druku SLS zapewnia wyższą rozdzielczość niż technologia FDM.

Załącznik 5: Wpływ składu polimerów na właściwości optyczne wytworzonych próbek

W tej części pracy przedstawiono analizę właściwości optycznych próbek wydrukowanych przy użyciu druku 3D w technologii FDM z materiału PLA i jego kompozytów (próbki oznaczone od P13 do P21 w Tabeli A1). Uzyskane wyniki dla dziewięciu różnych wariantów próbek PLA przedstawiono na Rysunku A5a. Linie przerywane odnoszą się do współczynnika załamania n zmierzonych próbek, a linie ciągłe przedstawiają współczynnik absorpcji α próbek w dziedzinie częstotliwości w zakresie od 100 GHz do 1 THz. Dane dotyczą próbek z materiału PLA wytworzonych przez różnych producentów (P13 - P15), materiału PLA o zwiększonej gęstości (P16) oraz materiałów kompozytowych (P17 - P21). Materiały kompozytowe zawierają dodatki drewna, kamienia lub metalu.

Nie zaobserwowano różnic we właściwościach optycznych próbek PLA wyprodukowanych przez różnych producentów (P13-PLA(1), P14-PLA(2) i P15-PLA(3)). Jednakże, wartość współczynnika załamania próbki o większej gęstości (P16-PLA(4)(high-density)) jest równy w przybliżeniu 1,76. Jest to znacznie wyższa wartość w porównaniu do wartości współczynnika załamania próbek P13 - P15. Tłumienie promieniowania THz wprowadzanego przez próbkę P16-PLA(4) jest podobne do wcześniej wspomnianych próbek PLA.

Próbki wytworzone z materiału PLA z dodatkami mają właściwości optyczne, które znacznie odbiegają od właściwości typowego PLA. Dodatki drewna w bazie PLA (próbki oznaczone P17-PLA(5)(Wood) i P18-PLA(6)(Wood)) skutkują obniżeniem wartości współczynnika załamania materiału. Dodatki kamienia (próbki oznaczone P19-PLA(7)(Stone) i P20-PLA(8)(Stone)) spowodowały znaczny wzrost wartości współczynnika załamania i niewielki spadek wartości współczynnika absorpcji próbek. Zaobserwowane zachowanie można uznać za poprawę właściwości optycznych materiału bazowego pod względem zastosowań optyki THz. Z badanej grupy próbka z dodatkiem metalu (P21-PLA(9)(Metal)) posiada najwyższe wartości współczynnika załamania przekraczające 2. Tłumienie promieniowania wprowadzane przez tę próbkę było również znacznie wyższe niż w przypadku innych próbek spośród analizowanej grupy, jednakże materiał P21-PLA(9)(Metal) jest wart rozważenia w zastosowaniach, w których wymagany jest wysoki współczynnik absorpcji oraz praca w zakresie niskich częstotliwości (sub-THz).



Rysunek A5: Współczynnik załamania (linie przerywane) i współczynnik absorpcji (linie ciągłe) w dziedzinie częstotliwości w zakresie od 0,1 THz do 1 THz. Dane dotyczą: a) próbek PLA i jego kompozytów wytworzonych przy użyciu technologii FDM; b) próbek wytworzonych z materiałów PP o różnej gęstości (od różnych producentów) przy użyciu druku 3D w technologii FDM oraz SLS.

Podsumowując, parametry optyczne materiału PLA można modyfikować poprzez zastosowanie różnych rodzajów dodatków. Należy podkreślić, że wszystkie próbki (z wyjątkiem P21-PLA(9)(Metal)) wykazywały podobne wartości współczynnika absorpcji, szczególnie w zakresie częstotliwości od 0,1 THz do 0,5 THz. Jednak dodatki znacząco zmieniały wartości współczynnika załamania próbek. Jest to niezwykle

intrygujące zjawisko, które będzie przedmiotem szczegółowych analiz w kolejnych badaniach. Dalsze badania mogą również przyczynić się do określenia odpowiednich dodatków oraz ich stężenia (ilości) w tworzeniu konkretnych kompozytów polimerowych, umożliwiając dostosowanie kompozytów do wymagań aplikacyjnych lub technologicznych.

Kolejna analiza dotyczy czterech różnych rodzajów próbek PP. Próbki P9-PP(1), P10-PP(2)(Centaur) i P11-PP(3)(Pegasus) zostały wytworzone przy użyciu technologii FDM z materiału PP o różnych gęstościach o wartościach odpowiednio $1,04 \text{ g/cm}^3$, $0,90 \text{ g/cm}^3$ i $0,75 \text{ g/cm}^3$. Próbką P12-PP(4)(SLS) została wyprodukowana z proszku PP przy użyciu technologii SLS. Rysunek A5b przedstawia współczynnik załamania n (linie przerywane) i współczynnik absorpcji α (linie ciągłe) w dziedzinie częstotliwości THz dla wszystkich czterech badanych próbek.

PP wykazuje bardziej pożądane właściwości optyczne w porównaniu do PLA, biorąc pod uwagę zastosowania, w których wymagane są transparentne elementy optyczne (współczynniki absorpcji próbek PP są znacznie niższe niż próbek PLA). Należy wspomnieć, że analizowane wyniki dla próbek PP miały podobne, relatywnie niskie wartości współczynnika absorpcji w zakresie częstotliwości od 0,1 GHz do 0,6 GHz. Jednak ich wartości współczynnika załamania znacznie się różniły. Próbki o niskiej gęstości (P11-PP(3)(Pegasus)) ($0,75 \text{ g/cm}^3$) wykazywały najniższe wartości współczynnika załamania równe w przybliżeniu 1,34. Próbki o typowej gęstości dla materiału PP równej $0,90 \text{ g/cm}^3$, (P10-PP(2)(Centaur) oraz P12-PP(4)(SLS)), miały wartości współczynnika załamania równe w przybliżeniu 1,48. Próbki o największej gęstości (P9-PP(1)) ($1,03 \text{ g/cm}^3$) posiadały wartości współczynnika załamania równy w przybliżeniu 1,54, czyli o około 0,20 więcej niż próbka P11-PP(3)(Pegasus). Pokazuje to, jak właściwości optyczne danego rodzaju polimeru mogą się znacząco różnić względem siebie, mimo tej samej nazwy filamentu. Dlatego szczegółowe badania właściwości optycznych materiałów mają kluczowe znaczenie dla zrozumienia specyfiki właściwości optycznych materiałów dystrybuowanych przez różnych producentów, a co za tym idzie pozwalają na dobranie odpowiednich materiałów do konkretnych zastosowań.

Załącznik 6: Właściwości optyczne materiałów odlewniczych w zakresie THz

Pomiary THz TDS przeprowadzono również na czterech różnych grupach materiałów odlewniczych. Są to grupy takie jak: woski i parafiny, gliny, mydła, a także różne rodzaje czekolady. Próbkę do tej części badania została wytworzona metodą odlewniczą poprzez wypełnienie formy podgrzanym, roztopionym materiałem. Następnie próbki zostały schłodzone oraz wyjęte z form. Ich powierzchnie zostały wygładzone, a grubość próbek została precyzyjnie zmierzona przy użyciu śruby mikrometrycznej. Lista wszystkich materiałów odlewniczych została przedstawiona w Tabeli A3. W kolumnie "Typ/nazwa handlowa" do opisu użyto nazewnictwa anglojęzycznego.

Właściwości optyczne próbek wytworzonych metodą odlewniczą dla częstotliwości 150 GHz, 300 GHz oraz 500 GHz zostały przedstawione na Rysunku A6. Z kolei współczynnik absorpcji (linie ciągłe) oraz współczynnik załamania (linie przerywane) dla tych próbek w zakresie częstotliwości od 100 GHz do 1 THz zaprezentowano na Rysunku A7. Oznaczenia materiałów na Rysunku A6 oraz Rysunku A7 są spójne z Tabelą A3.

