

**Rada Dyscypliny Naukowej „Inżynieria materiałowa”
Wojskowa Akademia Techniczna im. J. Dąbrowskiego
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa**
(nazwa i dane adresowe podmiotu habilitującego,
wybranego do przeprowadzenia postępowania)
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

RAFAL KOWERDZIEJ

(imię i nazwisko wnioskodawcy)

**WYDZIAŁ NOWYCH TECHNOLOGII I CHEMII
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA**

(miejsce pracy/jednostka naukowa)

Wniosek

z dnia 18.08.2023r.

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie¹ **inżynieria materiałowa**

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora
habilitowanego:

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.: „**Przestrzajalne metamateriały
hybrydowe.**”

Wniosuję – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie
wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała
uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym**^{*2}

Zostałem poinformowany, że:

*Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w
sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej
z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).*

*Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl, tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.
Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c)
Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art.
232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu
przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i
obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.*

*Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest
na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html*

Podpisane elektronicznie przez Rafał
Kowerdziej (Certyfikat kwalifikowany) w dniu
2023-08-18.

¹ Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

² * Niepotrzebne skreślić.

Załączniki:

- Nr 1 Dane wnioskodawcy
- Nr 2 Autoreferat
- Nr 3 Wykaz osiągnięć naukowych
- Nr 4 Kopia dyplomu potwierdzającego uzyskanie stopnia doktorskiego
- Nr 5 Oświadczenia wkładu autorów do publikacji

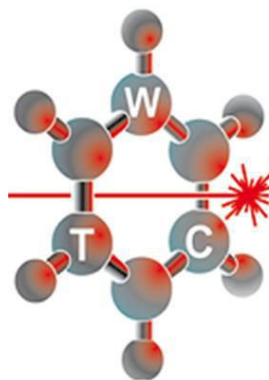
AUTOREFERAT

Dr inż. Rafał Kowerdziej

Załącznik nr 2

Autoreferat przedstawiający opis kariery zawodowej oraz istotnej aktywności naukowej w związku z ubieganiem się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

- dotyczy numeracji rozdziałów, punktów i artykułów naukowych zawartych w załączniku nr 3 "Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych"



**Wydział Nowych Technologii i Chemii
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego**

Warszawa 2023

Spis treści

1. Dane podstawowe.	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	4
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).	4
4.1 Rozwój naukowy przed uzyskaniem stopnia doktora	4
4.2 Rozwój naukowy po uzyskaniu stopnia doktora	6
4.3. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	8
4.2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy:	9
4.3. Omówienie celu prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich potencjalnego wykorzystania:	13
I. Wstęp i tło naukowe badań.	13
II. Prześtralne mikrostruktury metamateriałowe.....	14
III. Prześtralne nanostruktury metamateriałowe	21
IV. Aktywne metamateriały hiperboliczne	25
V. Podsumowanie	29
VI. Literatura	31
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.	32
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.	33
7. Informacja o otrzymanych nagrodach i stypendiach.	34

1. Dane podstawowe.

Imię i nazwisko: **Rafał Kowerdziej**

Data i miejsce urodzenia:

Miejsce pracy:

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
Wydział Nowych Technologii i Chemii, Instytut Fizyki Technicznej
Zakład Fizyki i Technologii Krysztalów
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

e-mail:

ORCID: 0000-0001-9511-194X

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria materiałowa, specjalność: *metamateriały* (22.05.2014)
Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Liquid crystal metamaterial transducers with tunable parameters in GHz and THz frequency range*” – rozprawa obroniona z wyróżnieniem.
Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Parka
Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa
- Magister inżynier fizyki technicznej, specjalność: *fizyka komputerowa* (20.06.2008)
Tytuł pracy magisterskiej: „*Dobór polaryzatorów dla TN LCD pracującego w dużym oświetleniu zewnętrznym*” – praca obroniona z wynikiem bardzo dobrym.
Promotor: dr inż. Marek Olifierczuk
Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa

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

- 01.10.2018 – obecnie: adiunkt w grupie pracowników badawczo – dydaktycznych w Instytucie Fizyki Technicznej. Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa
- 01.03.2018 – 30.09.2018: adiunkt w grupie pracowników naukowo – dydaktycznych w Instytucie Fizyki Technicznej. Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa
- 01.10.2016 – 28.02.2018: adiunkt w grupie pracowników naukowych w Instytucie Fizyki Technicznej. Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa
- 01.03.2016 – 30.09.2016: adiunkt w grupie pracowników naukowo – dydaktycznych w Instytucie Fizyki Technicznej. Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa
- 01.10.2015 – 28.02.2016: asystent w grupie pracowników naukowo – dydaktycznych w Instytucie Fizyki Technicznej. Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa
- 01.10.2013 – 30.09.2015: starszy inżynier w Instytucie Fizyki Technicznej. Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Przed omówieniem cyklu powiązanych tematycznie artykułów opiszę w sposób syntetyczny rozwój mojej dotychczasowej kariery naukowej, wyróżniając w niej dwa okresy rozdzielone uzyskaniem stopnia doktora.

4.1 Rozwój naukowy przed uzyskaniem stopnia doktora

Moje pierwsze prace badawcze zrealizowałem w trakcie indywidualnych studiów magisterskich na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej

im. Jarosława Dąbrowskiego. Podjęte przeze mnie zagadnienia dotyczyły pomiarów charakterystyk transmisyjnych dyspleja ciekłokrystalicznego sterowanego napięciem o określonym przebiegu i amplitudzie.

W czerwcu 2008 roku ukończyłem jednolite studia magisterskie na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej, uzyskując tytuł magistra inżyniera na kierunku fizyka techniczna - w specjalności fizyka komputerowa - z oceną *bardzo dobry*. W ramach mojej pracy magisterskiej wykonałem fragment optymalizacji – poprzez dobór polaryzatorów – wyświetlacza ciekłokrystalicznego bazującego na efekcie skręconego nematyka (ang. *Twisted Nematic* – TN) pracującego w oświetleniu zewnętrznym o dużym natężeniu. Wyniki pracy zostały opublikowane w artykule naukowym (**pkt I.2.A1[#]**) oraz przedstawione w formie posteru na międzynarodowej konferencji naukowej (**pkt I.3.P9[#]**).

W październiku 2008 roku rozpocząłem studia doktoranckie na Wydziale Nowych Technologii i Chemii WAT. Pracę doktorską wykonywałem pod kierunkiem dr. hab. inż. Janusza Parki. Zagadnienia podjęte w trakcie moich studiów doktoranckich były niezwykle innowacyjne i obejmowały badania ciekłokrystalicznych przetworników metamateriałowych o przestrajalnych właściwościach refrakcyjnych w zakresie GHz i THz. Podjęcie zagadnienia wymagało mego udziału w spotkaniach naukowych organizowanych w ramach programu *Metamorphose* oraz *European Doctoral School on Metamaterials*. Uczestniczyłem w nich dwukrotnie - w 2009 roku w Finlandii ukończyłem kurs "*Fundamentals of Metamaterials Electromagnetics*" organizowany przez *GETA Graduate School* i *Helsinki University of Technology* (**pkt II.7.S1[#]**) oraz w 2011 roku w Hiszpanii wziąłem udział w kursie "*Engineering applications of metamaterials (including microwaves, THz, optics, and acoustic)*" (**pkt II.7.S2[#]**). Uczestnictwo w nich było cennym doświadczeniem oraz pozwoliło na poszerzenie specjalistycznej wiedzy nt. struktur plazmonowych, metamateriałów oraz ich potencjalnych możliwości aplikacyjnych. Dodatkowo, w 2012 roku brałem udział w szkole mikrofalowej - "*International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves*" organizowanej w Czechach (**pkt II.7.S3[#]**). W latach 2011 i 2012 zostałem laureatem Mazowieckiego Stypendium Doktoranckiego - Projekt "*Rozwój nauki - rozwojem regionu - stypendia i wsparcie towarzyszące dla mazowieckich doktorantów.*"

W ramach wykonywanych prac byłem wykonawcą w 2 grantach, które były realizowane na Wydziale Nowych Technologii i Chemii WAT. Pierwszym z nich był projekt kluczowy nr POiG 01.03.01-14-016/08 „*Nowe materiały fotoniczne i ich zaawansowane zastosowania*” (**pkt II.5.G7[#]**), w ramach którego wykonywałem m.in.: charakteryzację parametrów

materiałowych ciekłych kryształów w zakresie GHz metodami rezonatorowymi oraz analizę numeryczną struktur metamateriałowych o przestrajalnych parametrach w zakresie GHz i THz. Drugim zaś był projekt badawczo-rozwojowy pt. „*Przestrajalne ciekłokrystaliczne przetworniki na zakres THz i GHz*”, nr 0144/R/T00/2010/12 (**pkt II.5.G6[#]**), gdzie moje prace badawcze koncentrowały się na projektowaniu metamateriałów hybrydowych dla częstotliwości GHz i THz. Do jego realizacji zostało powołane konsorcjum w skład którego weszły WAT, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk oraz Przemysłowe Centrum Optyki, które było zainteresowane wdrożeniem wyników naszych prac koncepcyjnych dotyczących przestrajalnych metamateriałów. W październiku 2013 roku zostałem zatrudniony na etacie starszego inżyniera w Zakładzie Fizyki i Technologii Kryształów WAT w pełnym wymiarze godzin.

W dniu 22 maja 2014 roku uchwałą Rady Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT - na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej pt. „*Liquid crystal metamaterial transducers with tunable parameters in GHz and THz frequency range*” oraz po złożeniu wymaganych egzaminów - uzyskałem stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria materiałowa, specjalność: *metamateriały*. Celem pracy było zaprojektowanie, symulacje numeryczne oraz wytworzenie i przebadanie przetworników ciekłokrystalicznych ze strukturami metamateriałowymi o przestrajalnych parametrach w zakresie GHz i THz. Rozprawa doktorska została obroniona z wyróżnieniem, zaś wyniki w niej zawarte zyskały uznanie w konkursie Polskiego Towarzystwa Ciekłokrystalicznego na najlepszą pracę doktorską (edycja 2014), gdzie zostałem laureatem 1. miejsca.

4.2 Rozwój naukowy po uzyskaniu stopnia doktora

Mój rozwój naukowy po uzyskaniu stopnia doktora uwarunkowany był w głównej mierze dwiema kwestiami – uzyskaniem finansowania moich badań w postaci kilku grantów badawczych oraz rozwijającą się współpracą międzynarodową.

W latach 2013-2018 kierowałem trzema projektami badawczymi z dziedziny badań podstawowych – Preludium pt. „*Nowe materiały typu metal – dielektryk na bazie kwarcu i metali szlachetnych na zakres THz*” nr UMO-2012/07/N/ST8/03284 finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki (**pkt II.5.G2[#]**), Sonata pt. „*Ciekłokrystaliczne przetworniki z nanostrukturami metamateriałowymi o przestrajalnych parametrach w zakresie bliskiej podczerwieni*” nr UMO-2015/17/D/ST8/02428 finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki (**pkt II.5.G3[#]**) oraz Iuventus Plus pt. „*Przestrajalne właściwości przetworników*

metamateriałowych o krótkich czasach odpowiedzi w zakresie THz” nr IP2015 036574 finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (**pkt II.5.G4[#]**). Co prawda projekt Preludium otrzymałem jeszcze w trakcie trwania studiów doktoranckich, jednak główne zadania badawcze były realizowane w latach 2014-2015, czyli po uzyskaniu stopnia doktora. Ww. projekty okazały się niezwykle istotne z punktu widzenia opisywanego osiągnięcia naukowego. Udana realizacja zadań badawczych przyczyniła się do powstania szeregu publikacji, w tym wchodzących w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych (**pkt I.1.H1-H7[#]**). W latach 2014-2015, w uznaniu za wyróżniające się osiągnięcia naukowe, zostałem dwukrotnym laureatem prestiżowego stypendium Start przyznawanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej.

W 2018 roku, w trakcie konferencji *XXII Conference on Liquid Crystals - Chemistry, Physics and Applications (CLC'2018)*, organizowanej w Jastrzębiej Górze nawiązałem kontakt z prof. Roberto Caputo z University of Calabria. Dzięki temu otrzymałem zaproszenie na krótki staż naukowy (**pkt II.7.S5[#]**), w trakcie którego wspólnie podjęliśmy decyzję o zacieśnieniu współpracy badawczo-naukowej dotyczącej metamateriałów hybrydowych i ubieganiu się o projekt bilateralny w konkursie Canaletto organizowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej. Zaproponowana tematyka zyskała uznanie w oczach komisji konkursowej i projekt pt. „*Aktywne metamateriały bazujące na nowej generacji materiałach ciekłokrystalicznych (LCMETA)*” nr PPN/BIL/2018/2/00051/U/00001 (**pkt II.5.G5[#]**) otrzymał finansowanie. Pełnienie roli kierownika projektu Canaletto otworzyło mi możliwość odbycia kolejnego - tym razem - 2-miesięcznego stażu naukowego w grupie prof. Roberto Caputo (**pkt II.7.S3[#]**). Wymiernym efektem wspomnianej współpracy zagranicznej było uczestnictwo w powstaniu książki „*Hybrid Flatland Metastructures*”, gdzie jestem autorem jednego z rozdziałów (**pkt II.1.R1[#]**) pt. "*Hybrid Metastructures Enabled by Dual-Frequency Liquid Crystals*". Owocem udanej współpracy jest również kilka wspólnych publikacji naukowych w uznanych czasopismach z listy filadelfijskiej: (**pkt I.1.H8[#]**), (**pkt II.2.A16[#]**) oraz (**pkt II.2.A17[#]**). W 2020 roku zostałem laureatem konkursu dla wybitnych młodych naukowców, organizowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

W bieżącym roku uzyskałem kolejne finansowanie moich badań w postaci 4-letniego projektu badawczego Sonata Bis pt. „*Przestrzajalne i ultraszybkie terahercowe metamateriały hybrydowe bazujące na efekcie plazmonicznej przezroczystości*” nr UMO-2022/46/E/ST7/00454 (**pkt II.5.G1[#]**). Projekt jest finansowany przez Narodowe Centrum

Nauki, zaś część badań będzie przeprowadzona w ramach współpracy naukowej z grupą pod kierownictwem prof. Roberto Caputo.

4.3. Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b

Ustawy, pod wspólnym tytułem

Przestrajalne metamateriały hybrydowe

Oddziaływanie światła z materią to nieustający przedmiot badań podstawowych o doniosłym znaczeniu aplikacyjnym. Potwierdzeniem tego faktu są m.in. aktualnie prowadzone badania dotyczące przestrajalnych właściwości hybrydowych metamateriałów elektromagnetycznych, plazmoniki metamateriałowej i metafotoniki. Metamateriały elektromagnetyczne to wytwarzane za pomocą nowoczesnych technologii, nie występujące naturalnie w przyrodzie, periodyczne struktury kompozytowe typu metal-dielektryk, które oddziałują rezonansowo jednocześnie z polem elektrycznym i magnetycznym fali elektromagnetycznej. Badania przestrajalnych właściwości metamateriałów hybrydowych zawierających materiały reagujące na bodźce zewnętrzne i elektromagnetyczne metamateriały są przedmiotem mojej działalności naukowo-badawczej, która koncentruje się na projektowaniu, symulacjach numerycznych, wytwarzaniu i badaniu przestrajalnych właściwości hybrydowych mikro- i nanostruktur metamateriałowych. W przedstawionym poniżej osiągnięciu naukowym skupiłem się głównie na opracowaniu przetworników metamateriałowych wykorzystujących efekt synergetyczny, tj. współdziałania zjawisk i właściwości fizycznych składników będących elementami struktury. Badania miały na celu wykrycie ich nowych funkcjonalności oraz wskazanie możliwych zastosowań. Co istotne, opracowane przeze mnie metamateriałowe przetworniki mogą pracować w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Mianowicie, przetworniki zbudowane w oparciu o mikrostruktury metamateriałowe pozwalają przestrajać amplitudę i fazę fal elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości THz, zaś przetworniki z nanostrukturami metamateriałowymi – amplitudę i fazę fal elektromagnetycznych z zakresu widzialnego oraz bliskiej i średniej podczerwieni.