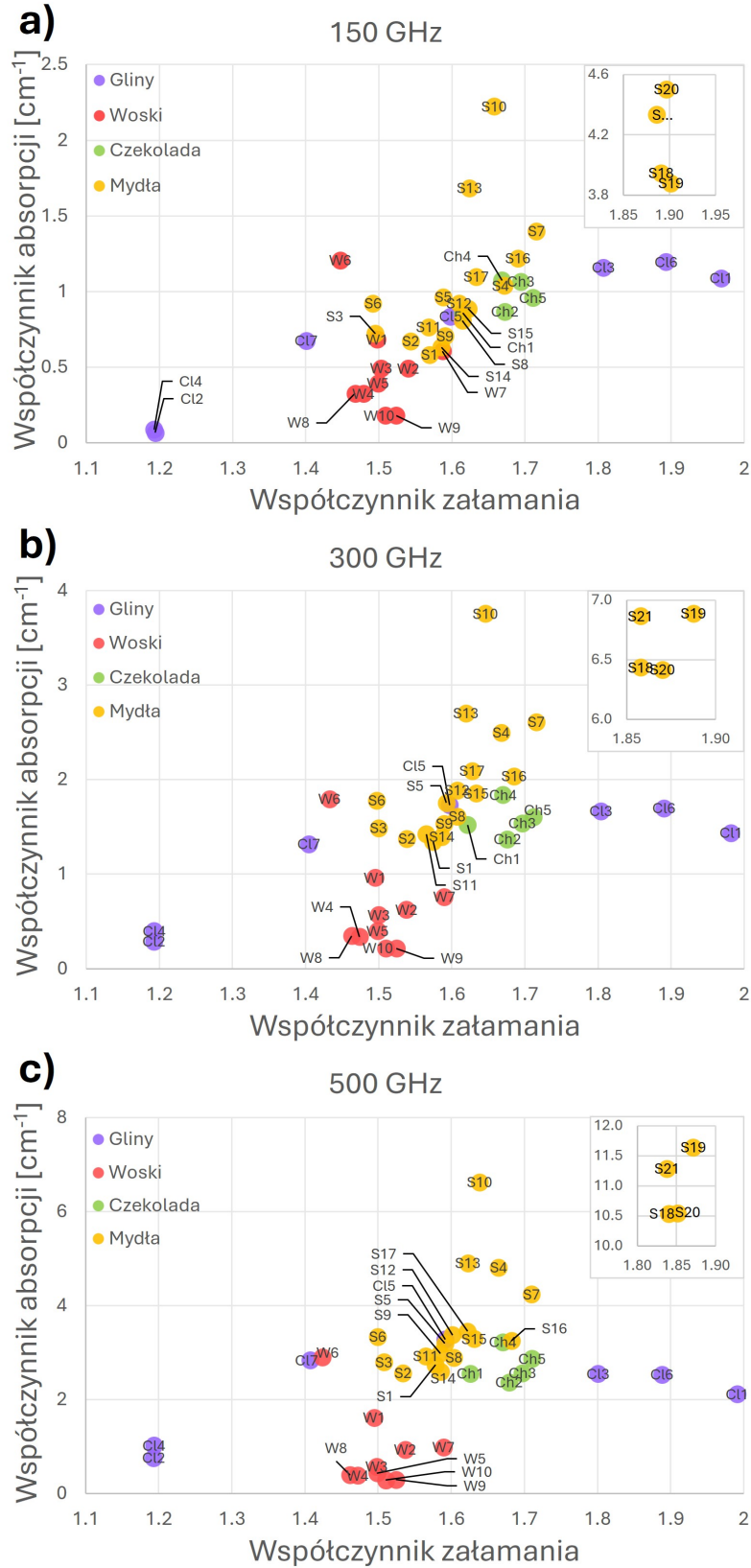
Na Rysunku A6a – A6c zaznaczono kolorem fioletowym zmierzone właściwości optyczne siedmiu różnych rodzajów glin. Uzyskane wyniki dla glin rozciągają się wzdłuż każdego wykresu. Oprócz dwóch rodzajów gliny, Cl2 i Cl4, wszystkie zmierzone próbki posiadają podobne wartości współczynnika absorpcji mieszczące się w obrębie pierwszej połowy skali osi y . Próbkę gliny oznaczoną jako Cl2 i Cl4 mają znacznie niższe wartości współczynnika załamania od pozostałych, jedynie około 1,2. Należy podkreślić, że wartości współczynnika załamania próbek wytworzonych z gliny obejmują szeroki zakres w przybliżeniu od 1,2 do 2 dla wszystkich trzech analizowanych częstotliwości. Umożliwia to wybór materiałów z tej grupy, które wprowadzają znacząco różne opóźnienia fazowe promieniowania THz. Jednocześnie tłumienie promieniowania THz wprowadzane przez gliny jest podobne. W ten sposób pasywne struktury optyczne, pracujące w reżimach transmisji, wytworzone z różnego rodzaju glin, pełniące tę samą funkcjonalność, będą posiadały znacznie różniące się grubości.

Drugim rodzajem badanych materiałów odlewniczych były różne rodzaje woski i parafiny. Grupa ta obejmowała dziesięć próbek oznaczonych od W1 do W10, zaznaczonych na

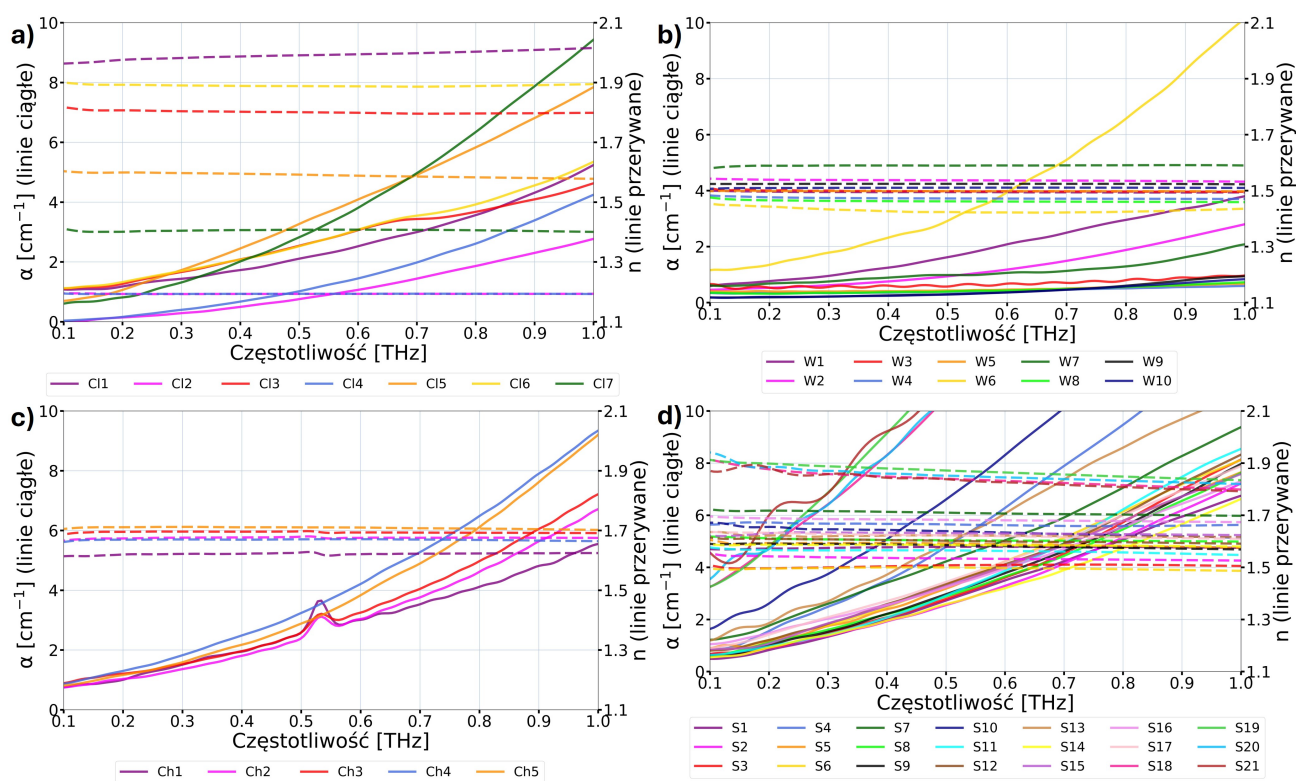
czerwono na Rysunku A6a – A6c. Próbkę wytworzone z wosków i parafin mają najniższe wartości współczynnika absorpcji spośród ocenianych materiałów odlewniczych dla każdej analizowanej częstotliwości (z wyjątkiem W6 - wosku palmowego). Tymczasem ich wartości współczynnika załamania zawierają się w zakresie od 1,4 do 1,6, co czyni je odpowiednimi materiałami do THz zastosowań optycznych wymagających transparentnych komponentów. Wartość współczynnika absorpcji próbek wytworzonych z gliny i wosku rośnie znacznie wolniej wraz ze wzrostem częstotliwości w porównaniu z próbkami wytworzonymi z czekolady i mydła. W związku z tym ich właściwości optyczne są znacznie lepsze biorąc pod uwagę wyższy zakres badanych częstotliwości (tłumią mniejszą część sygnału THz).

Tabela A3: Lista próbek wytworzonych metodą odlewniczą. Właściwości optyczne wytworzonych próbek zostały zmierzone przy użyciu THz TDS.