W ramach przeprowadzonych prac dokonałem kompleksowej analizy przestrajalnych właściwości metamateriałów typu metal-dielektryk w ww. zakresach częstotliwości uwzględniając parametry geometryczne i fizyczne metastruktur. W rezultacie

przeprowadzonych badań dokonałem zarówno optymalizacji parametrów przestrajania jak i poprawiłem kinetykę procesów przełączania metamateriałów hybrydowych. Dodatkowo określiłem wpływ właściwości dielektrycznych i optycznych materiałów aktywnych, którymi były ciekłe kryształy oraz grafen, na parametry metamateriałów i możliwości przestrajania rezonansu metamateriałowego.

Efektom realizacji ww. badań są nowe jakościowo i funkcjonalnie materiały typu metal–dielektryk o właściwościach metamateriałów o przestrajalnych parametrach oraz technologia ich wykonania. Mogą one stanowić bazę do wytwarzania nowatorskich urządzeń fotonicznych i optoelektronicznych, takich jak np. modulatory optyczne, filtry, absorbery, czy przestrajalne przesuwniki fazy, o parametrach niemożliwych do uzyskania przy zastosowaniu standardowych, obecnie stosowanych materiałów.

4.2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy:

* - autor korespondencyjny

IF - współczynnik oddziaływania czasopisma z roku, w którym praca została opublikowana/5-letni; wg Journal Citation Reports (JCR) z dnia 30.06.2023.

TC - liczba cytowań (bez autocytowań) wg Web of Science/Scopus/Google Scholar z dnia 30.06.2023.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych stanowiących podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa, zaliczam symulacje elektromagnetyczne oraz badania eksperymentalne przestrajalnych metamateriałów hybrydowych do zastosowań fotonicznych. Aktywne przetworniki metamateriałowe umożliwiają selektywną kontrolę i przestrajanie fal elektromagnetycznych w sposób umożliwiający uzyskanie pożądanych parametrów elementów układów optoelektronicznych. Zagadnienia te zostały opisane we wskazanym dalej jednotematycznym cyklu 10 powiązanych publikacji. Wszystkie publikacje są uwzględnione w bazie danych Journal Citation Report (JCR) i mają określony współczynnik wpływu (IF).

Poniżej przedstawiam listę publikacji, które traktuję jako jednotematyczne osiągnięcie naukowe wraz ze wskazaniem udziału własnego. Cykl artykułów naukowych został podzielony na prace dotyczące przestrajalnych mikro- i nanostruktur metamateriałowych oraz metamateriałów hiperbolicznych.

Przestrzajalne mikrostruktury metamateriałowe

- H1. **R. Kowerdziej***, M. Olifierczuk, J. Parka, J. Wróbel, „*Terahertz characterization of tunable metamaterial based on electrically controlled nematic liquid crystal*”, Appl. Phys. Lett. 105, 022908, (2014).

IF2014/5-letni: 3.302/3.7 (MNiSW2014 = 40); TC: 55(51)/59(55)/65(60)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; zaprojektowanie metamateriału i optymalizację jego parametrów geometrycznych w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych; przygotowanie i przeprowadzenie pomiarów transmitancji w funkcji przyłożonego napięcia z wykorzystaniem układu THz-TDS; wyznaczenie przestrzalności elektrycznej; opracowanie wyników eksperymentu i ich analizę; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 70%.

Praca była współfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu PRELUDIUM (UMO-2012/07/N/ST8/03284), którego byłem kierownikiem.

- H2. **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Experimental study on terahertz metamaterial embedded in nematic liquid crystal*”, Appl. Phys. Lett. 106, 092905, (2015).

IF2015/5-letni: 3.142/3.7 (MNiSW2015 = 40); TC: 33(28)/33(28)/37(30)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; zaprojektowanie metamateriału i optymalizację jego parametrów geometrycznych w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych; przygotowanie i przeprowadzenie pomiarów transmitancji w funkcji przyłożonego napięcia z wykorzystaniem układu THz-TDS; wyznaczenie przestrzalności elektrycznej; opracowanie wyników eksperymentu i ich analizę; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 70%.

Praca była współfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu PRELUDIUM (UMO-2012/07/N/ST8/03284), którego byłem kierownikiem.

- H3. **R. Kowerdziej***, T. Stańczyk, J. Parka, „*Electromagnetic simulations of tunable terahertz metamaterial infiltrated with highly birefringent nematic liquid crystal*”, Liq. Cryst., 42(4), 430-434, (2015).

IF2015/5-letni: 2.244/2.301 (MNiSW2015 = 30); TC: 17(11)/17(11)/22(15)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; wykonanie modelu numerycznego przetwornika metamateriałowego; opracowanie metody i obliczenie efektywnego współczynnika załamania przetwornika metamateriałowego oraz określenie jego przestrzalności; współudział w opracowaniu wyników symulacji i ich analizie; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 60%.

Praca była współfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu PRELUDIUM (UMO-2012/07/N/ST8/03284), którego byłem kierownikiem.

- H4. **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, „*Active control of terahertz radiation using a metamaterial loaded with a nematic liquid crystal*”, *Liq. Cryst.*, 43(8), 1120-1125, (2016). IF2016/5-letni: 2.661/2.301 (MNiSW2016 = 25); TC: 11(7)/11(7)/12(8)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; zaprojektowanie metamateriału i optymalizację jego parametrów geometrycznych w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych; przygotowanie i przeprowadzenie pomiarów transmitancji w funkcji przyłożonego napięcia z wykorzystaniem układu THz-TDS; wyznaczenie przestrajalności elektrycznej przetwornika metamateriałowego; opracowanie wyników eksperymentu i ich analizę; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 90%.

Praca była współfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu PRELUDIUM (UMO-2012/07/N/ST8/03284), którego byłem kierownikiem.

- H5. **R. Kowerdziej***, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Thermally induced tunability of a terahertz metamaterial by using a specially designed nematic liquid crystal mixture*”, *Opt. Exp.*, 26(3), 2443-2452, (2018). IF2018/5-letni: 3.561/3.8 (MNiSW2018 = 45); TC: 28(22)/29(23)/31(24)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; zaprojektowanie metamateriału i optymalizację jego parametrów geometrycznych w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych; przygotowanie i przeprowadzenie pomiarów transmitancji w funkcji temperatury z wykorzystaniem układu THz-TDS; wyznaczenie przestrajalności termicznej przetwornika metamateriałowego; opracowanie wyników eksperymentu i ich analizę; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 70%.

Praca była finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu IUVENTUS PLUS (0365/IP2/2016/74), którego byłem kierownikiem.

Przestrajalne nanostruktury metamateriałowe

- H6. **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, „*Tunable dual-band liquid crystal based near-infrared perfect metamaterial absorber with high-loss metal*”, *Liq. Cryst.*, 46(10), 1568-1573, (2019). IF2019/5-letni: 2.908/2.301 (MNiSW2019 = 70); TC: 23(21)/23(21)/24(21)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; wykonanie modelu numerycznego przestrajalnego absorbera metamateriałowego; optymalizację parametrów geometrycznych metamateriału i jego absorbancji w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych; opracowanie wyników symulacji i ich analizę; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 90%.

Praca była finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu SONATA (UMO-2015/17/D/ST8/02428), którego byłem kierownikiem.

- H7. **R. Kowerdziej***, J. Wróbel, P. Kula, „*Ultrafast electrical switching of nanostructured metadvice with dual-frequency liquid crystal*”, *Sci Rep* 9, 20367 (2019).
IF2019/5-letni: 3.998/4.9 (MNiSW2019 = 140); TC: 29(27)/34(32)/42(39)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie koncepcji pracy; zaprojektowanie metamateriału i optymalizację jego parametrów geometrycznych w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych; przygotowanie i przeprowadzenie pomiarów transmisji w funkcji przyłożonego napięcia; wyznaczenie przestrajalności elektrycznej; obliczenie efektywnej przenikalności elektrycznej przetwornika metamateriałowego; opracowanie wyników eksperymentu i ich analizę; sformułowanie ostatecznych wniosków; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 80%.

Praca była współfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu SONATA (UMO-2015/17/D/ST8/02428), którego byłem kierownikiem.

- H8. **R. Kowerdziej***, A. Ferraro*, D. C. Zografopoulos*, R. Caputo*, „*Soft-Matter-Based Hybrid and Active Metamaterials*”, *Adv. Opt. Mat.* 10, 2200750 (2022).
IF2022/5-letni: 10.050/9.5 (MNiSW2019 = 140); TC: 7(7)/9(9)/11(11)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: współautorstwo koncepcji pracy; przygotowanie rozdziału o metamateriałach samoorganizujących się; współudział w edycji manuskryptu. Mój udział procentowy – 30%.

Aktywne metamateriały hiperboliczne

- H9. A. Pianelli*, **R. Kowerdziej***, M. Dudek, K. Sielezin, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Graphene-based hyperbolic metamaterial as a switchable reflection modulator*”, *Opt. Exp.*, 28(5), 6708-6718, (2020).
IF2020/5-letni: 3.669/3.8 (MNiSW2020 = 140); TC: 29(26)/31(28)/37(32)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: opracowanie wyników i ich analizę; współedytowanie manuskryptu oraz przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 30%.

- H10. M. Dudek, **R. Kowerdziej***, A. Pianelli, J. Parka, „*Graphene-based tunable hyperbolic microcavity*”, *Sci Rep* 11, 74 (2021).
IF2021/5-letni: 4.996/4.9 (MNiSW2020 = 140); TC: 15(13)/11(9)/17(13)

Mój wkład w powstanie pracy obejmował: autorstwo koncepcji pracy; współudział w symulacjach przestrajalnej mikrownęki hiperbolicznej; współudział w opracowaniu wyników symulacji i ich analizie; naukowy opis wyników symulacji; redakcję manuskryptu i przeprowadzenie procesu publikacji. Mój udział procentowy – 40%.

4.3. Omówienie celu prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich potencjalnego wykorzystania:

I. Wstęp i tło naukowe badań.

Metafotonika to multidyscyplinarna i dynamicznie rozwijająca się dziedzina, która zajmuje się kontrolą fal elektromagnetycznych za pomocą wzajemnych oddziaływań elektrycznych i magnetycznych zachodzących w periodycznych strukturach metamateriałowych [1]. Ze względu na możliwość kontrolowania różnych właściwości optycznych, takich jak amplituda, faza, polaryzacja, a także długość fali w mikro- i nanoskali, metafotonika może znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach, w tym w czujnikach, modulatorach, komunikacji, energetyce i biotechnologii [2]. Jednak realizacja takich zastosowań wymaga nanoinżynierii odpowiednich sztucznych ośrodków o właściwościach elektromagnetycznych w zakresie widzialnym, podczerwonym i terahercowym, które są zaprojektowane tak, aby przewyższały właściwości dowolnego naturalnie występującego materiału. Dzięki rozwojowi i ewolucji technik elektronolitografii które pozwalają z wysoką dokładnością wytwarzać metapowierzchnie, na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat obserwujemy niesłabnące zainteresowanie projektowaniem i badaniem zaawansowanych urządzeń metafotonicznych [3, 4]. W opisywanym osiągnięciu naukowym prezentuję węższe ujęcie specjalnie zaprojektowanych mikro- i nanostruktur metamateriałowych do aktywnej modulacji promieniowania z zakresu THz, widzialnego oraz bliskiej i średniej podczerwieni. Zamodelowane w procesach symulacji numerycznych metamateriały zostały wykorzystane do opracowania szeregu przetworników stanowiących hybrydowe połączenie metapowierzchni z materiałem aktywnym, reagującym na bodźce zewnętrzne w postaci pola elektrycznego bądź temperatury. Jako materiały aktywne wykorzystałem opracowane w Instytucie Chemii WAT mieszaniny ciekłokrystaliczne [H1-H8] oraz grafen [H9, H10]. Dzięki temu poznaliśmy odpowiedź na pytanie jakie graniczne i optymalne parametry przestrajania można uzyskać w metamateriałach stosując do ich budowy ww. materiały aktywne. Co istotne, opracowałem i opisałem zarówno koncepcje teoretyczne przestrajalnych i hybrydowych przetworników metamateriałowych zoptymalizowanych w procesach symulacji elektromagnetycznych [H3, H6, H9, H10] oraz wytworzyłem i następnie dokonałem weryfikacji eksperymentalnej wybranych koncepcji takich urządzeń [H1, H2, H4, H5, H7]. Rozwój i ewolucja tematyki badawczej dotyczącej aktywnych i hybrydowych metamateriałów wykorzystujących materię miękką została również podsumowana w artykule przeglądowym, który powstał w ramach

współpracy z partnerami zagranicznymi [H8]. Metamateriały hybrydowe będące przedmiotem osiągnięcia naukowego dają możliwość kontrolowanego kształtowania parametrów fal elektromagnetycznych, a dzięki temu mogą stanowić platformę do konstruowania nowoczesnych urządzeń fotonicznych, a także możliwe jest bezpośrednie stosowanie tego typu rozwiązań w fotonicznych i optoelektronicznych systemach pomiarowych [2-4].

W toku prowadzonych badań opracowałem przestrajalne elektrycznie i termicznie ciekłokrystaliczne przetworniki metamateriałowe na zakres THz [H1-H5], dwuczęstotliwościowy absorber metamateriałowy na zakres bliskiej podczerwieni [H6], nanostrukturalny metamateriał wykorzystujący dwuczęstotliwościowy ciekły kryształ o całkowitym czasie odpowiedzi nieprzekraczającym 2ms [H7] oraz koncepcje aktywnych urządzeń bazujących na metamateriałach hiperbolicznych w postaci stosów naprzemiennie ułożonych warstw przewodzących i dielektrycznych [H9, H10].

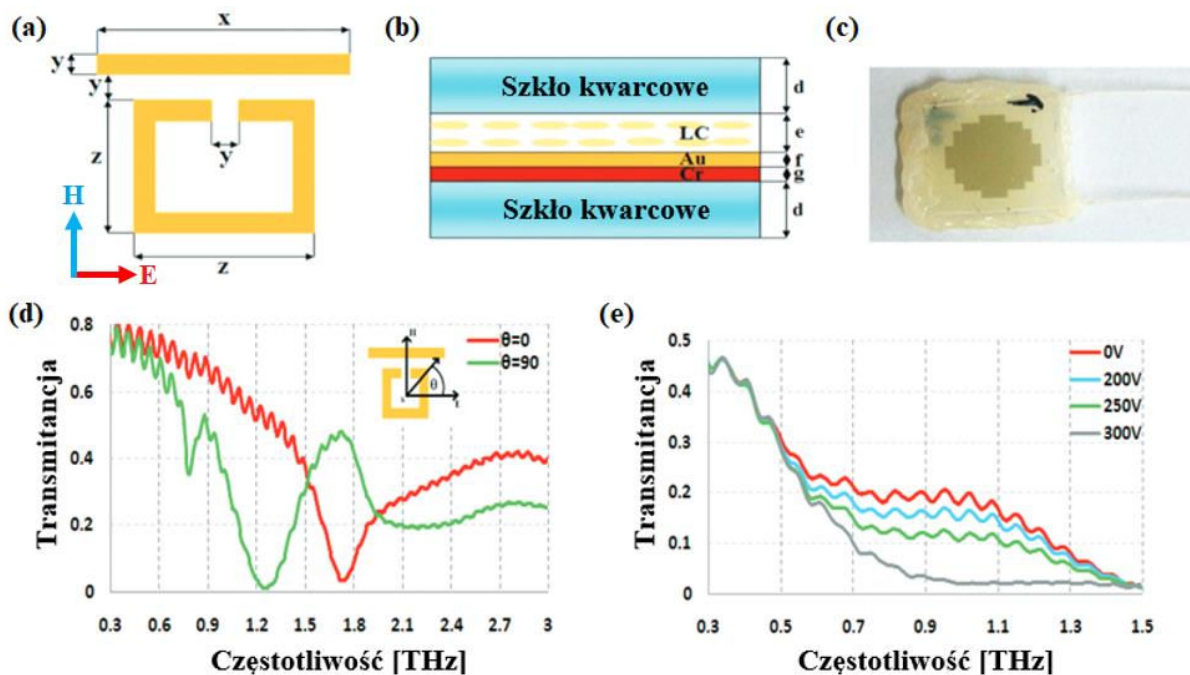
Biorąc pod uwagę powyższe, dalsza część autoreferatu opisująca wskazany cykl publikacji została podzielona na trzy bloki tematyczne:

- II. Przestrajalne mikrostruktury metamateriałowe.
- III. Przestrajalne nanostruktury metamateriałowe.
- IV. Aktywne metamateriały hiperboliczne.

II. Przestrajalne mikrostruktury metamateriałowe

Przestrajalne mikrostruktury metamateriałowe stanowią ciekłokrystaliczne przetworniki z mikrostrukturami metamateriałowymi o częstotliwościach rezonansowych w zakresie THz. W tej części prac zasymulowałem przetworniki hybrydowe typu metamateriał – ciekły kryształ (ang. *Liquid Crystal* – LC) dokonując jednocześnie optymalizacji konfiguracji tego typu przetworników. Wspomniana optymalizacja dotyczyła zarówno wymiarów geometrycznych metapowierzchni jak również doboru odpowiednich parametrów materiału aktywnego (grubość warstwy, dwójłomność, stratność). Opracowane w wyniku procesów symulacji elektromagnetycznych metamateriały hybrydowe miały zapewniać efektywną przestrajalność promieniowania terahercowego. Głównym celem prac była optymalizacja przestrajalności rozumianej jako zmiana amplitudy i fazy transmitancji i reflektancji poprzez reorientację molekuł LC pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego (przestrajalność elektryczna) [H1-H4] bądź kontrolowany wzrost temperatury prowadzący do przejścia fazowego nematyk – ciecz izotropowa (przestrajalność termiczna) [H5]. Optymalizacji przestrajalności dokonano poprzez zastosowanie mieszanin ciekłokrystalicznych o wysokiej wartości dwójłomności

($\Delta n \approx 0.4$ w 23°C dla 0.5 THz) i niskiej stratności ($\tan\delta < 10^{-2}$) oraz zachowaniu obniżonej temperatury przejścia fazowego ($T_{N-I} \approx 50^\circ\text{C}$). Wybraną koncepcję przestrajalnego elektrycznie przetwornika metamateriałowego w zakresie THz przedstawiłem na rys.1. [H1]. Struktura metamateriałowa widoczna na rys.1(a) została wykonana przy użyciu systemu do elektronolitografii, który składał się ze skaningowego mikroskopu elektronowego (JEOL 6400) i dedykowanego narzędzia litograficznego (Raith Elphy-Plus). Całkowity rozmiar metapowierzchni wynosił $13 \times 13\text{ mm}$ i był dobrany tak, aby pasował do średnicy wiązki promieniowania terahercowego w układzie THz-TDS. Planarna metapowierzchnia została wykonana ze złota na szkłe kwarcowym o grubości 1 mm i miała wysokość ok. 160 nm oraz składała się z 12816 komórek elementarnych o minimalnym wymiarze $y = 8\ \mu\text{m}$. Jak widzimy na rys.1(a) pojedyncza komórka metamateriału składa się z pręta oraz rozciętego rezonatora kwadratowego. Pręt stanowi tzw. atom elektryczny, zaś rozcięty rezonator – atom magnetyczny. Fala elektromagnetyczna jest spolaryzowana liniowo w taki sposób, że wektor natężenia pola elektrycznego jest równoległy do długiej osi pręta, zaś wektor natężenia pola magnetycznego jest prostopadły do rozcięcia rezonatora magnetycznego.



Rys. 1. Przestrajalny elektrycznie ciekłokrystaliczny przetwornik metamateriałowy na zakres THz [H1]. (a) Schemat komórki elementarnej metapowierzchni o wymiarach $x = 72\ \mu\text{m}$, $y = 8\ \mu\text{m}$, $z = 40\ \mu\text{m}$. (b) Przekrój poprzeczny przetwornika metamateriałowego zbudowanego w oparciu o szkło kwarcowe o grubości $d = 1\text{ mm}$, warstwę LC o grubości $e = 0.5\text{ mm}$, metapowierzchnię o grubości $f = 0.16\ \mu\text{m}$ oraz warstwę adhezyjną w postaci chromu o grubości $g \approx 5\text{ nm}$. (c) Zdjęcie

przetwornika. (d) Transmitancja metamateriału w funkcji częstotliwości dla dwóch orientacji wektora natężenia pola elektrycznego – horyzontalnej i wertykalnej. (e) Widma transmitancji przetwornika metamateriałowego dla różnych napięć sterujących.

Ideę oddziaływania metamateriału z falą elektromagnetyczną możemy opisać w następujący sposób [5-7]. Wyobraźmy sobie metaliczny pręt, który jest równoległy do wektora natężenia pola elektrycznego fali elektromagnetycznej. W wyniku działania pola elektrycznego następuje przesunięcie ładunku w pręcie metalicznym, tzn. po jednej stronie pręta indukowane są ładunki ujemne, a po drugiej dodatnie. Ten rozkład ładunku jest znany jako dipol elektryczny. Wartość indukowanego momentu dipolowego (p) jest proporcjonalna do przyłożonego pola elektrycznego (E): $p = \alpha_e E$. Stała α_e jest nazywana polaryzowalnością elektryczną. Dodatkowo, jeśli mamy pętlę z przewodnika, taką jak rozcięty rezonator kwadratowy usytuowany pod metalicznym prętem (rys.1(a)), to w przewodniku będzie indukowany zmienny w czasie prąd, którego wartość jest wprost proporcjonalna do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego przechodzącego przez pętlę. Pole to wytwarzane jest przez prąd płynący w metalicznym pręcie. Ten krążący prąd powoduje powstanie odpowiadającego pola magnetycznego, które - jeśli pętla jest wystarczająco mała - zachowuje się dokładnie jak dipol magnetyczny. Efektywny magnetyczny moment dipolowy (m) jest równy iloczynowi prądu indukowanego w pętli i powierzchni tej pętli: $m = IA$. Wartość momentu magnetycznego jest wprost proporcjonalna do przyłożonego pola magnetycznego (H): $m = \alpha_m H$. Współczynnik proporcjonalności α_m jest nazywany polaryzowalnością magnetyczną [5-7]. W związku z tym w opisywanych metamateriałach THz zwykle obserwuje się dwa główne rezonanse. Pierwszym z nich jest tzw. rezonans indukcyjno-pojemnościowy niskiej częstotliwości, który jest spowodowany oscylującymi prądami w rozciętych rezonatorach kwadratowych (spełniających rolę cewek) i gromadzeniem się ładunku w ich szczelinach (spełniających rolę kondensatorów). Z kolei drugi rezonans - występujący w wyższych częstotliwościach - możemy opisać jako rezonans elektryczny typu dipolowego, czyli de facto pochodzący od metalicznych prętów [H1, H2].

Przestrajalny elektrycznie przetwornik metamateriałowy został zbudowany z dwóch podłoży kwarcowych o grubości $d=1\text{mm}$, zaś rolę dystanserów jak i elektrod pełniły cienkie przewody o grubości około 0.5mm . W celu osiągnięcia przestrajalnych parametrów przetwornik został napełniony nematyczną mieszaniną ciekłokrystaliczną (ang. *Nematic Liquid Crystal* – NLC) 2002C o wysokiej wartości dwójłomności ($\Delta n=0.42$ w 23°C dla 1THz), zsyntetyzowaną w ICH

WAT [8,9]. Badania eksperymentalne wykonane z wykorzystaniem spektroskopii terahercowej w dziedzinie czasu (ang. *Terahertz Time Domain Spectroscopy* – THz-TDS) obejmowały zarówno charakteryzację samej metapowierzchni (rys.1(d)), jak i zbadanie elektrycznej przestrajalności meta-przetwornika z warstwą ciekłokrystaliczną (rys.1(e)). W przypadku przedstawionym na rys.1(d), kąt θ opisuje orientację wektora natężenia pola elektrycznego względem długiej osi metalicznych prętów. Zatem gdy $\theta = 0^\circ$ wektor natężenia pola elektrycznego jest równoległy do długich osi metalicznych mikropasków. Analogicznie, gdy $\theta = 90^\circ$ - wektor natężenia pola elektrycznego jest prostopadły do długich osi prętów metalicznych. Z rys.1(d) widzimy, że obrót metastruktury o 90° względem polaryzacji fali elektromagnetycznej powoduje przesunięcie częstotliwości rezonansowej o około 0.46Hz, tj. z 1.73THz na 1.27 THz. Zafalowania transmitancji są związane z występowaniem interferencji Fabry'ego-Perota, które są spowodowane wewnętrznymi odbiciami fali między kolejnymi warstwami granicznymi. Finalnym efektem prac było określenie przestrajalności elektrycznej przetwornika metamateriałowego wypełnionego wspomnianą wyżej nematyczną mieszaniną ciekłokrystaliczną. Wyniki eksperymentalne przedstawione na rys.1(e) dowodzą, że maksymalna wartość przestrajalności transmitancji wyniosła 19% dla częstotliwości ok. 1THz. Przystrojenie warstwy ciekłego kryształu wymagało przyłożenia napięcia $U=300V$, w związku z tym, że elektrody – pełniące jednocześnie rolę dystanserów - były oddalone od siebie o ok. 13mm [H1]. Warto podkreślić, że taka konstrukcja przetwornika wynikała z braku możliwości wykorzystania np. tlenku indowo-cynowego (ang. *Indium Tin Oxide* – ITO) jako warstwy przewodzącej – w zakresie THz taki materiał nie jest wystarczająco transparentny – ze względu na dość wysoką rezystywność.

Analogiczna metodyka badawcza została zastosowana do przetwornika metamateriałowego bazującego na metapowierzchni w postaci skrzyżowanych prętów metalicznych, w literaturze określanej jako struktura typu „*fish-net*” [H2]. W tym przypadku maksymalna przestrajalność transmitancji wyniosła około 11% dla częstotliwości około 1.1 THz. Efekt ten uzyskano przykładając maksymalne napięcie elektryczne wynoszące 200V. Całość prac dotyczących przestrajalnych elektrycznie mikrostruktur metamateriałowych bazujących na ciekłych kryształach uzupełniają prace dotyczące modelu numerycznego przetwornika metamateriałowego wypełnionego NLC 1825 o wysokiej wartości dwójłomności [H3] oraz badania eksperymentalne w których przetwornik metamateriałowy został wykorzystany jako przestrajalny filtr na zakres THz [H4]. Co istotne, w pracy [H3] ciekłokrystaliczny przetwornik metamateriałowy charakteryzuje się ujemnym i przestrajalnym efektywnym współczynnikiem

załamania. W przeciwieństwie do poprzednich modeli przestrajalnych planarnych metamateriałów [H1, H2], w tym przypadku fala elektromagnetyczna propaguje się wzdłużnie. Oznacza to, że wektor natężenia pola elektrycznego jest równoległy do metalicznych prętów, zaś wektor natężenia pola magnetycznego jest prostopadły do płaszczyzny rozciętego rezonatora kwadratowego. W rezultacie możliwe było uzyskanie zarówno ujemnej przenikalności elektrycznej, jak i magnetycznej, co w efekcie końcowym pozwoliło uzyskać ujemny efektywny współczynnik załamania. Ponadto - dzięki przeorientowaniu warstwy ciekłokrystalicznej - możliwe było przestrojenie rezonansu metamateriałowego o 0.8 THz. Prace stanowiły szeroko pojętą analizę numeryczną i obejmowały zaprojektowanie metamateriału, wykonanie rozkładów pola elektromagnetycznego dla metapowierzchni, wyznaczenie zespolonych parametrów rozproszenia w funkcji częstotliwości, określenie przestrajalności oraz policzenie efektywnego, zespolonego współczynnika załamania przetwornika metamateriałowego [H3]. W modelu numerycznym podłoża dielektryczne były zamodelowane jako bezstratny dielektryk o przenikalności elektrycznej $\epsilon_d = 4.5$, zaś elementy metaliczne jako idealny przewodnik (ang. PEC – perfect electric conductor) o przewodności elektrycznej $\sigma = 2380000 S/m$. Warstwa ciekłego kryształu została zasymulowana jako ośrodek anizotropowy o następujących przenikalnościach elektrycznych: $\epsilon_{||} = 4.01$, $\epsilon_{\perp} = 2.57$. W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej uzyskałem zespoloną (tj. amplitudę oraz fazę) transmisję oraz zespolone odbicie w funkcji częstotliwości THz. To z kolei umożliwiło obliczenie impedancji, a także efektywnego zespolonego współczynnika załamania oraz jego przestrajalności [H3].

Dla fali płaskiej padającej na przetwornik metamateriałowy o grubości d , oznaczmy przez S_{11} odbicie, zaś przez S_{21} transmisję, która to jest powiązana ze współczynnikiem transmisji t poprzez równanie: $S_{21} = te^{ik_0d}$ gdzie k_0 jest wektorem falowym fali padającej w wolnej przestrzeni. Parametry rozpraszania są powiązane ze współczynnikiem załamania n i impedancją z w następujący sposób [10]:

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{i2nk_0d})}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}}, \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{ink_0d}}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}}, \quad (2)$$

gdzie $R_{01} = z - 1/z + 1$.

W rezultacie efektywny zespolony współczynnik załamania n oraz impedancję z możemy wyznaczyć posługując się poniższymi zależnościami:

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - (S_{21})^2}{(1-S_{11})^2 - (S_{21})^2}}, \quad (3)$$

$$e^{ink_0d} = X \pm i\sqrt{1 - X^2},$$

gdzie: $X = 1/2 \cdot S_{21}(1 - (S_{11})^2 + (S_{21})^2)$.

$$n = \frac{1}{k_0d} \{ [\ln(e^{ink_0d})]'' + 2m\pi \} - i[\ln(e^{ink_0d})]'}, \quad (4)$$

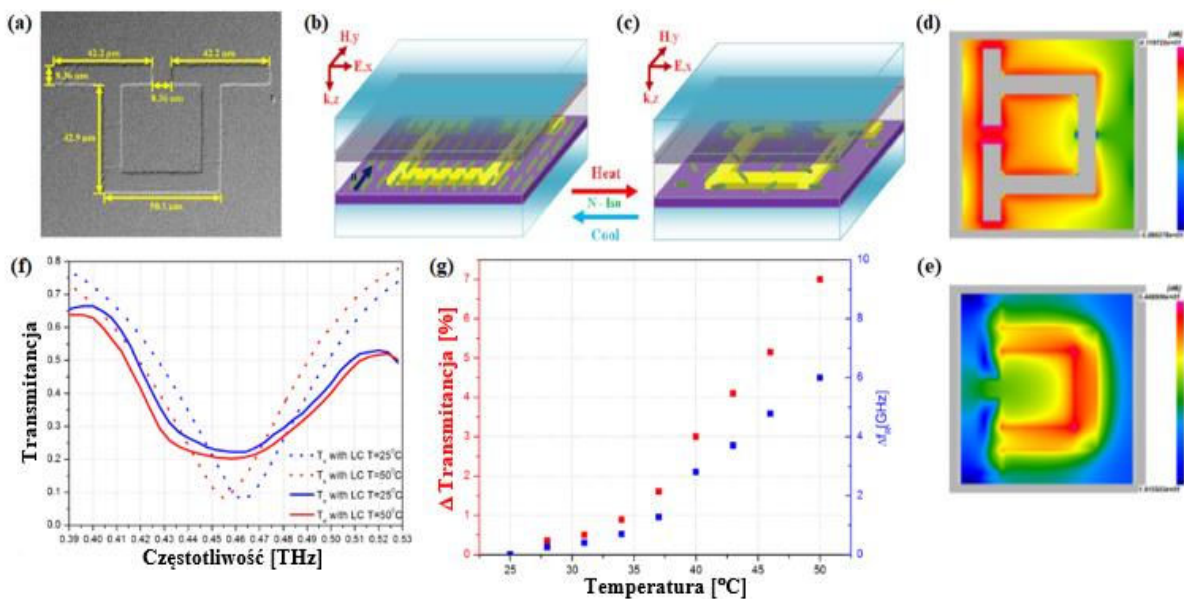
gdzie m jest pewną stałą zależną od ośrodka [10].