Grupa	ID próbki	Typ/nazwa handlowa	Grupa	ID próbki	Nazwa handlowa	Producent
Gliny	Cl1	Darwi classic	Mydła	S1	Arko (type 1)	Evyap Germany GmbH
	Cl2	Darwi extra light		S2	Arko (type 2)	Evyap Germany GmbH
	Cl3	FIMO air basic		S3	Arko (type 3)	Evyap Germany GmbH
	Cl4	FIMO air light		S4	Dove	Unilever
	Cl5	FIMO soft		S5	Fa	Schwarzkopf & Henkel
	Cl6	KERA plast		S6	Cien	Betasoap
	Cl7	PatMache		S7	Protex	Colgate-Palmolive
woski i parafiny	W1	natural soy wax		S8	Maliza Uomo	Mirato
	W2	beeswax		S9	Marsiglia	Nesti Dante
	W3	paraffin wax		S10	Alga Bio	Alga Bio
	W4	paraffin wax with hardener		S11	Barwa	Barwa
	W5	paraffin wax with ceresin		S12	Biały Jeleń	Pollena
	W6	palm wax		S13	Dudu Osun	Tropical Naturals Ltd.
	W7	plant stearin		S14	Make Me Bio	Make Me Bio
	W8	transparent wax (type 1)		S15	Mohani	Mohani
	W9	white wax (type 2)		S16	Sulsena	CHP "Pobudagrokhimserivis"
	W10	paraffin reused		S17	Vis Plantis	Elfa Pharm
Czekolada	Ch1	white (type 1)		S18	Ecoflores (type 1)	Ecoflores
	Ch2	white (type 2)		S19	Ecoflores (type 2)	Ecoflores
	Ch3	dark (type 1)		S20	Ecoflores (type 3)	Ecoflores
	Ch4	dark (type 2)		S21	Ecoflores (type 4)	Ecoflores
	Ch5	dark (type 3)				



Rysunek A6: Właściwości optyczne próbek wytworzonych przy użyciu metody odlewniczej w odniesieniu do częstotliwości THz; a) - c) dane pomiarowe przedstawione odpowiednio dla częstotliwości 150 GHz, 300 GHz i 500 GHz.



Rysunek A7: Współczynnik absorpcji α (linie ciągłe) oraz współczynnika załamania n (linie przerywane) w dziedzinie częstotliwości z zakresu promieniowania THz próbek wytworzonych metodą odlewniczą. Przedstawione dane zostały uzyskane przy użyciu technologii THz TDS i dotyczą próbek wytworzonych z różnego rodzaju: a) gliny; b) wosku; c) czekolady; d) mydła.

Kolejna grupa materiałów odlewniczych zawiera próbki wytworzone z pięciu rodzajów czekolady, zaznaczone kolorem zielonym na Rysunku A6a – A6c. Próbki posiadają stosunkowo wysokie wartości współczynnika załamania zawierające się w zakresie od 1,61 do 1,71 oraz wartości współczynnika absorpcji w środkowej części każdego wykresu. Próbki wytworzone z ciemnej czekolady (Ch4 i Ch5) posiadają wyższe wartości współczynnika absorpcji niż próbki wytworzone z białej i mlecznej czekolady (Ch1, Ch2 i Ch3). Ponadto analizując Rysunek A7c można zauważyć piki absorpcyjne dla częstotliwości 0,53 THz dla próbek wyprodukowanych z białej i mlecznej czekolady (Ch1, Ch2 i Ch3), co wskazuje na obecność laktozy w próbce. Ponieważ laktoza nie jest składnikiem ciemnej czekolady, pików nie zaobserwowano w przypadku próbek Ch4 i Ch5.

Ostatnia grupa materiałów odlewniczych zawiera 21 różnych rodzajów mydła. Próbkę mydła są oznaczone symbolami od S1 do S21, kolorem pomarańczowym na Rysunku A6a – A6c. Badana grupa zawiera różne rodzaje mydeł roślinnych, zwierzęcych oraz baz glicerynowych. Zdecydowana większość próbek posiada współczynnik załamania w zakresie od 1,5 do 1,7 oraz współczynnik absorpcji w środkowej części zakresu wartości każdego wykresu. Należy jednak zauważyć, że wszystkie cztery badane bazy glicerynowe (S19 - S21) mają znacznie wyższe wartości współczynnika załamania zawierające się w zakresie od 1,8 do 1,9, a także znacznie wyższe wartości współczynnika absorpcji niż inne próbki wytworzone metodą odlewniczą.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że materiały odlewnicze charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami optycznymi, obejmującymi szeroki zakres współczynników załamania od 1,2 do 2. Pozwala to na precyzyjny dobór materiału do specyficznych zastosowań. Należy zauważyć, że woski wykazują najniższe wartości współczynnika absorpcji, co czyni je rekomendowanymi do produkcji transmisyjnych elementów optycznych w zakresie THz.

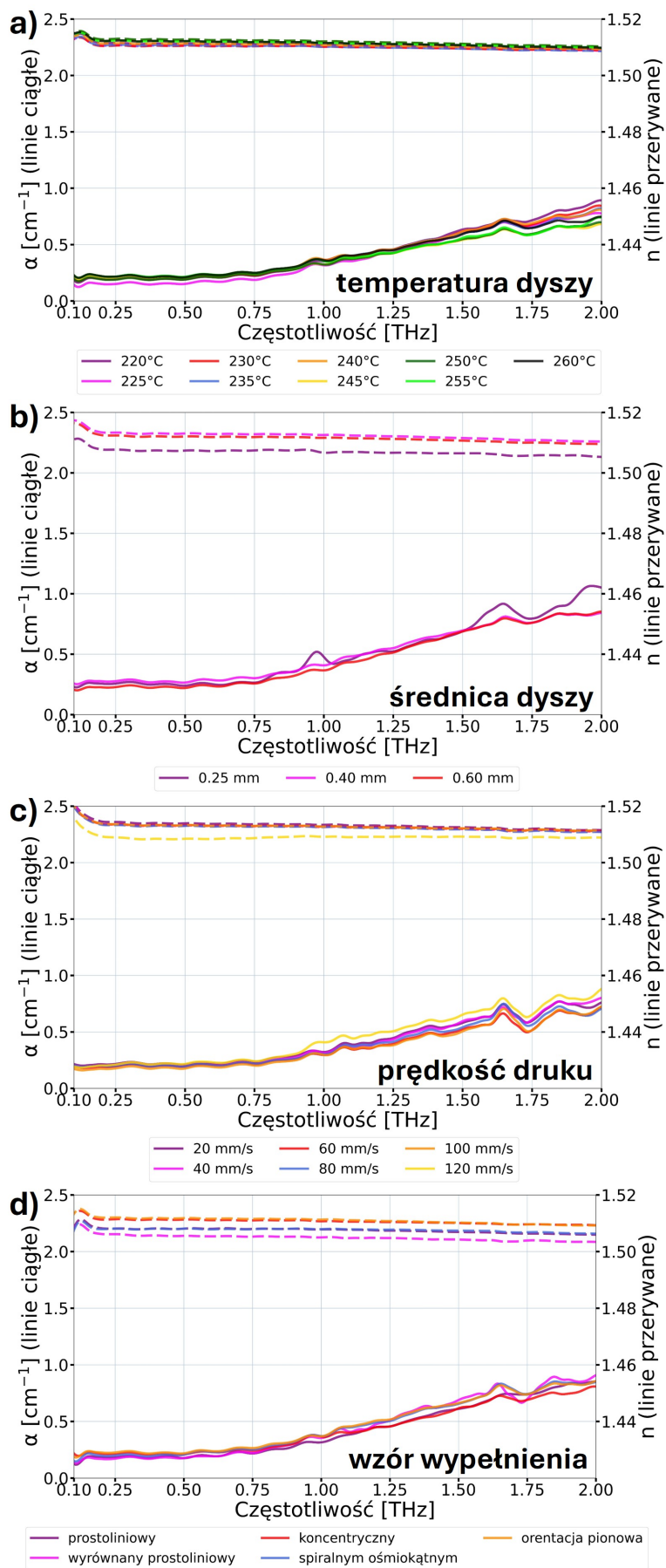
Jednakże, ze względu na ograniczenia technologiczne procesu produkcji oraz właściwości fizyczne materiałów odlewniczych, są one szczególnie polecane do wytwarzania soczewek refrakcyjnych. W przypadku optyki dyfrakcyjnej materiały te są odpowiednie jedynie do produkcji prostych, nieskomplikowanych struktur.

Załącznik 7: Parametry druku 3D niezmieniające właściwości optycznych obiektów wytworzonych z COC

Przedstawione dane w tym załączniku stanowią uzupełnienie wyników zaprezentowanych w Podrozdziale 5.2.2. Rysunek A8 przedstawia wyniki pomiarów THz TDS próbek, dla których nie zaobserwowano znaczącego wpływu parametrów druku 3D na właściwości optyczne wytworzonych obiektów. Na Rysunku A8 linie ciągłe reprezentują współczynnik absorpcji α próbek, a linie przerywane reprezentują współczynnik załamania n próbek przedstawiony w dziedzinie częstotliwości w zakresie od 100 GHz do 2 THz.

Analizując Rysunek A8a można zauważyć brak znaczącego wpływu temperatury druku na parametry optyczne próbek. Podobne zachowanie zaobserwowano w przypadku badania próbek wytworzonych przy użyciu trzech różnych rozmiarów dysz (Rysunek A8b). Jedynie próbki wydrukowane przy użyciu dyszy o średnicy 0,25 mm wykazały nieznaczny spadek wartości współczynnika załamania. Pomimo wyższej precyzji drukowania przy użyciu dyszy o najmniejszej testowanej średnicy, uzyskany wynik implikuje niewielki spadek objętościowej jednorodności wydrukowanych obiektów. Może to wynikać z błędnie dobranych pozostałych parametrów druku, które zostały zoptymalizowane pod kątem dyszy o średnicy 0,40 mm.