Symulacje elektromagnetyczne wykonałem metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. *Finite Difference Time Domain* – FDTD), z wykorzystaniem symulatora elektromagnetycznego QuickWave 3D. W ramach prac dotyczących przestrajalnych elektrycznie mikrostruktur metamateriałowych przeprowadziłem również analizę numeryczną oraz badania eksperymentalne w których przetwornik metamateriałowy pełnił rolę przestrajalnego filtra w zakresie THz [H4]. Przeprowadzone badania udowodniły, że przestrajalne ciekłokrystaliczne przetworniki metamateriałowe pozwalają kontrolować nie tylko amplitudę, ale również fazę fali elektromagnetycznej w zakresie THz. Maksymalna przestrajalność amplitudy transmisji wyniosła 27% dla częstotliwości 0.7 THz, zaś maksymalna przestrajalność fazy - 28° [H4].

Ostatnia koncepcja ciekłokrystalicznego przetwornika metamateriałowego dotyczy badań przestrajalności termicznej w zakresie THz [H5]. Schemat poglądowy przestrajalnego przetwornika oraz wybrane wyniki analizy numerycznej i badań eksperymentalnych przedstawiłem na rys.2.

Celem badań dotyczących przestrajalności termicznej mikrostruktur metamateriałowych było uzyskanie jak największej przestrajalności częstotliwości rezonansowej przy zachowaniu możliwie najniższej temperatury niezbędnej do wywołania tego efektu. Zatem mieszanina ciekłokrystaliczna powinna spełniać dwa główne kryteria – cechować się wysoką wartością dwójłomności w zakresie THz oraz niską temperaturą przejścia fazowego nematic – ciecz izotropowa. Specjalnie w tym celu w ICH WAT zostały zsyntetyzowane składniki mieszaniny nematicznej 3073 [11]. Zastosowano w niej składniki posiadające cząsteczki o dużej anizotropii polaryzowalności elektronowej α_e , która wynika z obecności wydłużonego sprzężonego układu wiązań π . Taką budowę posiadają materiały wykazujące wysoką dwójłomność. Najbardziej pożądane były związki o dużym stosunku długości do szerokości i sztywnych rdzeniach złożonych z pierścieni aromatycznych. Z tego powodu zastosowano bocznie fluoro-podstawione 4-izotiocyaniano-4'-(4-alkilofenylo)tolany które charakteryzują się dwójłomnością około 0.5, jednak ich temperatury topnienia i klarowania są zbyt wysokie,

co sprawia, że nadają się one jedynie jako domieszki w ilościach nie przekraczających 10% wagowych. Dla projektowanej mieszaniny o zwiększonej dwójłomności, korzystne jest zastosowanie niżej dwójłomnych składników bazowych, które sprawiają, że utrzymują temperaturę przemiany fazowej nematic – ciecz izotropowa w pobliżu 50°C. Ponadto, materiały te mają temperaturę izotropizacji bliską 40-60°C i dwójłomność około 0.3. Z kolei, zastosowana polarna grupa NCS połączona z układem rdzeniowym wykazuje dualne działanie, generuje dodatni moment dipolowy oraz przedłuża równoległą składową polaryzowalności elektronowej [11].



Rys. 2. Przestrajalny termicznie ciekłokrystaliczny przetwornik metamateriałowy na zakres THz [H5]. (a) Widok komórki elementarnej metapowierzchni oraz jej wymiary geometryczne. (b) Schemat przetwornika metamateriałowego wypełnionego mieszaniną ciekłokrystaliczną o uporządkowaniu homogenicznym – w temperaturze pokojowej (25°C). (c) Schemat przetwornika metamateriałowego wypełnionego cieczą izotropową – w temperaturze przekraczającej temperaturę przejścia fazowego nematic – ciecz izotropowa (50°C). (d) Rozkład pola elektrycznego i (e) magnetycznego wokół metamateriału dla częstotliwości rezonansowej. (f) Przestrajalność termiczna transmisji oraz częstotliwości rezonansowej przetwornika metamateriałowego w funkcji temperatury.

W celu skonstruowania przestrajalnego termicznie przetwornika metamateriałowego warstwę mieszaniny NLC 3073 o grubości 15μm umieszczono pomiędzy dwoma równoległymi podłożami kwarcowymi o grubości 1mm. Na jednym z podłoży kwarcowych została wykonana

metastruktura o grubości około 200nm mająca postać rozciągniętego rezonatora kwadratowego (rys.2(a)). Następnie obie powierzchnie kwarcowe pokryto cienką warstwą poliimidu Sunever SE-130 (*Nissan Chemical Industries, Ltd.*), który został następnie poddany rubbingowi, którego kierunek został zaznaczony granatową strzałką na rys.2(b). Tak skonstruowany przetwornik metamateriałowy został najpierw scharakteryzowany w układzie THz-TDS w temperaturze pokojowej (25°C), zaś następnie w funkcji temperatury, aż do temperatury przekraczającej temperaturę przejścia fazowego N-Iso (tj. około 48°C), rys.2(c). W rezultacie przeprowadzonych badań określiłem przestrajalność termiczną rezonansu metamateriałowego. Ponadto, przeprowadziłem również symulacje elektromagnetyczne opisywanego przetwornika, wykonałem rozkłady pola elektrycznego (rys.2(d)) oraz magnetycznego (rys.2(e)) a także określiłem teoretyczny limit przestrajalności temperaturowej (8GHz). Co istotne, uzyskałem zarówno przestrajalność amplitudy transmitancji (7%) jak i częstotliwości rezonansowej (6GHz). Eksperymentalnie zmierzona przestrajalność termiczna częstotliwości rezonansowej wyniosła około 6GHz i była zbliżona do limitu teoretycznego. Była to w tamtym czasie najwyższa wartość przestrajalności termicznej zmierzona eksperymentalnie w ciekłokrystalicznych przetwornikach metamateriałowych w zakresie THz.

III. Przestrajalne nanostruktury metamateriałowe

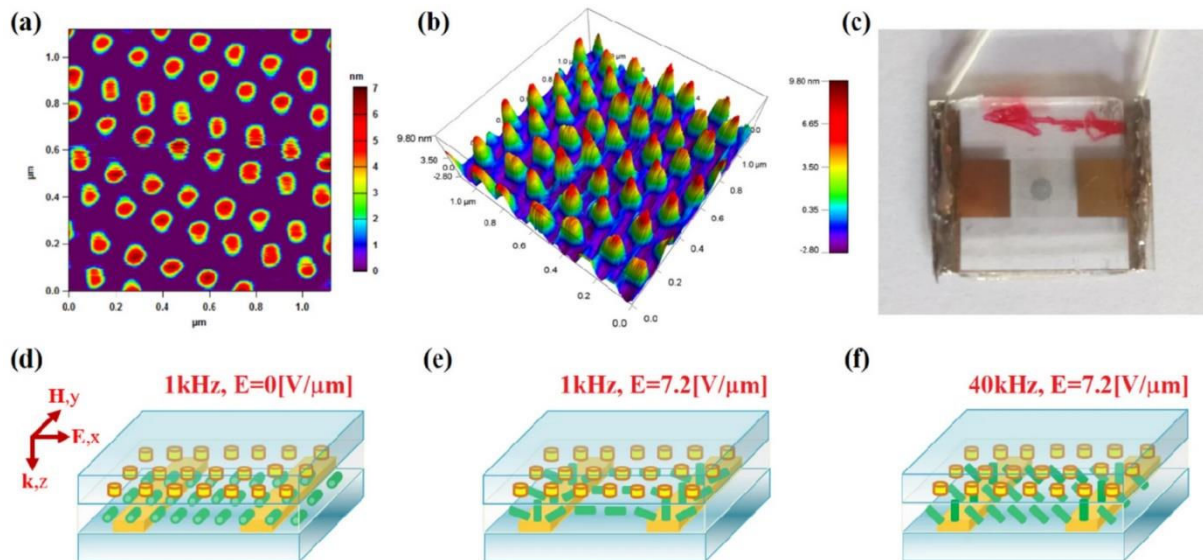
W tej części autoreferatu przedstawię rezultaty moich prac badawczych dotyczące przestrajalnych elektrycznie ciekłokrystalicznych przetworników hybrydowych z nanostrukturami metamateriałowymi. Pierwsza z omawianych prac dotyczyła zaprojektowania, symulacji elektromagnetycznych oraz optymalizacji przestrajalnego elektrycznie, dwupasmowego idealnego absorbera metamateriałowego na zakres bliskiej podczerwieni [H6]. W celu poszerzenia pasma absorpcji strukturę metamateriałowa zasymulowałem jako metal o wysokiej stratności, czy też niskiej przewodności. W tym celu wykorzystałem parametry materiałowe tytanu, który charakteryzuje się przewodnością elektryczną wynoszącą $\sigma = 2.38 \cdot 10^6 S/m$, jest to wartość znacznie niższa aniżeli przewodność żelaza i złota, które wynoszą odpowiednio: $\sigma = 1 \cdot 10^7 S/m$ oraz $\sigma = 4.1 \cdot 10^7 S/m$. W związku z tym, metapowierzchnia wykonana z tytanu, czyli metalu o wysokiej stratności (niskiej przewodności) cechuje się rezonansem o niskim współczynniku dobroci. W pracy [H6] udowodniłem to poprzez porównanie absorpcji absorbera w przypadku gdy metapowierzchnia była zasymulowana jako złoto, żelazo, bądź tytan. W przypadku tytanu absorpcja była zdecydowanie najwyższa i

osiągała wartość 99.4% oraz jej pasmo pokrywało najszerszy zakres spektralny. Grubość metamateriału wynosiła 25nm. Przetwornik metamateriałowy był zasymulowany jako komórka o symetrii lustrzanej. Taki rodzaj symetrii oznacza, że na jednym podłożu dielektrycznym znajdowała się metapowierzchnia, zaś drugie pokrywała ciągła warstwa metaliczna. W związku z tym transmisja przez taki przetwornik była równa 0, wobec czego absorpcję wyznaczyłem korzystając z prostej zależności: $A = 1 - R$. Podłoża dielektryczne były wykonane ze szkła kwarcowego, które w analizie numerycznej było bezstratnym dielektrykiem o współczynniku załamania wynoszącym $n = 2.12$. Prześtrajalną absorpcję osiągnąłem wykorzystując do budowy absorbera nematyczną mieszaninę ciekłokrystaliczną o wysokiej wartości dwójłomności $\Delta n = 0.47$. Materiał ciekłokrystaliczny został zamodelowany jako ośrodek anizotropowy o grubości $1\mu\text{m}$ i następujących przenikalnościach elektrycznych: $\varepsilon_{\parallel} = 4.25$, $\varepsilon_{\perp} = 2.53$. W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej wykazałem, że zmieniając orientację LC z homogenicznej na homeotropową możemy przestrajać amplitudę absorpcji o 26.3% oraz jej pasmo o 8THz. Poza tym, pokazałem wpływ parametrów geometrycznych metamateriału na pasmo absorpcji oraz dowiodłem że wysoka absorpcja wynika ze sprzęgania się dwóch rezonansów – szerokopasmowego rezonansu wzbudzanego w metamateriale wykonanym z wysokostratnego tytanu oraz rezonansu generowanego przez propagujące się plazmony pomiędzy metamateriałem a ciągłą warstwą metaliczną [H6].

Wszystkie dotychczas opisywane w autoreferacie przestrajalne przetworniki metamateriałowe bazowały na NLCs [H1-H6]. Jak wiemy, przełączanie NLCs polem elektrycznym wynika z istnienia tzw. momentu dielektrycznego proporcjonalnego do kwadratu natężenia pola elektrycznego E^2 , co czyni czas włączenia $\tau_{ON} \sim 1/E^2$. Z kolei relaksacja molekuł do stanu bez pola elektrycznego jest związana z istnieniem momentu sprężystego, przy czasie wyłączenia $\tau_{OFF} \sim d^2$, gdzie d jest grubością warstwy LC [12]. W związku z tym NLCs mają dwa niesymetryczne i znacznie różniące się czasy odpowiedzi. Jedynie czas włączenia τ_{ON} możemy skrócić poprzez zastosowanie odpowiednio dużego pola elektrycznego. Taki stan rzeczy wyklucza NLCs z zastosowań fonicznych, w których niezbędna jest bardziej dynamiczna modulacja fali elektromagnetycznej. Zaawansowane zastosowania optoelektroniczne na ogół wymagają szybszej i symetrycznej odpowiedzi elektrooptycznej, czym charakteryzują się m.in. dwuczęstotliwościowe LCs (ang. *Dual-Frequency Liquid Crystals* – DFLCs).

Mając na uwadze powyższe kryteria, w pracy [H7] zaprezentowałem zarówno wyniki symulacji elektromagnetycznych jak i charakteryzację eksperymentalną przetwornika

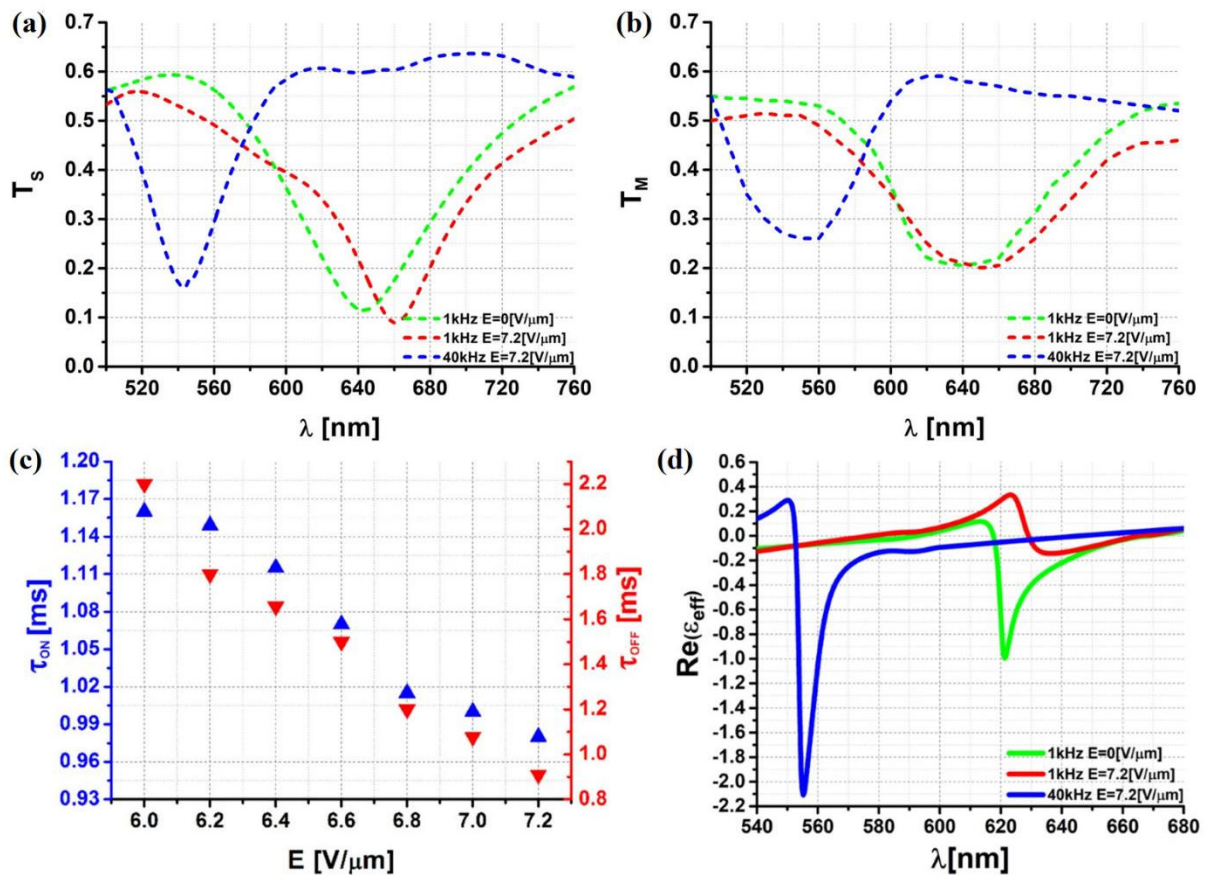
metamateriałowego zbudowanego z nanostruktury metamateriałowej w postaci nano-wysp osadzonej w komórce typu IPS (ang. *In-Plane Switching*) wypełnionej DFCL o grubości $d = 1.8\mu\text{m}$. Schemat metamateriału oraz zasadę działania przestrajalnego przetwornika wypełnionego DFCL zaprezentowałem na rys.3. [H7].



Rys. 3. Przestrajalny elektrycznie ciekłokrystaliczny przetwornik metamateriałowy na zakres widzialny [H7]. (a) Zdjęcie metamateriału wykonane z wykorzystaniem mikroskopu AFM. (b) Zdjęcie 3D wykonane z wykorzystaniem mikroskopu AFM przedstawiające topografię metamateriału. (c) Widok przestrajalnego elektrycznie przetwornika metamateriałowego. Schemat komórki IPS wraz z metamateriałem oraz orientacją molekuł DFCL w przypadku przyłożenia impulsu o częstotliwości: (d) 1kHz i natężenia pola elektrycznego $E = 0[V/\mu\text{m}]$, (e) 1kHz i natężenia pola elektrycznego $E = 7.2[V/\mu\text{m}]$, (f) 40kHz i natężenia pola elektrycznego $E = 7.2[V/\mu\text{m}]$.

Głównym celem omawianej pracy było skrócenie czasów odpowiedzi przestrajalnych przetworników metamateriałowych w zakresie widzialnym. Aby to osiągnąć najpierw opracowałem model numeryczny przetwornika metamateriałowego w symulatorze QuickWave 3D. W modelu teoretycznym DFCL 1909C została zdefiniowana jako ośrodek anizotropowy o następujących przenikalnościach elektrycznych - dla niskich częstotliwości ($f_L = 1\text{ kHz}$): $\epsilon_{\parallel} = 10.4$, $\epsilon_{\perp} = 7.4$, oraz dla wysokich częstotliwości ($f_H = 40\text{ kHz}$): $\epsilon_{\parallel} = 4.1$, $\epsilon_{\perp} = 7.1$. Poza tym - w celu ograniczenia stratności - grubość metapowierzchni o parametrach zdefiniowanych modelem Drude'a wynosiła zaledwie 7nm. Wymiar komórki elementarnej metapowierzchni wynosił 200nm, zaś średnica nanodysku – 100nm. Dzięki symulacjom elektromagnetycznym wyznaczyłem limit teoretyczny przestrajalności elektrycznej przetwornika. Na rys.4(a)

widzimy że przykładając dwuczęstotliwościowy (1kHz-40kHz) impuls elektryczny częstotliwość rezonansowa zmienia się o 120nm, zaś transmisja o 7.5%. Następnie przestrajalności zweryfikowałem eksperymentalnie i otrzymałem następujące wartości – przestrajalność częstotliwości rezonansowej wyniosła 100nm, zaś transmisji – 5.5% (rys.4(b)). Modulator metamateriałowy dzięki wykorzystaniu dwuczęstotliwościowego ciekłego kryształu pozwala szybko (w czasie poniżej 1 milisekundy) przestajać i kontrolować amplitudę i fazę przechodzącego promieniowania (rys.4(c)). Ponadto, może zachowywać się jak efektywny przewodnik lub izolator dla określonych długości fal i odpowiedniego napięcia elektrycznego (rys.4(d)) [H7]. Tego typu urządzenia oprócz zastosowań stricte fonicznych mogą w niedalekiej przyszłości znaleźć zastosowanie m.in. jako detektory sygnałów radarów szumowych oraz modulatory fal elektromagnetycznych do amunicji inteligentnej.



Rys. 4. Przestrajalne parametry oraz czasy odpowiedzi przetwornika metamateriałowego wykorzystującego DFLC [H7]. (a) Wyniki symulacji przedstawiające przestrajalność rezonansu materiałowego. (b) Wyniki pomiarów przedstawiające przestrajalność rezonansu metamateriałowego. (c) Czasy włączenia i wyłączenia w funkcji natężenia pola elektrycznego. (d) Przestrajalność efektywnej przenikalności elektrycznej przetwornika metamateriałowego.

Rozwój i ewolucja aktywnych i hybrydowych metamateriałów bazujących na materii miękkiej stała się również inspiracją artykułu przeglądowego poświęconego tej tematyce [H8]. Wspólnie z prof. Roberto Caputo z *University of Calabria* opracowaliśmy koncepcję manuskryptu. Do redakcji zaprosiliśmy również dr. Antonio Ferraro z *University of Calabria* oraz dr. Dimitriosa Zografopoulosa z *National Research Council of Italy*. Praca stanowi szeroki opis teorii leżącej u podstaw działania i funkcjonalności aktywnych i hybrydowych metamateriałów wykorzystujących materię miękką, omówienie dostępnych metod przestrajania oraz przegląd koncepcji i technik które są rozwijane w ostatnich latach w ośrodkach na całym świecie. Duża część pracy jest poświęcona również ograniczeniom fizycznym takich urządzeń oraz wyzwaniom i perspektywom rozwoju takich metamateriałów a także ich zastosowaniom fonicznym i optoelektronicznym [H8].

IV. Aktywne metamateriały hiperboliczne

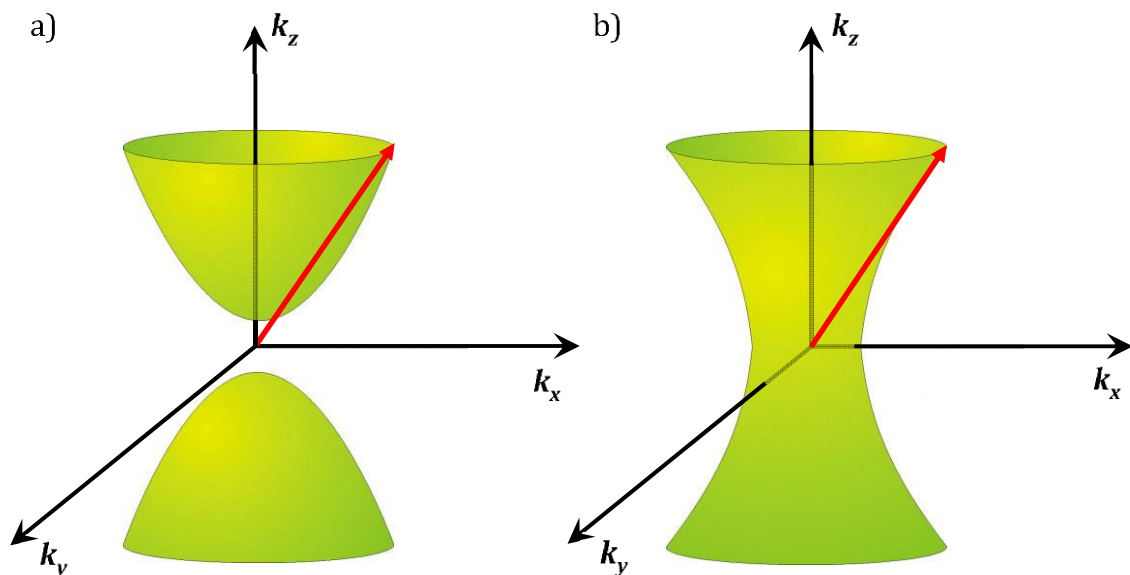
Ostatnia część mojej aktywności naukowo-badawczej związana jest z projektowaniem, symulacjami elektromagnetycznymi oraz analizą teoretyczną przestrajalnych metamateriałów hiperbolicznych w zakresie średniej podczerwieni [H9, H10]. Metamateriały hiperboliczne (ang. *hyperbolic metamaterials* – HMMs) stanowią specjalną klasę jednoosiowo anizotropowych metamateriałów kompozytowych. Dla tak zdefiniowanych ośrodków powierzchnia stałej częstotliwości stanowi elipsoidę opisaną poniższym równaniem:

$$\frac{k_x^2 + k_y^2}{\varepsilon_{zz}} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_{xx}} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2, \quad (1)$$

a także spełnione są relacje: $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{||}$ oraz $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\perp}$. Wyróżniamy Typ I HMM kiedy $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} > 0, \varepsilon_{zz} < 0$, a zatem $\varepsilon_{||} > 0$ i $\varepsilon_{\perp} < 0$ i powierzchnia stałej częstotliwości tworzy hiperboloidę dwupowłokową (rys.5(a)) oraz Typ II HMM, w którym dwa elementy tensora przenikalności elektrycznej przyjmują wartości ujemne: $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} < 0, \varepsilon_{zz} > 0$, zatem $\varepsilon_{||} < 0$ i $\varepsilon_{\perp} > 0$ i dla którego powierzchnia stałej częstotliwości stanowi hiperboloidę jednopowłokową (rys.5(b)) [13,14].

Opisane różnice odnoszące się do znaku poszczególnych składowych tensora przenikalności elektrycznej i determinujące dwa typy dyspersji hiperbolicznej, determinują odmienne względem siebie właściwości HMMs. Struktury HMMs Typu II posiadające dwie ujemne składowe tensora przenikalności elektrycznej cechują się bardziej lustrzanym charakterem, co oznacza że efektywnie odbijają propagujące się fale elektromagnetyczne. Innymi słowy, zakres

spektralny w którym występuje dyspersja hiperboliczna Typu II cechuje się niską transmisją i wysokim odbiciem. Oznacza to, że HMM typu II oddziałuje z falą elektromagnetyczną jak efektywny metal. Odmienne własności posiadają HMMs typu I, które mając tylko jedną ujemną składową tensora przenikalności elektrycznej oddziałują z padającym promieniowaniem jak efektywny dielektryk. Zasadniczo istnieją dwie metody wytwarzania HMMs. Pierwsza z nich opiera się na nałożeniu naprzemiennie ułożonych warstw metalu i dielektryka w postaci swoistego stosu [13,14]. W tym przypadku komórka elementarna jest zbudowana z pojedynczej warstwy metali i dielektryka. Oczywiście wymiar komórki elementarnej musi być kilkukrotnie mniejszy od długości fali z którą oddziałuje HMM. Druga metoda polega na osadzeniu metalicznych i periodycznie ułożonych prętów w matrycy dielektrycznej [15,16].



Rys. 5. Powierzchnie stałych częstotliwości dla metamateriałów hiperbolicznych: a) Typu I – hiperboloida dwupowłokowa, b) Typu II – hiperboloida jednopowłokowa.

Głównym celem moich badań dotyczących aktywnych metamateriałów hiperbolicznych było opracowanie modeli numerycznych oraz wykonanie symulacji elektromagnetycznych przestrajalnych metamateriałów hiperbolicznych w postaci wielowarstwowych stosów w zakresie średniej podczerwieni [H9, H10]. Wymiernym efektem prac było opracowanie dwóch koncepcji przestrajalnych i ultracienkich urządzeń fonicznych - modulatora odbicia, który może również pełnić rolę filtra krawędziowego bądź pasmowo-przepustowego oraz mikrownęki rezonansowej - bazujących na metamateriałach hiperbolicznych zbudowanych w oparciu o krzemionkę (SiO_2) oraz grafen. Przeprowadzone symulacje oraz analiza teoretyczna ww. koncepcji pozwoliła określić możliwości przestrajania odpowiedzi elektromagnetycznej

HMMs z wykorzystaniem dwóch głównych mechanizmów, tj. aktywnego dostrajania za pomocą bodźca zewnętrznego, którym w przypadku grafenu było napięcie elektryczne oraz poprzez odpowiednią strukturyzację geometrii i kontrolę zjawisk nielokalnych zachodzących w HMMs.

W pracy [H9] głównym celem było opracowanie ultracienkiego, przestrajalnego modulatora odbicia wykorzystującego metamateriał hiperboliczny. Zostało to osiągnięte poprzez wykonanie starannej strukturyzacji planarnych warstw grafenu w stosie zbudowanym w oparciu o $N=20$ komórek elementarnych. Na wstępie wykonaliśmy analizę wpływu grubości grafenu oraz jego - zależnego od napięcia - potencjału chemicznego na odbicie promieniowania w zakresie 2-8 μm . W tym celu wykonaliśmy symulacje trzech różnych stosów, zmieniając w każdym z nich całkowitą grubość grafenu zawartą między kolejnymi warstwami SiO_2 zamodelowanymi jako ośrodek dielektryczny o przenikalności elektrycznej $\epsilon_d = 2.1025$ o grubości $t_d = 100\text{nm}$. W rezultacie wykazaliśmy, że zmieniając grubość grafenu w zakresie od $t_g = 0.35\text{nm}$ (grubość pojedynczej monowarstwy) do $t_g = 2.1\text{nm}$ (grubość odpowiadająca sześciu monowarstwom), a tym samym zmieniając również periodyczność HMM, otrzymujemy charakterystykę idealnego modulatora odbicia. Poza tym, zmieniając potencjał chemiczny grafenu od $\mu_c = 0.2\text{eV}$ do $\mu_c = 0.8\text{eV}$, co odpowiada wzrostowi przykładanego napięcia od $U_g = 0.3\text{V}$ do $U_g = 5\text{V}$, uzyskaliśmy pasmo przestrojenia wynoszące 2.3 μm . Ponadto, dla wszystkich analizowanych konfiguracji wyznaczyliśmy odpowiednie składowe tensora przenikalności elektrycznej i w oparciu o nie określone zostały częstotliwości rezonansowe. Pozwoliło nam to dowieść, że otrzymane charakterystyki filtru krawędziowego związane są z przejściem pomiędzy dyspersją eliptyczną, a dyspersją hiperboliczną Typu II. Końcowym efektem prac było wykonanie symulacji pozwalających określić wpływ kąta padania fali na efektywność i przestrajalność modulatora odbicia.

Kolejnym obszarem moich badań związanych z HMMs było opracowanie koncepcji, symulacje elektromagnetyczne oraz analiza teoretyczna przestrajalnej mikrownęki rezonansowej oraz kontrola uzyskanego wzmocnienia poprzez regulowany napięciem potencjał chemiczny grafenu [H10]. Analogicznie jak w poprzednim przypadku zbudowaliśmy HMM z naprzemiennie ułożonych warstw przewodnika, którego rolę pełnił grafen oraz dielektryka w postaci krzemionki (SiO_2). W celu uzyskania pożądaných właściwości, czyli uzyskaniu modów rezonansowych o wysokim współczynniku dobroci oraz lokalnego wzmocnienia natężenia pola elektrycznego w obrębie mikrownęki, dokonaliśmy modulacji grubości warstw dielektrycznych. Modulację dielektryka została opisana półokresową funkcji fali trójkątnej, przy czym bazowa

grubość dielektryka wynosiła $t_d = t_0 = 200nm$. Tym samym grubości warstw dielektrycznych w kolejnych komórkach elementarnych możemy wyrazić poprzez równanie: $t_d(n) = t_0[1 + c_\Delta(n)]$, gdzie $n = (1 \dots N)$ jest numerem kolejnej komórki elementarnej, zaś $N=20$ jest liczbą wszystkich komórek elementarnych. Bazując na wcześniejszych doświadczeniach [H9] grubość grafenu w 1 komórce elementarnej była równa grubości 6 monowarstw $t_g = 2.1nm$. Krzemionka była dielektrykiem o przenikalności elektrycznej $\epsilon_d = 2.1025$. Zastosowanie grafenu w roli specyficznego przewodnika, pozwoliło nam uwięzić energię promieniowania (o zadanej długości fali) padającego na HMM w jego objętości (w mikrownęce). Energia promieniowania konwertowana jest tam na energię drgań ładunków elektrycznych w grafenie, co skutkuje powstaniem tzw. plazmonowych modów rezonansowych. Dzięki temu transmisja przestrajalnej mikrownęki wykazywała mod rezonansowy Fabry'ego-Perota ze współczynnikiem dobroci $Q > 20$ i sześciokrotnym lokalnym wzmocnieniem natężenia pola elektrycznego. Co istotne, wnęka rezonansowa może jednocześnie wzmacniać i modulować promieniowanie. Nasza analiza dowiodła że zmiana napięcia przykładanego do grafenu od 2 do 8 V co odpowiada zmianie potencjału chemicznego od $\mu c = 0.5$ to 1.0 eV, powoduje aktywną regulację transmisji zarówno pod względem intensywności (do 30%), jak i widma (do 2.1 μm). Zakres naszej analizy obejmował również obliczenie składowych tensora przenikalności elektrycznej oraz wyznaczenie zakresów występowania i przestrajalności dyspersji eliptycznej oraz hiperbolicznej typu II. HMM ma wysoką nieliniowość efektywnej przenikalności elektrycznej, która przekłada się na zwiększenie gęstości stanów fotonicznych. Zjawisko to może być bezpośrednio wykorzystane do wzmocnienia emisji spontanicznej źródeł jednofotonowych.