Dla parametru prędkości drukowania w zakresie od 20 mm/s do 100 mm/s nie zaobserwowano zmian we właściwościach optycznych próbek (Rysunku A8c). Należy jednak podkreślić, że badana prędkość drukowania dotyczy wypełnienia próbki. W przypadku bardziej złożonych struktur, takich jak DOE, profil przestrzenny obiektu wymusza zastosowanie większej ilości obrysów, co skutkuje zmniejszoną prędkością druku. Rekomendowana prędkość druku DOE umożliwiającą poprawne oddanie szczegółów modelu przestrzennego określona została w zakresie od 40 mm/s do 60 mm/s. W przypadku prędkości drukowania 120 mm/s zaobserwowano spadek wartości współczynnika załamania przy niewielkim wzroście wartości współczynnika absorpcji. Wskazuje to, że przy zbyt wysokiej prędkości drukowania precyzja wydruku jest zmniejszona, co skutkuje nierównomiernym rozmieszczeniem poszczególnych linii tworzących obiekt.



Rysunek A8: Właściwości optyczne próbek COC wydrukowanych przy zmianie parametrów druku: a) temperatury dyszy; b) średnicy dyszy; c) prędkości drukowania; d) wzoru wypełnienia [177].

Nie zaobserwowano również znaczących zmian właściwości optycznych próbek wytworzonych z różnym wzorem wypełnienia (Rysunku A8d). Wszystkie próbki posiadały podobne wartości współczynnika absorpcji. Próbki wydrukowane w pozycji pionowej, a także próbki posiadające koncentryczne i spiralne ośmiokątne wzory wypełnienia, wykazywały niższe wartości współczynnika załamania niż próbki wydrukowane z prostoliniowymi i wyrównanymi prostoliniowymi wzorami wypełnienia. Należy wspomnieć, że próbki wydrukowane z prostoliniowymi i wyrównanymi prostoliniowymi wzorami wykazują bardzo podobne właściwości optyczne w analizowanym zakresie promieniowania THz. Podczas gdy w świetle widzialnym (zdjęcia pokazane na Rysunku 5.4), próbka z wyrównanym prostoliniowym wzorem była znacznie bardziej transparentna.

Bibliografia

- [1] Li, S., Xu, L. D., and Zhao, S., “5G internet of things: A survey,” *Journal of Industrial Information Integration* **10**, 1–9 (June 2018).
- [2] Guo, F., Yu, F. R., Zhang, H., Li, X., Ji, H., and Leung, V. C. M., “Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey,” *IEEE Internet of Things Journal* **8**, 11891–11915 (Aug. 2021).
- [3] Lovén, L., Leppänen, T., Peltonen, E., Partala, J., Harjula, E., Porambage, P., Ylianttila, M., and Riekkki, J., “EdgeAI: A vision for distributed, edge-native artificial intelligence in future 6G networks,” in [*6G Wireless Summit*], (Mar. 2019).
- [4] Chen, X., Wu, C., Liu, Z., Zhang, N., and Ji, Y., “Computation offloading in beyond 5G networks: A distributed learning framework and applications,” *IEEE Wireless Communications* **28**, 56–62 (Apr. 2021).
- [5] Siriwardhana, Y., Porambage, P., Liyanage, M., and Ylianttila, M., “A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing: Architectures, applications, and technical aspects,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **23**, 1160–1192 (2021).
- [6] Nayak, S. and Patgiri, R., “6G communication technology: A vision on intelligent healthcare,” in [*Health Informatics: A Computational Perspective in Healthcare*], *Studies in computational intelligence*, 1–18, Springer Singapore, Singapore (2021).
- [7] Ahad, A., Tahir, M., and Yau, K.-L. A., “5G-based smart healthcare network: Architecture, taxonomy, challenges and future research directions,” *IEEE Access* **7**, 100747–100762 (2019).

- [8] Mohanta, B., Das, P., and Patnaik, S., “Healthcare 5.0: A paradigm shift in digital healthcare system using artificial intelligence, IOT and 5G communication,” in [*2019 International Conference on Applied Machine Learning (ICAML)*], 191–196 (May 2019).
- [9] Iwamura, M., “NGMN view on 5G architecture,” in [*2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*], IEEE (May 2015).
- [10] Onu, P., Pradhan, A., and Mbohwa, C., “Industry 4.0 and beyond: Enabling digital transformation and sustainable growth in industry X.0,” in [*2023 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*], IEEE (Dec. 2023).
- [11] Shafie, A., Yang, N., Han, C., Jornet, J. M., Juntti, M., and Kürner, T., “Terahertz communications for 6g and beyond wireless networks: Challenges, key advancements, and opportunities,” *IEEE Network* **37**, 162–169 (May 2023).
- [12] Jiang, W., Han, B., Habibi, M. A., and Schotten, H. D., “The road towards 6G: A comprehensive survey,” *IEEE Open Journal of the Communications Society* **2**, 334–366 (2021).
- [13] Viswanathan, H. and Mogensen, P. E., “Communications in the 6G era,” *IEEE Access* **8**, 57063–57074 (2020).
- [14] “IEEE standard for high data rate wireless multi-media networks—amendment 2: 100 Gb/s wireless switched point-to-point physical layer,” (Oct 2017).
- [15] Petrov, V., Kurner, T., and Hosako, I., “IEEE 802.15.3d: first standardization efforts for sub-terahertz band communications toward 6G,” *IEEE Communications Magazine* **58**, 28–33 (Nov. 2020).
- [16] Koenig, S., Lopez-Diaz, D., Antes, J., Boes, F., Henneberger, R., Leuther, A., Tesmann, A., Schmogrow, R., Hillerkuss, D., Palmer, R., et al., “Wireless sub-THz communication system with high data rate,” *Nature Photonics* **7**, 977–981 (2013).
- [17] Zhang, J., Zhu, M., Hua, B., Lei, M., Cai, Y., Zou, Y., Tian, L., Li, A., Huang, Y., Yu, J., et al., “6G oriented 100 GbE real-time demonstration of fiber-THz-fiber

- seamless communication enabled by photonics,” in [*2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*], 1–3, IEEE (2022).
- [18] Jia, S., Lo, M.-C., Zhang, L., Ozolins, O., Udalcovs, A., Kong, D., Pang, X., Guzman, R., Yu, X., Xiao, S., et al., “Integrated dual-laser photonic chip for high-purity carrier generation enabling ultrafast terahertz wireless communications,” *Nature Communications* **13**, 1388 (2022).
 - [19] Li, X., Yu, J., Wang, K., Kong, M., Zhou, W., Zhu, Z., Wang, C., Zhao, M., and Chang, G.-K., “120 Gb/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375 GHz–500 GHz multi-carrier in a 2×2 MIMO system,” *Journal of Lightwave Technology* **37**, 606–611 (Jan. 2019).
 - [20] Nayak, S. and Patgiri, R., “6G communication: A vision on the potential applications,” in [*Edge Analytics: Select Proceedings of 26th International Conference—ADCOM 2020*], 203–218, Springer (2022).
 - [21] Shrestha, R., Bajracharya, R., and Kim, S., “6G enabled unmanned aerial vehicle traffic management: A perspective,” *IEEE Access* **9**, 91119–91136 (2021).
 - [22] Porambage, P., Gur, G., Moya Osorio, D. P., Livanage, M., and Ylianttila, M., “6G security challenges and potential solutions,” in [*2021 Joint European Conference on Networks and Communications and 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*], IEEE (June 2021).
 - [23] Faisal, A., Sameddeen, H., Dahrouj, H., Al-Naffouri, T. Y., and Alouini, M.-S., “Ultramassive MIMO systems at terahertz bands: Prospects and challenges,” *IEEE Vehicular Technology Magazine* **15**, 33–42 (Dec. 2020).
 - [24] Hoseini, S. A., Ding, M., and Hassan, M., “Massive MIMO performance comparison of beamforming and multiplexing in the terahertz band,” in [*2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*], 1–6, IEEE (Dec. 2017).
 - [25] Busari, S. A., Huq, K. M. S., Mumtaz, S., Rodriguez, J., Fang, Y., Sicker, D. C., Al-Rubaye, S., and Tsourdos, A., “Generalized hybrid beamforming for vehicular connectivity using THz massive MIMO,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **68**, 8372–8383 (Sept. 2019).

- [26] Tan, J. and Dai, L., “Delay-phase precoding for THz massive MIMO with beam split,” in *[2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)]*, IEEE (Dec. 2019).
- [27] Siemion, A., Surma, M., Komorowski, P., Zagrajek, P., Walczakowski, M., Melaniuk, A., Ducin, I., Sobotka, P., and Czerwinska, E., “Paraffin diffractive lens for subterahertz range—simple and cost efficient solution,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **11**, 396–401 (July 2021).
- [28] Siemion, A., “The magic of optics—an overview of recent advanced terahertz diffractive optical elements,” *Sensors* **21**, 100 (Dec. 2020).
- [29] He, J., Dong, T., Chi, B., and Zhang, Y., “Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **41**, 607–631 (Feb. 2020).
- [30] Veli, M., Mengü, D., Yardimci, N. T., Luo, Y., Li, J., Rivenson, Y., Jarrahi, M., and Ozcan, A., “Terahertz pulse shaping using diffractive surfaces,” *Nature Communications* **12**, 37 (Jan. 2021).
- [31] Guerboukha, H., Zhao, B., Fang, Z., Knightly, E., and Mittleman, D. M., “Curving THz wireless data links around obstacles,” *Communications Engineering* **3** (Mar. 2024).
- [32] Komorowski, P., Kurowska, M., Kaluza, M., Czerwińska, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Neural network-based design of two-focal-spot terahertz diffractive optical elements,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **14**, 228 (Mar. 2024).
- [33] Siemion, A., “Terahertz diffractive optics—smart control over radiation,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **40**, 477–499 (Apr. 2019).
- [34] Goodman, J., *[Introduction to Fourier Optics]*, McGraw-Hill physical and quantum electronics series, W. H. Freeman (2005).
- [35] Sypek, M., “Light propagation in the fresnel region. New numerical approach,” *Optics Communications* **116**, 43–48 (Apr. 1995).