Zaproponowana metodyka schemat stanowi niezwykle wszechstronną platformę do manipulacji fal z zakresu średniej podczerwieni i – po dostosowaniu do możliwości produkcyjnych - może znaleźć zastosowanie w wielu wielofunkcyjnych urządzeniach optoelektronicznych, m.in. ultraczułych filtrach [17], bezabberacyjnych soczewkach [18], chipach fotonicznych [19], bądź też w takich zastosowaniach, gdzie wymagana jest duża szybkość działania, np. we współczesnych systemach telekomunikacyjnych, w tym istotnych dla potrzeb wojska. Co istotne, takie selektywne filtry eliminują z wiązki promieniowania fale o niechcianej długości, przepuszczając jednocześnie wszystkie pozostałe. Zastosowanie tego typu filtrów poprawi funkcjonalność m.in. kamer na podczerwień, dalmierzy optycznych, detektorów skażeń i innych urządzeń.

V. Podsumowanie

Za swoje najważniejsze osiągnięcia w przedstawionej serii publikacji dotyczącej przestrajalnych mikrostruktur metamateriałowych [H1-H5] uznają:

- Wykonanie modeli numerycznych, przeprowadzenie optymalizacji metapowierzchni poprzez wykonanie serii symulacji numerycznych oraz opracowanie technologii i wykonanie ciekłokrystalicznych przetworników z mikrostrukturami metamateriałowymi o przestrajalnych (elektrycznie i termicznie) parametrach w zakresie THz [H1,H2,H5].
- Opracowanie modelu hybrydowego przetwornika metamateriałowego o ujemnym i przestrajalnym współczynniku załamania [H3].
- Zaprojektowanie i badanie eksperymentalne przestrajalnego filtra na zakres THz w postaci przetwornika stanowiącego hybrydowe połączenie metapowierzchni z warstwą nematyka, pozwalającego efektywnie kontrolować zarówno amplitudę jako i fazę promieniowania THz [H4].
- Określenie wpływu dwójłomności nematycznych mieszanin ciekłokrystalicznych na zakres przestrojenia częstotliwości rezonansowej mikrostruktur metamateriałowych oraz obniżenie temperatury pracy przestrajalnych termicznie metamateriałów [H1-H5].

Za swoje najważniejsze osiągnięcia w przedstawionej serii publikacji dotyczącej przestrajalnych nanostruktur metamateriałowych [H6-H8] uznają:

- Opracowanie modelu numerycznego i przeprowadzenie symulacji elektromagnetycznych idealnego dwupasmowego ciekłokrystalicznego absorbera metamateriałowego o symetrii lustrzanej na zakres bliskiej podczerwieni dającego możliwość przestrajania zarówno amplitudy absorpcji (26.3%) jak i jej pasma (8 THz) [H6]
- Poszerzenie pasma absorpcji ww. absorbera poprzez zamodelowanie metastruktury wykonanej z tytanu, który ma niską przewodność, a tym samym daje możliwość otrzymania rezonansu metamateriałowego o niskim współczynniku dobroci [H6].
- Zoptymalizowanie przestrajalności absorbera poprzez zastosowanie ciekłego kryształu o wysokiej wartości dwójłomności oraz określenie wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych metapowierzchni na zakres i charakter absorpcji [H6].
- Opracowanie koncepcji, zasymulowanie oraz scharakteryzowanie przestrajalnego przetwornika metamateriałowego wykorzystującego DFLC. Dzięki wykorzystaniu DFLC było możliwe otrzymanie skróconych i symetrycznych czasów przestrojenia rezonansu metamateriałowego nieprzekraczających 1ms zarówno jeśli chodzi o amplitudę transmisji (5.5%) jak i długość fali (100nm) [H7].

- Wyznaczenie przestrajalności efektywnej przenikalności elektrycznej ww. przetwornika i udowodnienie, że w zależności od częstotliwości impulsu sterującego metamateriał może się zachowywać jak efektywny metal [$\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}}) < 0$] bądź dielektryk [$\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}}) > 0$] [H7].
- We współpracy międzynarodowej dokonałem przeglądu stosowanych metod przestrajania oraz aktualnie prowadzonych badań dotyczących aktywnych i hybrydowych metamateriałów bazujących na materii miękkiej [H8].

Za swoje najważniejsze osiągnięcia w przedstawionej serii publikacji dotyczącej przestrajalnych metamateriałów hiperbolicznych [H9-H10] uznaję:

- Opracowanie koncepcji, wykonanie modelu numerycznego, symulacje i analizę teoretyczną HMM w postaci stosu zbudowanego w oparciu o naprzemiennie ułożone warstwy krzemionki i grafenu oraz zoptymalizowanie jego budowy pod kątem zastosowania jako przestrajalny modulator odbicia, mogący równocześnie pełnić rolę filtru pasmowo-przepustowego lub krawędziowego w zakresie średniej podczerwieni [H9].
- Wykazanie że przejście od wysokiej transmisji do wysokiego odbicia w HMMs spowodowane jest zmianą dyspersji z eliptycznej na hiperboliczną typu II [H9, H10].
- Wykazanie, że niskonapięciowa zmiana potencjału chemicznego grafenu z 0.2eV do 0.8eV, powoduje przestrojenie pasma o 2.3 μm , zaś modyfikacja monowarstw grafenu w stosie HMM skutkuje przestrojeniem częstotliwości rezonansowej o 3.6 μm [H9].
- Opracowanie koncepcji, modelu numerycznego i przeprowadzenie symulacji elektromagnetycznych przestrajalnej hiperbolicznej mikrownęki rezonansowej bazującej na modulacji grubości dielektryka w stosie HMM, w którym rolę przewodnika pełni grafen [H10].
- Wykazanie, że modulacja dielektryka, a tym samym złamanie periodyczności HMM skutkuje pojawieniem się modu rezonansowego typu Fabry-Perot o współczynniku dobroci $Q > 20$ i sześciokrotnym lokalnym wzmocnieniem natężenia pola elektrycznego [H10].

Efektom moich prac są nowe jakościowo i funkcjonalnie przestrajalne metamateriały hybrydowe oraz technologia ich wykonania. Opracowane przeze mnie przestrajalne metamateriały hybrydowe otwierają możliwości projektowania mikroukładów aktywnych z możliwością przełączania i modulacji fal elektromagnetycznych i dzięki temu mogą stanowić platformę do budowy wielofunkcyjnych urządzeń fonicznych, m.in. sensory biochemiczne, absorbery, filtry, przełączniki nieliniowe, których właściwości można aktywnie modulować, a co za tym idzie, nie da się ich uzyskać w oparciu o dotychczas stosowane technologie.

VI. Literatura

- [1] N. Engheta, & R. W. Ziolkowski, „*Metamaterials: physics and engineering explorations*”, John Wiley & Sons (2006).
- [2] P. Tonkaev, I. S. Sinev, M. V. Rybin, S. V. Makarov, & Y. Kivshar, „*Multifunctional and transformative metaphotonics with emerging materials*”, *Chemical Reviews*, 122(19), 15414-15449 (2022).
- [3] L. Kang, R. P. Jenkins, D. H. Werner, „*Recent Progress in Active Optical Metasurfaces*”, *Advanced Optical Materials* 7, 1801813 (2019).
- [4] H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor & R. D. Averitt, „*Active terahertz metamaterial devices*”, *Nature*, 444(7119), 597-600 (2006).
- [5] J. Zhou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, „*Magnetic and electric excitations in split ring resonators*”, *Opt. Express* 15, 17881-17890 (2007).
- [6] N. Feth, M. König, M. Husnik, K. Stannigel, J. Niegemann, K. Busch, M. Wegener, and S. Linden, „*Electromagnetic interaction of split-ring resonators: The role of separation and relative orientation*”, *Opt. Express* 18, 6545-6554 (2010).
- [7] http://people.ee.duke.edu/~drsmith/metamaterials/metamaterial_elements.htm.
- [8] R. Dąbrowski, P. Kula, J. Herman, "High birefringence liquid crystals", *Crystals* 3(3), 443-482, (2013).
- [9] R. Kowerdziej, J. Parka, J. Krupka, M. Olifierczuk, E. Nowinowski-Kruszelnicki, L. Jaroszewicz, O. Chojnowska, „*Dielectric properties of highly anisotropic nematic liquid crystals for tunable microwave components*”, *Appl. Phys. Lett.* 103, 172902 (2013).
- [10] X. Chen, T. M. Grzegorzczak, B. I. Wu, J. Pacheco Jr & J. A. Kong, „*Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials*”, *Physical review E*, 70(1), 016608 (2004).
- [11] R. Kowerdziej, K. Garbat, M. Walczakowski, „*Nematic liquid crystal mixtures dedicated to thermally tunable terahertz devices*”, *Liq. Cryst.*, 45(7), 1040-1046, (2018).
- [12] D. K. Yang & S. T. Wu, “*Fundamentals of liquid crystal devices*”, John Wiley & Sons (2014).
- [13] Z. Guo, H. Jiang, H. Chen, "Hyperbolic metamaterials: From dispersion manipulation to applications", *Journal of Applied Physics* 127(7), 071101 (2020).
- [14] P. Shekhar, J. Atkinson & Z. Jacob, „*Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications*”, *Nano convergence*, 1, 1-17 (2014).

- [15] B. Wells, Z. A. Kudyshev, N. Litchinitser & W. A. Podolskiy, „*Nonlocal effects in transition hyperbolic metamaterials*”, ACS Photonics, 4(10), 2470-2478 (2017).
- [16] M. S. Mirmoosa, S. Y. Kosulnikov & C. R. Simovski, „*Magnetic hyperbolic metamaterial of high-index nanowires*”, Physical Review B, 94(7), 075138 (2016).
- [17] K. V. Sreekanth, Y. Alapan, M. ElKabbash, E. Ilker, M. Hinczewski, U. A. Gurkan, A. De Luca, and G. Strangi, "Extreme sensitivity biosensing platform based on hyperbolic metamaterial," Nature Materials 15(6), 621–627 (2016).
- [18] J. Sun and N. M. Litchinitser, "Toward Practical, Subwavelength, Visible-Light Photolithography with Hyperlens", ACS Nano 12(1), 542–548 (2018).
- [19] E. Shkondin, T. Repän, M. E. Aryaee Panah, A. V. Lavrinenko, and O. Takayama, "High Aspect Ratio Plasmonic Nanotrench Structures with Large Active Surface Area for Label-Free Mid-Infrared Molecular Absorption Sensing", ACS Appl. Nano Mater. 1(3), 1212–1218 (2018).

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

Moja aktywność naukowa w innych niż macierzysta uczelniach i instytucjach naukowych jest wielopłaszczyznowa i dotyczy zarówno odbytych staży naukowych w jednostkach zagranicznych, wspólnych badań i publikacji wyników oraz kierowania przeze mnie międzynarodowym projektem bilateralnym Canaletto pt. „*Active metamaterials based on new generation liquid crystals*” (pkt II.5.G5[#]) dotyczącym wymiany naukowej z zespołem naukowym z *University of Calabria*. W tej grupie odbyłem również 2-miesięczny staż naukowy (pkt II.7.S3[#]) związany z realizacją ww. projektu, co jest szczególnie istotne jeżeli chodzi o osiągnięcie naukowe związane z tematem wniosku habilitacyjnego. W rezultacie wspólnych prac badawczych zostały opublikowane poniższe artykuły naukowe (pkt I.1.H8[#]), (pkt II.2.A16[#]) oraz (pkt II.2.A17[#]):

- R. Kowerdziej, A. Ferraro, D. C. Zografopoulos, R. Caputo, „*Soft-Matter-Based Hybrid and Active Metamaterials*”, Advanced Optical Materials 10, 2200750 (2022).
- A. Pianelli, V. Caligiuri, M. Dudek, R. Kowerdziej, U. Chodorow, K. Sielezin, A. de Luca, R. Caputo, J. Parka, „*Active control of dielectric singularities in indium-tin-oxides hyperbolic metamaterials*”, Sci Rep 12, 16961 (2022).

- G. E. Lio, A. Ferraro, R. Kowerdziej, A. O. Govorov, Z. Wang, R. Caputo, „*Engineering Fano-Resonant Hybrid Metastructures with Ultra-High Sensing Performances*”, *Advanced Optical Materials* 2203123 (2023).

Ponadto, zostałem zaproszony przez prof. Roberto Caputo oraz dr. Giuseppe Emanuele Lio z *University of Florence* do udziału w międzynarodowym projekcie zredagowania książki nt. metamateriałów:

- R. Caputo and G. E. Lio, eds. „*Hybrid Flatland Metastructures*”, AIP Publishing, (2021),

w której byłem autorem poniższego rozdziału (**pkt II.1.R1[#]**):

- R. Kowerdziej, "*Hybrid Metastructures Enabled by Dual-Frequency Liquid Crystals*", *Hybrid Flatland Metastructures*. Melville, New York: AIP Publishing LLC, 9-1 (2021).

Dodatkowo, od przeszło 10 lat współpracuję z prof. Jerzym Wróblem z Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Wymiernym efektem współpracy był udział prof. Jerzego Wróbla w kierowanych przeze mnie grantach badawczych Preludium, Sonata oraz Iuventus Plus. Obecnie zaś będziemy współpracować przy projekcie Sonata Bis, którego również jestem kierownikiem. Wymiernym efektem współpracy są poniższe publikacje naukowe (**pkt I.1.H1[#]**) oraz (**pkt I.1.H7[#]**):

- R. Kowerdziej, M. Olifierczuk, J. Parka, J. Wróbel, „*Terahertz characterization of tunable metamaterial based on electrically controlled nematic liquid crystal*”, *Appl. Phys. Lett.* 105, 022908, (2014).
- R. Kowerdziej, J. Wróbel, P. Kula, „*Ultrafast electrical switching of nanostructured metadvice with dual-frequency liquid crystal*”, *Sci Rep* 9, 20367 (2019).

Szczegółowe informacje dotyczące ww. staży naukowych, publikacji oraz zrealizowanych we współpracy międzynarodowej projektów badawczych znajdują się w załączniku nr 3.

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

Moja dotychczasowa działalność dydaktyczna poświęcona była przede wszystkim prowadzeniu ćwiczeń rachunkowych i laboratoryjnych (dla studentów studiów stacjonarnych i

niestacjonarnych) z fizyki ogólnej. Prowadzę również zajęcia laboratoryjne z materiałów funkcjonalnych, na potrzeby których stworzyłem stanowisko laboratoryjne i opracowałem instrukcję do ćwiczenia dotyczącego charakteryzacji topografii powierzchni materiałów z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych AFM (ang. *Atomic Force Microscopy*). W ramach działalności dydaktycznej każdym roku akademickim wykonuje średnio 120% pensum dydaktycznego wynoszącego 190 godzin. Aktualnie jestem również promotorem pomocniczym dwóch doktorantów Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT.