- [36] Mittleman, D. M., “Twenty years of terahertz imaging [invited],” *Optics Express* **26**, 9417 (Apr. 2018).
- [37] Williams, G. P., “Filling the THz gap—high power sources and applications,” *Reports on Progress in Physics* **69**, 301–326 (Dec. 2005).
- [38] Sirtori, C., “Bridge for the terahertz gap,” *Nature* **417**, 132–133 (May 2002).
- [39] Singh, S., Kumar Meena, S., Tyagi, A., Kumar, S., Raj Meena, M., and Kumar Saini, S., [*Studies of Terahertz Sources and Their Applications*], IntechOpen (Sept. 2022).
- [40] Sizov, F. F., Reva, V. P., Golenkov, A. G., and Zabudsky, V. V., “Uncooled detectors challenges for THz/sub-THz arrays imaging,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **32**, 1192–1206 (Apr. 2011).
- [41] Nilforoushan, N., Kidd, C., Fournier, A., Palomo, J., Tignon, J., Dhillon, S., Lhuillier, E., Li, L., Davies, A. G., Linfield, E. H., Freeman, J. R., and Mangeney, J., “Efficient THz generation from low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas driven by Yb-doped fiber amplifier at 200 kHz repetition rate,” *Applied Physics Letters* **123** (Dec. 2023).
- [42] Probst, T., Rehn, A., and Koch, M., “Compact and low-cost THz QTDS system,” *Optics Express* **23**, 21972 (Aug. 2015).
- [43] Khalatpour, A., Paulsen, A. K., Deimert, C., Wasilewski, Z. R., and Hu, Q., “High-power portable terahertz laser systems,” *Nature Photonics* **15**, 16–20 (Nov. 2020).
- [44] Tal, M., Keren-Zur, S., and Ellenbogen, T., “Nonlinear plasmonic metasurface terahertz emitters for compact terahertz spectroscopy systems,” *ACS Photonics* **7**, 3286–3290 (Nov. 2020).
- [45] Ge, H., Sun, Z., Jiang, Y., Wu, X., Jia, Z., Cui, G., and Zhang, Y., “Recent advances in THz detection of water,” *International Journal of Molecular Sciences* **24**, 10936 (June 2023).
- [46] Novelli, F., “Terahertz spectroscopy of thick and diluted water solutions,” *Optics Express* **32**, 11041 (Mar. 2024).

- [47] Zhou, J., Rao, X., Liu, X., Li, T., Zhou, L., Zheng, Y., and Zhu, Z., “Temperature dependent optical and dielectric properties of liquid water studied by terahertz time-domain spectroscopy,” *AIP Advances* **9**, 035346 (Mar. 2019).
- [48] Vinh, N. Q., Sherwin, M. S., Allen, S. J., George, D. K., Rahmani, A. J., and Plaxco, K. W., “High-precision gigahertz-to-terahertz spectroscopy of aqueous salt solutions as a probe of the femtosecond-to-picosecond dynamics of liquid water,” *The Journal of Chemical Physics* **142**, 164502 (Apr. 2015).
- [49] Wang, T., Klarskov, P., and Jepsen, P. U., “Ultrabroadband thz time-domain spectroscopy of a free-flowing water film,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **4**, 425–431 (July 2014).
- [50] Rønne, C., Thrane, L., Åstrand, P.-O., Wallqvist, A., Mikkelsen, K. V., and Keiding, S. R., “Investigation of the temperature dependence of dielectric relaxation in liquid water by THz reflection spectroscopy and molecular dynamics simulation,” *The Journal of Chemical Physics* **107**, 5319–5331 (Oct. 1997).
- [51] Thrane, L., Jacobsen, R., Uhd Jepsen, P., and Keiding, S., “THz reflection spectroscopy of liquid water,” *Chemical Physics Letters* **240**, 330–333 (June 1995).
- [52] Rogalin, V. E., Kaplunov, I. A., and Kropotov, G. I., “Optical materials for the THz range,” *Optics and Spectroscopy* **125**, 1053–1064 (Dec. 2018).
- [53] Duangrit, N., Hong, B., Burnett, A. D., Akkaraekthalin, P., Robertson, I. D., and Somjit, N., “Terahertz dielectric property characterization of photopolymers for additive manufacturing,” *IEEE Access* **7**, 12339 (2019).
- [54] Sahin, S., Nahar, N. K., and Sertel, K., “Dielectric properties of low-loss polymers for mmW and THz applications,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **40**, 557 (Mar. 2019).
- [55] Wietzke, S., Jansen, C., Reuter, M., Jung, T., Kraft, D., Chatterjee, S., Fischer, B., and Koch, M., “Terahertz spectroscopy on polymers: A review of morphological studies,” *Journal of Molecular Structure* **1006**, 41–51 (Dec. 2011).

- [56] Han, D., Lee, K., Lim, J., Hong, S. S., Kim, Y. K., and Ahn, J., “Terahertz lens made out of natural stone,” *Applied Optics* **52**, 8670 (Dec. 2013).
- [57] Surma, M., Komorowski, P., Neneman, M., and Siemion, A., “Chocolate terahertz fresnel lens,” *Photonics Letters of Poland* **12**, 103 (Dec. 2020).
- [58] Siemion, A., Siemion, A., Makowski, M., Suszek, J., Bomba, J., Czerwiński, A., Garet, F., Coutaz, J.-L., and Sypek, M., “Diffractive paper lens for terahertz optics,” *Optics Letters* **37**, 4320 (Oct. 2012).
- [59] Peng, Y., Shi, C., Wu, X., Zhu, Y., and Zhuang, S., “Terahertz imaging and spectroscopy in cancer diagnostics: A technical review,” *BME Frontiers* **2020**, 2547609 (Jan. 2020).
- [60] Wang, L., “Terahertz imaging for breast cancer detection,” *Sensors* **21**, 6465 (Sept. 2021).
- [61] Yan, Z., Zhu, L.-G., Meng, K., Huang, W., and Shi, Q., “THz medical imaging: from in vitro to in vivo,” *Trends in Biotechnology* **40**, 816–830 (July 2022).
- [62] Zhou, R., Wang, C., Xu, W., and Xie, L., “Biological applications of terahertz technology based on nanomaterials and nanostructures,” *Nanoscale* **11**, 3445–3457 (2019).
- [63] Markelz, A. G. and Mittleman, D. M., “Perspective on terahertz applications in bioscience and biotechnology,” *ACS Photonics* **9**, 1117–1126 (Apr. 2022).
- [64] Liang, B., Wang, T., Shen, S., Hao, C., Liu, D., Liu, J., Wang, K., and Yang, Z., “Occlusion removal in terahertz frequency-modulated continuous wave non-destructive testing based on inpainting,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* , 1–9 (2024).
- [65] Zhong, S., “Progress in terahertz nondestructive testing: A review,” *Frontiers of Mechanical Engineering* **14**, 273–281 (May 2018).
- [66] Fosodeder, P., Hubmer, S., Ploier, A., Ramlau, R., van Frank, S., and Rankl, C., “Phase-contrast THz-CT for non-destructive testing,” *Optics Express* **29**, 15711 (May 2021).

- [67] Tao, Y. H., Fitzgerald, A. J., and Wallace, V. P., “Non-contact, non-destructive testing in various industrial sectors with terahertz technology,” *Sensors* **20**, 712 (Jan. 2020).
- [68] Fan, S., Li, T., Zhou, J., Liu, X., Liu, X., Qi, H., and Mu, Z., “Terahertz non-destructive imaging of cracks and cracking in structures of cement-based materials,” *AIP Advances* **7**, 115202 (Nov. 2017).
- [69] Nieradka, A., Komorowski, P., Kaluza, M., Surma, M., and Siemion, A., “Terahertz optical setups using spatial filtering methods to image low-absorbing samples,” in [*Terahertz Photonics III*], SPIE (June 2024).
- [70] Siemion, A., Minkevičius, L., Qi, L., and Valušis, G., “Spatial filtering based terahertz imaging of low absorbing objects,” *Optics and Lasers in Engineering* **139**, 106476 (Apr. 2021).
- [71] Tzydynzhapov, G., Gusikhin, P., Muravev, V., Dremin, A., Nefyodov, Y., and Kukulshkin, I., “New real-time sub-terahertz security body scanner,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **41**, 632–641 (Mar. 2020).
- [72] Knipper, R., Brahm, A., Heinz, E., May, T., Notni, G., Meyer, H.-G., Tunnermann, A., and Popp, J., “THz absorption in fabric and its impact on body scanning for security application,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **5**, 999–1004 (Nov. 2015).
- [73] Palka, N., Szustakowski, M., Kowalski, M., Trzcinski, T., Ryniec, R., Piszczek, M., Ciurapinski, W., Zyczkowski, M., Zagrajek, P., and Wrobel, J., “THz spectroscopy and imaging in security applications,” in [*2012 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*], IEEE (May 2012).
- [74] Federici, J. F., Schulkin, B., Huang, F., Gary, D., Barat, R., Oliveira, F., and Zimdars, D., “THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs,” *Semiconductor Science and Technology* **20**, S266–S280 (June 2005).
- [75] Davies, A. G., Burnett, A. D., Fan, W., Linfield, E. H., and Cunningham, J. E., “Terahertz spectroscopy of explosives and drugs,” *Materials Today* **11**, 18–26 (Mar. 2008).

- [76] Kulesa, C., “Terahertz spectroscopy for astronomy: From comets to cosmology,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **1**, 232–240 (Sept. 2011).
- [77] Siegel, P. H., “THz instruments for space,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **55**, 2957–2965 (Nov. 2007).
- [78] Siegel, P. H., “THz for space: The golden age,” in [2010 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*], IEEE (May 2010).
- [79] Bailleux, S., Martin-Drumel, M. A., Margulès, L., Pirali, O., Wlodarczak, G., Roy, P., Roueff, E., Gerin, M., Faure, A., and Hily-Blant, P., “High-resolution terahertz spectroscopy of the 15NH radical (Σ^-),” *Astronomy and Astrophysics* **538**, A135 (Feb. 2012).
- [80] Chen, H., Sardeddeen, H., Ballal, T., Wymeersch, H., Alouini, M.-S., and Al-Naffouri, T. Y., “A tutorial on terahertz-band localization for 6G communication systems,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **24**, 1780–1815 (2022).
- [81] O’Hara, J. F., Ekin, S., Choi, W., and Song, I., “A perspective on terahertz next-generation wireless communications,” *Technologies* **7**, 43 (June 2019).
- [82] Han, C., Wu, Y., Chen, Z., and Wang, X., “Terahertz communications (TeraCom): Challenges and impact on 6G wireless systems,” *arXiv preprint arXiv:1912.06040* (2019).
- [83] Chen, Z., Ma, X., Zhang, B., Zhang, Y., Niu, Z., Kuang, N., Chen, W., Li, L., and Li, S., “A survey on terahertz communications,” *China Communications* **16**, 1–35 (2019).
- [84] Ducournau, G., Szriftgiser, P., Pavanello, F., Peytavit, E., Zaknoune, M., Bacquet, D., Beck, A., Akalin, T., Lampin, J.-F., and Lampin, J.-F., “THz communications using photonics and electronic devices: the race to data-rate,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **36**, 198–220 (Oct. 2014).
- [85] Kurner, T., Braun, R.-P., Ducournau, G., Hellrung, U., Hirata, A., Hisatake, S., John, L., Jung, B. K., Kallfass, I., Kawanishi, T., Kondou, K., Leiba, Y., Napier, B., Timar, R., Renau, A., Schlegel, P., Szriftgiser, P., Tessmann, A., and Wrana, D.,

- “THz communications and the demonstration in the ThoR-Backhaul link,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1–14 (2024).
- [86] Bhandari, N., Devra, S., and Singh, K., “Evolution of cellular network: from 1G to 5G,” *International Journal of Engineering and Techniques* **3**, 98–105 (2017).
- [87] Vora, L. J., “Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G,” *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research* **2**, 281–290 (2015).
- [88] Sharma, P., “Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network,” *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* **2**, 47–53 (2013).
- [89] Dahlman, E., Parkvall, S., and Skold, J., [*5G NR: The next generation wireless access technology*], Academic Press (2020).
- [90] Mitra, R. N. and Agrawal, D. P., “5G mobile technology: A survey,” *ICT express* **1**, 132–137 (2015).
- [91] Dangi, R., Lalwani, P., Choudhary, G., You, I., and Pau, G., “Study and investigation on 5G technology: A systematic review,” *Sensors* **22**, 26 (2021).
- [92] Song, H.-J., Ajito, K., Muramoto, Y., Wakatsuki, A., Nagatsuma, T., and Kukutsu, N., “24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications,” *Electronics Letters* **48**, 953–954 (2012).
- [93] Kallfass, I., Boes, F., Messinger, T., Antes, J., Inam, A., Lewark, U., Tessmann, A., and Henneberger, R., “64 Gbit/s transmission over 850 m fixed wireless link at 240 GHz carrier frequency,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **36**, 221–233 (2015).
- [94] Nallappan, K., Guerboukha, H., Nerguizian, C., and Skorobogatiy, M., “Live streaming of uncompressed HD and 4K videos using terahertz wireless links,” *IEEE Access* **6**, 58030–58042 (2018).

- [95] Feng, Y., Zhang, B., Zhi, C., Liu, K., Liu, W., Shen, F., Qiao, C., Zhang, J., Fan, Y., and Yang, X., “A 20.8-Gbps dual-carrier wireless communication link in 220-GHz band,” *China Communications* **18**, 210–220 (2021).
- [96] Huawei Technologies, “6G ISAC-THz opens up new possibilities for wireless communication systems.” <https://www.huawei.com/en/technology-insights/future-technologies/6g-isac-thz> (2022).
- [97] Cai, Y., Yang, X., Zhu, M., Hua, B., Xie, Z., Tong, W., Xin, Z., Li, J., Zhang, J., Ding, J., Lei, M., Zhang, J., Zou, Y., Chen, X., Huang, Y., Yu, J., and You, X., “Photonics-aided exceeding 200-Gb/s wireless data transmission over outdoor long-range 2×2 MIMO THz links at 300 GHz,” *Optics Express* **32**, 33587 (Sept. 2024).
- [98] Wang, W., Tan, Y. J., Tan, T. C., Kumar, A., Pitchappa, P., Szriftgiser, P., Duco-urnau, G., and Singh, R., “On-chip topological beamformer for multi-link terahertz 6G to XG wireless,” *Nature* **632**, 522–527 (Aug. 2024).
- [99] Komorowski, P., Czerwińska, P., Surma, M., Zagrajek, P., Piramidowicz, R., and Siemion, A., “Three-focal-spot terahertz diffractive optical element-iterative design and neural network approach,” *Optics Express* **29**, 11243 (Mar. 2021).
- [100] Piesiewicz, R., Jacob, M., Koch, M., Schoebel, J., and Kurner, T., “Performance analysis of future multigigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **14**, 421–430 (2008).
- [101] Nagatsuma, T., Horiguchi, S., Minamikata, Y., Yoshimizu, Y., Hisatake, S., Kuwano, S., Yoshimoto, N., Terada, J., and Takahashi, H., “Terahertz wireless communications based on photonics technologies,” *Optics Express* **21**, 23736 (Sept. 2013).
- [102] Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., and Han, C., “Terahertz band: Next frontier for wireless communications,” *Physical Communication* **12**, 16–32 (Sept. 2014).
- [103] Chaccour, C., Soorki, M. N., Saad, W., Bennis, M., Popovski, P., and Debbah, M., “Seven defining features of terahertz (THz) wireless systems: A fellowship of com-

- munication and sensing,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **24**, 967–993 (2022).
- [104] Kleine-Ostmann, T. and Nagatsuma, T., “A review on terahertz communications research,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **32**, 143–171 (Jan. 2011).
 - [105] Hirata, A., Kosugi, T., Takahashi, H., Takeuchi, J., Togo, H., Yaita, M., Kukutsu, N., Aihara, K., Murata, K., Sato, Y., Nagatsuma, T., and Kado, Y., “120-GHz-band wireless link technologies for outdoor 10-Gbit/s data transmission,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **60**, 881–895 (Mar. 2012).
 - [106] Mehdi, I., Siles, J., Chen, C. P., and Jornet, J. M., “THz technology for space communications,” in [*2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*], IEEE (Nov. 2018).
 - [107] Liu, Z., Liu, J., Zeng, Y., and Ma, J., “Covert wireless communication in IoT network: From AWGN channel to THz band,” *IEEE Internet of Things Journal* **7**, 3378–3388 (Apr. 2020).
 - [108] Petrov, V., Kokkonen, J., Moltchanov, D., Lehtomaki, J., Koucheryavy, Y., and Juntti, M., “Last meter indoor terahertz wireless access: Performance insights and implementation roadmap,” *IEEE Communications Magazine* **56**, 158–165 (June 2018).
 - [109] Spirit, D., Ellis, A., and Barnsley, P., “Optical time division multiplexing: systems and networks,” *IEEE Communications Magazine* **32**, 56–62 (Dec. 1994).
 - [110] Cimini, L., “Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing,” *IEEE Transactions on Communications* **33**, 665–675 (July 1985).
 - [111] Michailow, N., Matthe, M., Gaspar, I. S., Caldevilla, A. N., Mendes, L. L., Festag, A., and Fettweis, G., “Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks,” *IEEE Transactions on Communications* **62**, 3045–3061 (Sept. 2014).