W ramach działalności organizacyjnej byłem członkiem komitetów organizacyjnych kilku międzynarodowych konferencji (**pkt II.4.C1-C6[#]**) dotyczących tematyki związanej z badaniami ciekłych kryształów. Zostałem za nie dwukrotnie wyróżniony zespołową nagrodą Rektora-Komendanta WAT.

Misja popularyzowania badań naukowych prowadzonych na Wydziale Nowych Technologii i Chemii WAT, przejawiała się również w przygotowaniu stanowiska oraz czynnym udziale w 23. Pikniku Naukowym Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik w 2019 roku, wraz z Kołem Naukowym Fizyków WAT. Ponadto, byłem współautorem *"Oferty edukacyjnej Wydziału Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej"* dla szkół gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych. W ramach tej aktywności przygotowałem wykład popularnonaukowy pt. *„Halo nano – nano świat widziany z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych (AFM)”* dedykowany uczniom ze szkół partnerskich WAT.

7. Informacja o otrzymanych nagrodach i stypendiach.

- Stypendium dla Najlepszych Doktorantów Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT w roku akademickim 2009/2010, 2010/2011 i 2011/2012.
- Mazowieckie Stypendium Doktoranckie - Projekt "Rozwój nauki - rozwojem regionu - stypendia i wsparcie towarzyszące dla mazowieckich doktorantów" w roku akademickim 2010/2011.
- Mazowieckie Stypendium Doktoranckie - Projekt "Rozwój nauki - rozwojem regionu - stypendia i wsparcie towarzyszące dla mazowieckich doktorantów" w roku akademickim 2011/2012.
- 1. nagroda w konkursie Polskiego Towarzystwa Ciekłokrystalicznego na najlepszą rozprawę doktorską w roku 2014.
- Laureat programu Wrota Podlasia – stypendia dla doktorantów województwa podlaskiego (2014).

- Stypendium START przyznawane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej w roku 2014.
- Stypendium START przyznawane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej w roku 2015.
- Zespołowa Nagroda Rektora WAT za organizację międzynarodowej konferencji 16th Topical Meeting on the Optics of Liquid Crystals – OLC'2015, 13-18.09.2015, Sopot (2015).
- Zespołowa Nagroda Rektora WAT za organizację międzynarodowej konferencji 15th European Conference on Liquid Crystals – ECLC'2019, 30.06. - 05.07.2019, Wrocław (2019).
- Laureat konkursu dla wybitnych młodych naukowców organizowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na lata 2020-2023.

Podpisane elektronicznie przez Rafał Kowerdziej

(Certyfikat kwalifikowany) w dniu 2023-08-18.

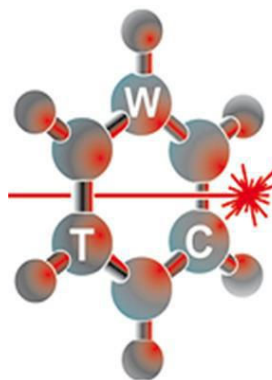
WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH

Dr inż. Rafał Kowerdziej

Załącznik nr 3

Wykaz osiągnięć naukowych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

Kopie dokumentów potwierdzających najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze oraz dydaktyczne załączono w wersji elektronicznej, a wybrane również w wersji papierowej, dokumentacji do wniosku w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego i ponumerowano zgodnie z numeracją punktów w poszczególnych załącznikach wniosku



Wydział Nowych Technologii i Chemii
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
Warszawa 2023

Spis treści

I. WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY.....	4
1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy ...	4
II. WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ	5
1. Wykaz opublikowanych rozdziałów w monografiach naukowych.....	5
2. Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych (bez pozycji wymienionych w pkt. I.1).....	5
Artykuły z listy JCR przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	5
Artykuły spoza listy JCR przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	6
Artykuły z listy JCR po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	6
3. Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.....	7
Prezentacje ustne przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora.....	7
Prezentacje plakatowe przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	8
Prezentacje ustne po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	9
Prezentacje plakatowe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	10
4. Wykaz udziału w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji.	11
5. Wykaz uczestnictwa w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.	11
Projekty będące w toku realizacji	11
Projekty zrealizowane	12
6. Wykaz członkostwa w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.....	12
7. Wykaz staży w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.	12
8. Wykaz członkostwa w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism wraz z informacją o pełnionych funkcjach.	13
9. Wykaz recenzowanych prac naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.....	13
10. Wykaz uczestnictwa w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny.....	14

III. WSPÓŁPRACA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM	14
1. Współpraca z sektorem gospodarczym.....	14
IV. DANE NAUKOMETRYCZNE.....	14
1. Impact Factor	14
2. Liczba cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.	14
3. Liczba cytowań dla publikacji z cyklu [H1-H10], z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.	14
4. Indeks Hirscha.....	15
5. Liczba punktów MNiSW.....	15

I. WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY

1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy

* - autor korespondencyjny

IF - współczynnik oddziaływania czasopisma z roku, w którym praca została opublikowana/5-letni; wg Journal Citation Reports (JCR) z dnia 30.06.2023.

TC - liczba cytowań (bez autocytowań) wg Web of Science/Scopus/Google Scholar z dnia 30.06.2023.

- H1. **R. Kowerdziej***, M. Olifierczuk, J. Parka, J. Wróbel, „*Terahertz characterization of tunable metamaterial based on electrically controlled nematic liquid crystal*”, Appl. Phys. Lett. 105, 022908, (2014).
IF2014/5-letni: 3.302/3.7 (MNiSW2015 = 40); TC: 55(51)/59(55)/65(60)
- H2. **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Experimental study on terahertz metamaterial embedded in nematic liquid crystal*”, Appl. Phys. Lett. 106, 092905, (2015).
IF2015/5-letni: 3.142/3.7 (MNiSW2015 = 40); TC: 33(28)/33(28)/37(30)
- H3. **R. Kowerdziej***, T. Stańczyk, J. Parka, „*Electromagnetic simulations of tunable terahertz metamaterial infiltrated with highly birefringent nematic liquid crystal*”, Liq. Cryst., 42(4), 430-434, (2015).
IF2015/5-letni: 2.244/2.301 (MNiSW2015 = 30); TC: 17(11)/17(11)/22(15)
- H4. **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, „*Active control of terahertz radiation using a metamaterial loaded with a nematic liquid crystal*”, Liq. Cryst., 43(8), 1120-1125, (2016).
IF2016/5-letni: 2.661/2.301 (MNiSW2016 = 25); TC: 11(7)/11(7)/12(8)
- H5. **R. Kowerdziej***, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Thermally induced tunability of a terahertz metamaterial by using a specially designed nematic liquid crystal mixture*”, Opt. Exp., 26(3), 2443-2452, (2018).
IF2018/5-letni: 3.561/3.8 (MNiSW2018 = 45); TC: 28(22)/29(23)/31(24)
- H6. **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, „*Tunable dual-band liquid crystal based near-infrared perfect metamaterial absorber with high-loss metal*”, Liq. Cryst., 46(10), 1568-1573, (2019).
IF2019/5-letni: 2.908/2.301 (MNiSW2019 = 70); TC: 23(21)/23(21)/24(21)
- H7. **R. Kowerdziej***, J. Wróbel, P. Kula, „*Ultrafast electrical switching of nanostructured metadvice with dual-frequency liquid crystal*”, Sci Rep 9, 20367 (2019).
IF2019/5-letni: 3.998/4.9 (MNiSW2019 = 140); TC: 29(27)/34(32)/42(39)

- H8. **R. Kowerdziej***, A. Ferraro*, D. C. Zografopoulos*, R. Caputo*, „*Soft-Matter-Based Hybrid and Active Metamaterials*”, Adv. Opt. Mat. 10, 2200750 (2022).
IF2022/5-letni: 10.050/9.5 (MNiSW2019 = 140); TC: 7(7)/9(9)/11(11)
- H9. A. Pianelli*, **R. Kowerdziej***, M. Dudek, K. Sielezin, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Graphene-based hyperbolic metamaterial as a switchable reflection modulator*”, Opt. Exp., 28(5), 6708-6718, (2020).
IF2020/5-letni: 3.669/3.8 (MNiSW2020 = 140); TC: 29(26)/31(28)/37(32)
- H10. M. Dudek, **R. Kowerdziej***, A. Pianelli, J. Parka, „*Graphene-based tunable hyperbolic microcavity*”, Sci Rep 11, 74 (2021).
IF2021/5-letni: 4.996/4.9 (MNiSW2020 = 140); TC: 15(13)/11(9)/17(13)

II. WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ

1. Wykaz opublikowanych rozdziałów w monografiach naukowych.

- R1. **R. Kowerdziej**, "Hybrid Metastructures Enabled by Dual-Frequency Liquid Crystals", *Hybrid Flatland Metastructures*. Melville, New York: AIP Publishing LLC, 9-1 (2021).

2. Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych (bez pozycji wymienionych w pkt. I.1).

* - autor korespondencyjny

IF - współczynnik oddziaływania czasopisma z roku, w którym praca została opublikowana/5-letni; wg Journal Citation Reports (JCR) z dnia 30.06.2023.

TC - liczba cytowań (bez autocytowań) wg Web of Science/Scopus/Google Scholar z dnia 30.06.2023.

Artykuły z listy JCR przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

- A1. M. Olifierczuk*, J. Zieliński, **R. Kowerdziej**, „*Optimization procedure for liquid crystal display working under high external lighting*”, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 507(1), 169-177, (2009).
IF2009/5-letni: 0.451/0.7 (MNiSW2009 = 10); TC: 0(0)/0(0)/0(0)
- A2. J. Parka*, **R. Kowerdziej**, M. Romaniuk, „*Photorefractive properties of new liquid crystals in the near-infrared range*”, Liq. Cryst., 38(1), 25-30, (2011).
IF2011/5-letni: 1.858/2.301 (MNiSW2011 = 25); TC: 5(5)/5(5)/7(7)
- A3. J. Parka, M. Dąbrowski, **R. Kowerdziej***, „*Investigations of twist elastic constant K₂₂ on new nematic liquid crystals materials using threshold IPS method*”, Opto-Electron. Rev. 19, 114-118, (2011).
IF2011/5-letni: 0.966/2 (MNiSW2011 = 27); TC: 7(7)/9(9)/11(11)
- A4. **R. Kowerdziej***, J. Parka, P. Nyga, B. Salski, „*Simulation of a tunable metamaterial with nematic liquid crystal layers*”, Liq. Cryst., 38(3), 377-379, (2011).

- IF2011/5-letni: 1.858/2.301 (MNiSW2011 = 25); TC: 11(9)/11(9)/16(14)
- A5. **R. Kowerdziej***, J. Parka, J. Krupka, „*Experimental study of thermally controlled metamaterial containing a liquid crystal layer at microwave frequencies*”, *Liq. Cryst.*, 38(6), 743-747, (2011).
IF2011/5-letni: 1.858/2.301 (MNiSW2011 = 25); TC: 10(8)/11(9)/13(11)
- A6. **R. Kowerdziej***, J. Parka, P. Nyga, „*Tunable liquid crystalline metamaterial structure in GHz range*”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 545(1), 91/[1315]-95/[1319], (2011).
IF2011/5-letni: 0.580/0.7 (MNiSW2011 = 13); TC: 8(5)/6(5)/10(8)
- A7. M. Olifierczuk, **R. Kowerdziej***, L. Jaroszewicz, M. Czerwiński, J. Parka, „*Numerical analysis of THz metamaterial with high birefringence liquid crystal*”, *Liq. Cryst.*, 39(6), 739–744, (2012).
IF2012/5-letni: 1.959/2.301 (MNiSW2012 = 25); TC: 16(11)/16(11)/16(11)
- A8. **R. Kowerdziej***, M. Olifierczuk, B. Salski, J. Parka, „*Tunable negative index metamaterial employing in-plane switching mode at terahertz frequencies*”, *Liq. Cryst.*, 39(7), 827-831, (2012).
IF2012/5-letni: 1.959/2.301 (MNiSW2012 = 25); TC: 14(11)/16(11)/19(16)
- A9. M. Czerwiński*, M. Tykarska, R. Dąbrowski, M. Żurowska, **R. Kowerdziej**, L. R. Jaroszewicz, „*The influence of structure and concentration of cyanoterminated and terphenyl dopants on helical pitch and helical twist sense in orthoconic antiferroelectric mixtures*”, *Liq. Cryst.*, 39(12), 1498–1502, (2012).
IF2012/5-letni: 1.959/2.301 (MNiSW2012 = 25); TC: 25(25)/25(25)/27(27)
- A10. **R. Kowerdziej***, J. Krupka, E. Nowinowski-Kruszelnicki, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Microwave complex permittivity of voltage-tunable nematic liquid crystals measured in high resistivity silicon transducers*”, *Appl. Phys. Lett.* 102, 102904 (2013).
IF2013/5-letni: 3.515/3.7 (MNiSW2013 = 40); TC: 18(13)/21(16)/26(19)
- A11. **R. Kowerdziej***, J. Parka, J. Krupka, M. Olifierczuk, E. Nowinowski-Kruszelnicki, L. Jaroszewicz, O. Chojnowska, „*Dielectric properties of highly anisotropic nematic liquid crystals for tunable microwave components*”, *Appl. Phys. Lett.* 103, 172902 (2013).
IF2013/5-letni: 3.515/3.7 (MNiSW2013 = 40); TC: 26(21)/27(22)/32(25)

Artykuły spoza listy JCR przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

- A12. **R. Kowerdziej***, J. Parka, M. Olifierczuk, L. Jaroszewicz, „*Simulation of tunable metamaterial with nematic liquid crystal layers*”, 2012 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012 1,6233502, 343-345, (2012).
TC: 1(1)/1(1)/0(0)

Artykuły z listy JCR po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

- A13. I.V. Kityk*, M. Chrunik, A. Majchrowski, M. C. Guidi, M. Angelucci, G. Kamel, A.O. Fedorchuk, M. Pępczyńska, L.R. Jaroszewicz, O. Parasyuk, I.M. Bolesta, **R Kowerdziej**, „*Second-order susceptibility spectra for δ -BiB₃O₆ polymer nanocomposites deposited*

- on the chalcogenide crystals*”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 146, 187–191, (2015).
IF2015/5-letni: 2.653/4.073 (MNiSW2015 = 30); TC: 1(1)/2 (2)/1(1)
- A14. **R. Kowerdziej***, K. Garbat, M. Walczakowski, „*Nematic liquid crystal mixtures dedicated to thermally tunable terahertz devices*”, *Liq. Cryst.*, 45(7), 1040-1046, (2018).
IF2018/5-letni: 3.078/2.301 (MNiSW2018 = 30); TC: 14(12)/14(12)/16(14)
- A15. K. Sielezin*, **R. Kowerdziej**, J. Parka, „*Simulations of some physical parameters of homologous series of nBT and nCHBT at 0.3-20 THz*”, *Liq. Cryst.*, 46(9), 1367-1372, (2019).
IF2019/5-letni: 2.908/2.301 (MNiSW2019 = 70); TC: 2(2)/2(2)/3(3)
- A16. A. Pianelli*, V. Caligiuri*, M. Dudek*, **R. Kowerdziej**, U. Chodorow, K. Sielezin, A. de Luca, R. Caputo, J. Parka, „*Active control of dielectric singularities in indium-tin-oxides hyperbolic metamaterials*”, *Sci Rep* 12, 16961 (2022).
IF2022/5-letni: 4.996/4.9 (MNiSW2019 = 140); TC: 1(1)/1(1)/2(2)
- A17. G. E. Lio, A. Ferraro, **R. Kowerdziej**, A. O. Govorov*, Z. Wang*, R. Caputo*, „*Engineering Fano-Resonant Hybrid Metastructures with Ultra-High Sensing Performances*”, *Advanced Optical Materials* 2203123 (2023).
IF2022/5-letni: 10.050/9.5 (MNiSW2019 = 140); TC: 1(1)/1(1)/2(2)

3. Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.

Osoba prezentująca została zaznaczona podkreśloną czcionką.