- [112] Oshima, N., Hashimoto, K., Suzuki, S., and Asada, M., “Terahertz wireless data transmission with frequency and polarization division multiplexing using resonant-tunneling-diode oscillators,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **7**, 593–598 (Sept. 2017).
- [113] Li, G., Bai, N., Zhao, N., and Xia, C., “Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication,” *Advances in Optics and Photonics* **6**, 413 (Dec. 2014).
- [114] Zhao, N., Li, X., Li, G., and Kahn, J. M., “Capacity limits of spatially multiplexed free-space communication,” *Nature Photonics* **9**, 822–826 (Dec. 2015).
- [115] Arikawa, M. and Ito, T., “Performance of mode diversity reception of a polarization-division-multiplexed signal for free-space optical communication under atmospheric turbulence,” *Optics Express* **26**, 28263 (Oct. 2018).
- [116] Ke, J. C., Chen, X., Tang, W., Chen, M. Z., Zhang, L., Wang, L., Dai, J. Y., Yang, J., Zhang, J. W., Wu, L., Cheng, Q., Jin, S., and Cui, T. J., “Space-frequency-polarization-division multiplexed wireless communication system using anisotropic space-time-coding digital metasurface,” *National Science Review* **9** (Oct. 2022).
- [117] Kaiser, S., “Ofdm code-division multiplexing in fading channels,” *IEEE Transactions on Communications* **50**, 1266–1273 (Aug. 2002).
- [118] Li, J. and Li, J., “Dielectric properties of silicon in terahertz wave region,” *Microwave and Optical Technology Letters* **50**, 1143–1146 (Mar. 2008).
- [119] Islam, M. S., Cordeiro, C. M. B., Nine, M. J., Sultana, J., Cruz, A. L. S., Dinovitser, A., Ng, B. W.-H., Ebendorff-Heidepriem, H., Losic, D., and Abbott, D., “Experimental study on glass and polymers: Determining the optimal material for potential use in terahertz technology,” *IEEE Access* **8**, 97204–97214 (2020).
- [120] Naftaly, M. and Miles, R., “Terahertz time-domain spectroscopy: A new tool for the study of glasses in the far infrared,” *Journal of Non-Crystalline Solids* **351**, 3341–3346 (Oct. 2005).

- [121] Ahmed, A., Braconnier, A., Gibbs, J., and Burgess, J. A. J., “Terahertz antireflection coatings employing off-the-shelf adhesive tapes,” *Applied Optics* **61**, 6316 (July 2022).
- [122] Shevchik-Sheker, A., Sizov, F., Golenkov, O., Lysiuk, I., Petriakov, V., and Kovbasa, M., “Silicon lenses with HDPE anti-reflection coatings for low THz frequency range,” *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* **26**, 059–067 (Mar. 2023).
- [123] Yao, H.-Y., Chen, Z.-Y., and Chang, T.-H., “A design of broadband and low-loss multilayer antireflection coating in THz region,” *Progress In Electromagnetics Research C* **88**, 117–131 (2018).
- [124] Squires, A. D. and Lewis, R. A., “Feasibility and characterization of common and exotic filaments for use in 3D printed terahertz devices,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **39**, 614–635 (June 2018).
- [125] Kaluza, M., Surma, M., Komorowski, P., Walczakowski, M., and Siemion, A., “THz optical properties of different 3D printing polymer materials in relation to FTIR, raman, and XPS evaluation techniques,” in *[2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)]*, IEEE (Aug. 2022).
- [126] Neu, J. and Schmuttenmaer, C. A., “Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS),” *Journal of Applied Physics* **124**, 231101 (Dec. 2018).
- [127] Coutaz, J.-L., Bernier, M., Garet, F., Joly, S., Miyake, Y., Minamide, H., Lheurette, E., and Lippens, D., “Terahertz time-domain spectroscopy of absorbing materials and of metamaterials,” *Terahertz Science and Technology* **7**, 53–69 (2014).
- [128] Duvillaret, L., Garet, F., and Coutaz, J.-L., “A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **2**, 739–746 (1996).
- [129] Cunningham, P. D., Valdes, N. N., Vallejo, F. A., Hayden, L. M., Polishak, B., Zhou, X.-H., Luo, J., Jen, A. K.-Y., Williams, J. C., and Twieg, R. J., “Broadband

- terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials,” *Journal of Applied Physics* **109**, 043505–043505–5 (Feb. 2011).
- [130] Liebert, K., Rachon, M., Siemion, A., Suszek, J., But, D., Knap, W., and Sypek, M., “THz beam shaper realizing fan-out patterns,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **38**, 1019–1030 (May 2017).
 - [131] Headland, D., Monnai, Y., Abbott, D., Fumeaux, C., and Withayachumnankul, W., “Tutorial: Terahertz beamforming, from concepts to realizations,” *APL Photonics* **3**, 051101 (Feb. 2018).
 - [132] Liu, C., Niu, L., Wang, K., and Liu, J., “3D-printed diffractive elements induced accelerating terahertz Airy beam,” *Optics Express* **24**, 29342 (Dec. 2016).
 - [133] Surma, M., Kaluza, M., Komorowski, P., and Siemion, A., “Segmentation of thz holograms for homogenous illumination,” *Scientific Reports* **14**, 12733 (June 2024).
 - [134] Surma, M., Ducin, I., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Sub-terahertz computer generated hologram with two image planes,” *Applied Sciences* **9**, 659 (Feb. 2019).
 - [135] Gerchberg, R. W., “A practical algorithm for the determination of plane from image and diffraction pictures,” *Optik* **35**, 237–246 (1972).
 - [136] Luo, Y., Mengu, D., Yardimci, N. T., Rivenson, Y., Veli, M., Jarrahi, M., and Ozcan, A., “Design of task-specific optical systems using broadband diffractive neural networks,” *Light: Science and Applications* **8**, 112 (Dec. 2019).
 - [137] Khonina, S., Kazanskiy, N., Efimov, A., Nikonorov, A., Oseledets, I., Skidanov, R., and Butt, M., “A perspective on the artificial intelligence’s transformative role in advancing diffractive optics,” *iScience* **27**, 110270 (July 2024).
 - [138] Buske, P., Völl, A., Eisebitt, M., Stollenwerk, J., and Holly, C., “Advanced beam shaping for laser materials processing based on diffractive neural networks,” *Optics Express* **30**, 22798 (June 2022).

- [139] Surma, M., Kaluza, M., Czerwińska, P., Komorowski, P., and Siemion, A., “Neural-network based approach to optimize THz computer generated holograms,” *Photonics Letters of Poland* **13**, 88 (Dec. 2021).
- [140] Kaluza, M., Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Terahertz focusing blazed diffractive optical elements for frequency demultiplexing,” *Advanced Optical Technologies* **12** (Dec. 2023).
- [141] Furlan, W. D., Ferrando, V., Monsoriu, J. A., Zagrajek, P., Czerwińska, E., and Szustakowski, M., “3D printed diffractive terahertz lenses,” *Optics Letters* **41**, 1748–1751 (Apr. 2016).
- [142] Fan, D., Smith, C. S., Unnithan, R. R., and Kim, S., “3D printed diffractive optical elements for rapid prototyping,” *Micro and Nano Engineering* **24**, 100270 (Sept. 2024).
- [143] Komorowski, P., Czerwińska, P., Kaluza, M., Surma, M., Zagrajek, P., Sobczyk, A., Ciurapiński, W., Piramidowicz, R., and Siemion, A., “Frequency division multiplexing of terahertz waves realized by diffractive optical elements,” *Applied Sciences* **11**, 6246 (July 2021).
- [144] Castro-Camus, E., Koch, M., and Hernandez-Serrano, A. I., “Additive manufacture of photonic components for the terahertz band,” *Journal of Applied Physics* **127**, 210901 (June 2020).
- [145] Naftaly, M., Savvides, G., Alshareef, F., Flanigan, P., Lui, G., Florescu, M., and Mullen, R. A., “Non-destructive porosity measurements of 3D printed polymer by terahertz time-domain spectroscopy,” *Applied Sciences* **12**, 927 (Jan. 2022).
- [146] Brodie, C. H., Spotts, I., Reguigui, H., Leclerc, C. A., Mitchell, M. E., Holzman, J. F., and Collier, C. M., “Comprehensive study of 3D printing materials over the terahertz regime: absorption coefficient and refractive index characterizations,” *Optical Materials Express* **12**, 3379 (Aug. 2022).
- [147] Clark, A. T., Federici, J. F., and Gatley, I., “Effect of 3D printing parameters on the refractive index, attenuation coefficient, and birefringence of plastics in terahertz range,” *Advances in Materials Science and Engineering* **2021**, 1–9 (Nov. 2021).

- [148] Busch, S. F., Weidenbach, M., Fey, M., Schäfer, F., Probst, T., and Koch, M., “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**, 993–997 (Oct. 2014).
- [149] Busch, S. F., Weidenbach, M., Balzer, J. C., and Koch, M., “THz optics 3D printed with TOPAS,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **37**, 303–307 (Dec. 2015).
- [150] Bernard, M., Jubeli, E., Bakar, J., Saunier, J., and Yagoubi, N., “Impact of simulated biological aging on physicochemical and biocompatibility properties of cyclic olefin copolymers,” *Materials Science and Engineering: C* **97**, 377–387 (Apr. 2019).
- [151] Komorowski, P., Kaluza, M., Surma, M., and Siemion, A., “3D printed diffractive lenses operating at 1 THz,” *Lithuanian Journal of Physics* **63** (Nov. 2023).
- [152] Hori, Y. and Okubo, S., “On the normal stress effect and the barus effect of polymer melts,” *Journal of Rheology* **24**, 39–53 (Feb. 1980).
- [153] Papon, M. D. E. A., Haque, A., and Sharif, M. A. R., “Effect of nozzle geometry on melt flow simulation and structural property of thermoplastic nanocomposites in fused deposition modeling,” in [*American Society for Composites 2017*], *ASC 2017*, DEStech Publications, Inc. (Nov. 2017).
- [154] Smith, R. M. and Arnold, M. A., “Terahertz time-domain spectroscopy of solid samples: Principles, applications, and challenges,” *Applied Spectroscopy Reviews* **46**, 636–679 (Nov. 2011).
- [155] Mayerhöfer, T. G., Pahlow, S., and Popp, J., “The Bouguer-Beer-Lambert law: Shining light on the obscure,” *ChemPhysChem* **21**, 2029–2046 (Aug. 2020).
- [156] Mayerhöfer, T. G., Mutschke, H., and Popp, J., “Employing theories far beyond their limits—the case of the (Boguer-) Beer–Lambert law,” *ChemPhysChem* **17**, 1948–1955 (Apr. 2016).
- [157] Rachon, M., Liebert, K., But, D. B., Zagrajek, P., Siemion, A., Kolodziejczyk, A., Sypek, M., and Suszek, J., “Enhanced sub-wavelength focusing by double-sided lens

- with phase correction in THz range,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **41**, 685–696 (May 2020).
- [158] Siemion, A., Komorowski, P., Surma, M., Ducin, I., Sobotka, P., Walczakowski, M., and Czerwińska, E., “Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup,” *Optics Express* **28**, 715–723 (Jan. 2020).
- [159] Monnai, Y., Altmann, K., Jansen, C., Hillmer, H., Koch, M., and Shinoda, H., “Terahertz beam steering and variable focusing using programmable diffraction gratings,” *Optics Express* **21**, 2347–2354 (Jan. 2013).
- [160] Kaluza, M., Komorowski, P., Surma, M., Nieradka, A., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Advanced diffractive optical elements implementing multiple-input spatial multiplexing of terahertz radiation,” *Optics and Lasers in Engineering* **184**, 108606 (Jan. 2025).
- [161] Siemion, A., Siemion, A., Suszek, J., Kowalczyk, A., Bomba, J., Sobczyk, A., Palka, N., Zagrajek, P., Kolodziejczyk, A., and Sypek, M., “THz beam shaping based on paper diffractive optics,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **6**, 568–575 (July 2016).
- [162] Gospodaric, J., Kuzmenko, A., Pimenov, A., Huber, C., Suess, D., Rotter, S., and Pimenov, A., “3D-printed phase waveplates for THz beam shaping,” *Applied Physics Letters* **112**, 221104 (May 2018).
- [163] Liu, C., Liu, J., Niu, L., Wei, X., Wang, K., and Yang, Z., “Terahertz circular Airy vortex beams,” *Scientific Reports* **7**, 3891 (June 2017).
- [164] Wiltse, J. C., “Diffraction optics for terahertz waves,” in [*Terahertz for Military and Security Applications II*], SPIE (Sept. 2004).
- [165] Kress, B. C. and Meyrueis, P., [*Digital diffractive optics*], John Wiley and Sons, Chichester, England (Sept. 2000).
- [166] Zayed, A., “A convolution and product theorem for the fractional fourier transform,” *IEEE Signal Processing Letters* **5**, 101–103 (Apr. 1998).

- [167] Shannon, C., “Communication in the presence of noise,” *Proceedings of the IRE* **37**, 10–21 (Jan. 1949).
- [168] Dorsch, R. G., Lohmann, A. W., and Sinzinger, S., “Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display,” *Applied Optics* **33**, 869–875 (Feb. 1994).
- [169] Makowski, M., “Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative fresnel algorithm,” *Optical Engineering* **44**, 125805 (Dec. 2005).
- [170] Makowski, M., “Iterative design of multiplane holograms: experiments and applications,” *Optical Engineering* **46**, 045802 (Apr. 2007).
- [171] Sun, J. and Hu, F., “Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: A review,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* **30** (Oct. 2019).
- [172] Jeong, H. Y., Lee, E., An, S.-C., Lim, Y., and Jun, Y. C., “3D and 4D printing for optics and metaphotonics,” *Nanophotonics* **9**, 1139–1160 (Feb. 2020).
- [173] Shahrubudin, N., Lee, T., and Ramlan, R., “An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications,” *Procedia Manufacturing* **35**, 1286–1296 (2019).
- [174] Gao, H., An, J., Chua, C. K., Bourell, D., Kuo, C.-N., and Tan, D. T., “3D printed optics and photonics: Processes, materials and applications,” *Materials Today* **69**, 107–132 (Oct. 2023).
- [175] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., and Hui, D., “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering* **143**, 172–196 (June 2018).
- [176] Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., and Dutta, N. K., “Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges,” *Polymers* **13**, 753 (Feb. 2021).

- [177] Kaluza, M., Walczakowski, M., and Siemion, A., “Exploring the impact of 3D printing parameters on the THz optical characteristics of COC material,” *Materials* **17**, 5104 (Oct. 2024).
- [178] Kaluza, M., Walczakowski, M., Komorowski, P., and Siemion, A., “Influence of 3D printing parameters on the THz optical properties of COC material,” in [*2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1–2, IEEE (Sept. 2024).
- [179] Komorowski, P., Siemion, A., Walczakowski, M., and Zagrajek, P., “The role of the directivity of various THz detectors in multiplexing systems,” *Applied Sciences* **12**, 3545 (Mar. 2022).
- [180] Suszek, J., Sypek, M., Makowski, M., Garet, F., Ducin, I., Kakarenko, K., Bomba, J., and Coutaz, J.-L., “Evaluation of the shadow effect in terahertz kinoform gratings,” *Optics letters* **38**, 1464–1466 (Apr. 2013).
- [181] Kaluza, M., Surma, M., Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “3D printed diffractive optical elements for THz spatial multiplexing,” in [*2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], IEEE (Sept. 2023).
- [182] Kaluza, M., Komorowski, P., Nieradka, A., Surma, M., Zagrajek, P., and Siemion, A., “MIMO systems for 6G THz data transmission links,” in [*2024 25th International Microwave and Radar Conference (MIKON)*], 100–102, IEEE (July 2024).
- [183] Zagrajek, P., Komorowski, P., Walczakowski, M., Kałuza, M., and Siemion, A., “Optical MIMO system for THz data transmission,” in [*2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], 1–2, IEEE (Sept. 2024).
- [184] Surma, M., Kaluza, M., Czerwińska, P., Komorowski, P., Zagrajek, P., and Siemion, A., “Iterative design of multiple-input-single-output structures for THz signal multiplexing,” in [*2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*], IEEE (Sept. 2023).

- [185] Sypek, M., Makowski, M., Hérault, E., Siemion, A., Siemion, A., Suszek, J., Garet, F., and Coutaz, J.-L., “Highly efficient broadband double-sided Fresnel lens for THz range,” *Optics Letters* **37**, 2214–2216 (June 2012).
- [186] Mohazzabi, P., Mattson, D. J., and Ponce Jr, J. A., “Diffraction pattern of a rotated grating,” *Journal of Applied Mathematics and Physics* **07**, 1870–1876 (2019).
- [187] Yang, F., Liu, L., Song, M., Han, F., Shen, L., Hu, P., and Zhang, F., “Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurement of liquids,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **38**, 229–247 (Feb. 2017).
- [188] Withayachumnankul, W. and Naftaly, M., “Fundamentals of measurement in terahertz time-domain spectroscopy,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**, 610–637 (Aug. 2014).
- [189] Withayachumnankul, W., Fischer, B. M., Lin, H., and Abbott, D., “Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurement,” *Journal of the Optical Society of America B* **25**, 1059–1072 (June 2008).
- [190] Zeranska-Chudek, K., Lapinska, A., Siemion, A., Jastrzebska, A. M., and Zdrojek, M., “Terahertz time domain spectroscopy of graphene and MXene polymer composites,” *Journal of Applied Polymer Science* **138**, 49962 (Sept. 2020).
- [191] Zeranska-Chudek, K., Siemion, A., Palka, N., Mdarhri, A., Elaboudi, I., Brosseau, C., and Zdrojek, M., “Terahertz shielding properties of carbon black based polymer nanocomposites,” *Materials* **14**, 835 (Feb. 2021).
- [192] Mavrona, E., Graf, J., Hack, E., and Zolliker, P., “Optimized 3D printing of THz waveguides with cyclic olefin copolymer,” *Optical Materials Express* **11**, 2495–2504 (July 2021).