Prezentacje ustne przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

- P1. **R. Kowerdziej**, J. Parka, M. Olifierczuk, „*Influence of geometry, birefringence and thickness of liquid crystals layer on behaviour of multilayered U-shape metamaterial structures*”, Workshop on metamaterials and 4th Young Scientist Meeting on Metamaterials, YSMM'2011, 14-16.02.2011, Valencia, Hiszpania.
- P2. J. Parka, **R. Kowerdziej**, U. Chodorow, „*Application of Tunable Liquid Crystal Metamaterial structures in THz/GHz Frequency Range*”, XIX Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC'2011, 18-23.09.2011, Międzyzdroje, Polska.
- P3. J. Parka, **R. Kowerdziej**, U. Chodorow, „*High Birefringence and Low Losses Liquid Crystals – Applications for Tunable Devices in GHz and THz Range*”, 14th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, OLC'2011, 25.09 – 1.10.2011, Yerevan, Armenia.
- P4. **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, J. Parka, L. Jaroszewicz, „*Simulation of tunable metamaterial with nematic liquid crystals layers*”, 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON'2012, 21-23.05.2012, Warszawa, Polska.

- P5. J. Parka, **R. Kowerdziej**, J. Krupka, J. Piotrowski, „*High birefringence and low loss nematic liquid crystals for applications in GHz range*”, 7th International Conference on Microwave Materials and their Applications, MMA'2012, 3-6.06.2012, Taiwan.
- P6. **R. Kowerdziej**, „*Tunable metamaterials with liquid crystals layers at GHz frequencies*”, 22nd International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves, ITSS'2012, 7-13.07.2012, Trest, Czechy.
- P7. J. Parka, **R. Kowerdziej**, U. Chodorow, „Przestrzajalne struktury metamateriałowe, ich właściwości i zastosowania”, XI Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa, ELTE'2013, 16-20.04.2013, Ryn, Polska.
- P8. **R. Kowerdziej**, M. Olifierzuk, J. Parka, U. Chodorow, „*Nematic liquid crystal based metamaterial transducers for applications at GHz and THz frequencies*”, XX Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC'2013, 15-20.09.2013, Mikołajki, Polska.

Prezentacje plakatowe przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

- P9. M. Olifierzuk, J. Zieliński and **R. Kowerdziej**, „*Optimization procedure for liquid crystal display working under high external lighting*”, 22nd International Liquid Crystal Conference, ILCC'2008, 29.06-4.07.2008, Jeju, Korea.
- P10. J. Parka, **R. Kowerdziej**, M. Dabrowski, „*Investigations of twist elastic constant K22 of new nematic liquid crystal materials using treshold IPS method*”, 18th Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC'2009, 14-18.09.2009, Augustów, Polska.
- P11. **R. Kowerdziej**, J. Parka, P. Nyga, „*Tunable liquid crystalline metamaterial structure in GHz range*”, 23rd International Liquid Crystal Conference, ILCC'2010, 11-16.07.2010, Kraków, Polska.
- P12. **R. Kowerdziej**, J. Parka, J. Krupka, „*Measurements of tunable effective permittivity of liquid crystalline metamaterial at microwave frequencies*”, 6th International Conference on Microwave Materials and their Applications, MMA'2010, 1-3.09.2010, Warszawa, Polska.
- P13. **R. Kowerdziej**, J. Parka, P. Nyga, B. Salski, „*Designing tunable left handed metamaterials with nematic liquid crystal layers*”, Metamaterials'2010, 13-16.09.2010, Karlsruhe, Niemcy.
- P14. **R. Kowerdziej**, J. Parka, J. Krupka, „*Characterization of liquid crystal metamaterial structures by dielectric technique at microwave frequencies*”, 11th European Conference on Liquid Crystals, ECLC'2011, 6-11.02.2011, Maribor, Słowenia.
- P15. **R. Kowerdziej**, M. Olifierzuk, J. Parka, „*Numerical analysis of tunable metamaterial in THz frequency range*”, Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC'2011, 18-23.09.2011, Międzyzdroje, Polska.
- P16. M. Olifierzuk, **R. Kowerdziej**, J. Parka, L. Jaroszewicz, „*Terahertz response of tunable metamaterial transducer with liquid crystal as an effective medium*”, Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC-2011, September 18-23.09.2011, Międzyzdroje, Polska.
- P17. **R. Kowerdziej**, J. Parka, M. Olifierzuk, J. Krupka, K. Czuprynski and L. Jaroszewicz, „*High birefringence nematic liquid crystals for tunable applications at GHz frequencies*”, 24th International Liquid Crystal Conference, ILCC'2012, 19-24.08.2012, Mainz, Niemcy.

- P18. **R. Kowerdziej**, J. Parka, J. Krupka, M. Olifierczuk, K. Garbat, „*Characterization of nematic liquid crystals by spilt post dielectric resonator at GHz frequencies*”, 13th International Symposium on Colloidal and Molecular Electrooptics, 2-5.09.2012, Ghent, Belgia.
- P19. **R. Kowerdziej**, J. Parka, M. Olifierczuk, „*Tunable negative index metamaterial employing in-plane switching mode at THz frequencies*”, Metamaterials Congress 2012, 17-20.09.2012, Sankt Petersburg, Rosja.
- P20. M. Pępczyńska, **R. Kowerdziej**, „*Badania morfologii powierzchni kompozytów polimerowych z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych AFM*”, VII Seminarium - Badania prowadzone metodami skaningowej mikroskopii bliskich oddziaływań STM/AFM, 28.11 – 2.12.2012, Zakopane, Polska.

Prezentacje ustne po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

- P21. **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Terahertz meta materials embedded in nematic liquid crystals*”, 16th Topical Meeting on the Optics of Liquid Crystals, OLC'2015, 13-18.09.2015, Sopot, Polska.
- P22. **R. Kowerdziej**, J. Parka, K. Garbat, P. Morawiak, E. Czerwińska, M. Olifierczuk, „*Thermally controlled THz metamaterial based on nematic-to-isotropic phase transition*”, Metamaterials Congress, 17-22.09.2016, Chania, Grecja.
- P23. **R. Kowerdziej**, „*Ciełkokrystaliczne przetworniki ze strukturami metamateriałowymi o przestrajalnych parametrach*”, Seminarium w Centrum Mikroelektroniki i Nanotechnologii Uniwersytetu Rzeszowskiego, 18.11.2016, Rzeszów, Polska. **Wykład na zaproszenie.**
- P24. J. Parka, **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, „*Metamaterial Structures with Liquid Crystals – New Concept for Tunable Devices in THz and GHz Range*”, ECLC'2017, 14th European conference on liquid crystals, 26-30.06.2017, Moskwa, Rosja. **Wykład na zaproszenie.**
- P25. **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, J. Parka, „*Tunable graphene metamaterial based on liquid crystal at near infrared frequencies*”, INCP-2018 - 11th International Conference on Nanophotonics, 2-6.07.2018, Wrocław, Polska.
- P26. J. Parka, **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, K. Sielezin, P. Mardowski, „*Properties of metal-dielectric type hyperbolic metamaterials – simulations and experimental analysis*”, INCP-2018 - 11th International Conference on Nanophotonics, 2-6.07.2018, Wrocław, Polska.
- P27. **R. Kowerdziej**, „*Tunable Metamaterials Based on Liquid Crystals at THz Frequencies*”, invited talk, University of Calabria, 3-10.10.2018, Rende, Włochy. **Wykład na zaproszenie.**
- P28. **R. Kowerdziej**, J. Wróbel, P. Kula, „*Fast-response electro-plasmonics: tunable nanoscale metasurface hybridized with dual frequency liquid crystal*”, ECLC-2019, 15th European Conference on Liquid Crystals, 30.06-5.07.2019, Wrocław, Polska.
- P29. A. Pianelli, **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, K. Sielezin, M. Dudek, J. Parka, „*Blueshift in graphene-based hyperbolic metamaterials as a tunable narrowband reflection modulators*”, META'2019, 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 23-26.07.2019, Lizbona, Portugalia.
- P30. A. Pianelli, **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, K. Sielezin, M. Dudek, J. Parka, „*Type I and Type II dispersion in graphene hyperbolic metamaterials*”, 13th International Congress on

Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials 2019, 16-21.08.2019, Rzym, Włochy.

P31. A. Pianelli, M. Dudek, **R. Kowerdziej**, V. Caligiuri, K. Sielezin, J. Parka, „*Tunable hyperbolic metamaterials for wavefront shaping and fingerprint*”, 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics – META’2021, 20-23.07.2021, Warszawa, Polska.

P32. A. Pianelli, M. Dudek, U. Chodorow, P. Morawiak, **R. Kowerdziej**, J. Parka, „*2D-hybrid epsilon-near-zero metamaterials as a platform for nanophotonics*”, 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics – META’2021, 20-23.07.2021, Warszawa, Polska.

P33. A. Pianelli, V. Caligiuri, M. Dudek, **R. Kowerdziej**, K. Sielezin, J. Parka, „*Short-range interactions between solitons in hyperbolic metamaterials*”, 15th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials 2021, 2-7.08.2021, Nowy Jork, USA.

P34. K. Sielezin, M. Liszevska, B. Budner, M. Urbańczyk, **R. Kowerdziej**, J. Parka, „*Hyperbolic metamaterials for enhancement spontaneous emission engineering*”, 16th European Conference on Liquid Crystals, 10-14.07.2023, Rende, Włochy.

P35. **R. Kowerdziej**, I. Bisignano, M. Olifierzuk, R. Węglowski, A. Ferraro. G. E. Lio, N. Parlak, R. Caputo, „*Electrically-Controlled Fano-Resonant Dual-Band Plasmon Induced Transparency Liquid Crystal Terahertz Meta-Switch*”, 16th European Conference on Liquid Crystals, 10-14.07.2023, Rende, Włochy. **Wykład na zaproszenie.**

Prezentacje plakatowe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

P36. **R. Kowerdziej**, J. Krupka, M. Olifierzuk, E. Nowinowski – Kruszelnicki, J. Parka, O. Chojnowska, L. Jaroszewicz, „*Complex permittivity of highly birefringent nematic liquid crystals for tunable microwave components*”, 25th International Liquid Crystal Conference, ILCC’2014, 29.06-04.07.2014, Dublin, Irlandia.

P37. **R. Kowerdziej**, A. Wolszczak, R. Mazur, „*Wpływ technologii nanoszenia warstw SiO₂ na topografię powierzchni*”, VIII Seminarium - Badania prowadzone metodami skaningowej mikroskopii bliskich oddziaływań STM/AFM, 3–7.12.2014, Zakopane, Polska.

P38. **R. Kowerdziej**, M. Olifierzuk, „*High-Efficiency Thermal Tuning of a Terahertz Metamaterial with Liquid Crystal*”, 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials 2018, 27.08-1.09.2018, Espoo, Finlandia.

P39. **R. Kowerdziej**, „*Terahertz properties of nematic liquid crystal mixtures for applications in thermally switchable devices*”, XXII Conference on Liquid Crystals - Chemistry, Physics and Applications, CLC’2018, 17-21.09.2018, Jastrzębia Góra, Polska.

P40. K. Sielezin, A. Pianelli, M. Olifierzuk, **R. Kowerdziej**, J. Parka, „*Simulations of physical parameters of homologueous series of chosen nematic liquid crystals in THz range*”, XXII Conference on Liquid Crystals - Chemistry, Physics and Applications, CLC’2018, 17-21.09.2018, Jastrzębia Góra, Polska.

P41. K. Sielezin, A. Pianelli, M. Olifierczuk, **R. Kowerdziej**, J. Parka, “*Simulations of physical parameters of selected nematics at IR & THz range*”, ECLC-2019, 15th European Conference on Liquid Crystals, 30.06-5.07.2019, Wrocław, Polska.

P42. K. Sielezin, A. Pianelli, M. Dudek, **R. Kowerdziej**, M. Olifierczuk, J. Parka, “*Blue-shift in hyperbolic metamaterials structure based on Al/HfO₂*”, 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials 2019, 16-21.08.2019, Rzym, Włochy.

P43. M. Dudek, A. Pianelli, **R. Kowerdziej**, J. Parka, “*Absorption control in epsilon-near-zero hyperbolic metamaterials based on InAs*”, 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics – META’2021, 20-23.07.2021, Warszawa, Polska.

P44. K. Sielezin, A. Pianelli, M. Dudek, M. Olifierczuk, **R. Kowerdziej**, J. Parka, „*Local intensity enhancement and Purcell factor in hyperbolic metamaterials – spontaneous emission engineering*”, 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics – META’2021, 20-23.07.2021, Warszawa, Polska.

4. Wykaz udziału w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji.

C1. XVII Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC’2007, 17-22.09.2007, Augustów, Polska. **Współorganizator.**

C2. XVIII Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC’2009, 14-18.09.2009, Augustów, Polska. **Współorganizator.**

C3. XIX Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC’2011, 18-23.09.2011, Międzyzdroje, Polska. **Współorganizator.**

C4. XX Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), CLC’2013, 15-20.09.2013, Mikołajki, Polska. **Współorganizator.**

C5. OLC’2015 – 16th Topical Meeting on the Optics of Liquid Crystals, OLC’2015, 13-18.09.2015, Sopot, Polska. **Współorganizator.**

C6. ECLC-2019, 15th European Conference on Liquid Crystals, ECLC’2019, 30.06-5.07.2019, Wrocław, Polska. **Współorganizator.**

5. Wykaz uczestnictwa w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.

Projekty będące w toku realizacji

G1. 2023-2027 - UMO-2022/46/E/ST7/00454 - Prześtrajalne i ultraszybkie terahercowe metamateriały hybrydowe bazujące na efekcie plazmnicznej przezroczystości - Projekt SONATA BIS, Narodowe Centrum Nauki. **Kierownik projektu.**

Projekty zrealizowane

G2. 2013-2015 - UMO-2012/07/N/ST8/03284 - Nowe materiały typu metal – dielektryk na bazie kwarcu i metali szlachetnych na zakres THz - Projekt PRELUDIUM, Narodowe Centrum Nauki. **Kierownik projektu.**

G3. 2016-2018 - UMO-2015/17/D/ST8/02428 - Ciekłokrystaliczne przetworniki z nanostrukturami metamateriałowymi o przestrajalnych parametrach w zakresie bliskiej podczerwieni - Projekt SONATA, Narodowe Centrum Nauki. **Kierownik projektu.**

G4. 2016-2018 - IP2015 036574 - Przestrajalne właściwości przetworników metamateriałowych o krótkich czasach odpowiedzi w zakresie THz - Projekt IUVENTUS PLUS, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. **Kierownik projektu.**

G5. 2019-2021 – PPN/BIL/2018/2/00051/U/00001 - Aktywne metamateriały bazujące na nowej generacji materiałów ciekłokrystalicznych (LCMETA) – Projekt w ramach wymiany bilateralnej pomiędzy Rzeczpospolitą Polską a Republiką Włoch, Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej. **Kierownik projektu.**

G6. 2010-2012 - 0144/R/T00/2010/12 - Przestrajalne ciekłokrystaliczne przetworniki na zakres THz i GHz – Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. **Wykonawca.**

G7. 2010-2015 - POIG.01.03.01-014-16/08 - Nowe materiały fotoniczne i ich zaawansowane zastosowania - Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. **Wykonawca.**

G8. 2017-2021 - TECHMATSTRATEG1/347012/3/NCBR/2017 - Przestrajalne metamateriały hiperboliczne na potrzeby nowej generacji przyrządów fotonicznych (HYPERMAT) - Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. **Wykonawca.**

6. Wykaz członkostwa w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

- Członek Polskiego Towarzystwa Ciekłokrystalicznego.
- Członek Rady Bibliotecznej Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego (2-letnia kadencja).

7. Wykaz staży w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.

S1. Listopad 2009 – kurs "Fundamentals of Metamaterials Electromagnetics" - 5 dni - organizowany przez European Doctoral School on Metamaterials, GETA Graduate School i Helsinki University of Technology, Levi, Finlandia.

S2. Październik 2011 – kurs "Engineering applications of metamaterials (including microwaves, THz, optics, and acoustic) - 2 dni - organizowany przez European Doctoral School on Metamaterials, Metamorphose Virtual Institute, University of Valencia, Hiszpania.

S3. Lipiec 2012 – kurs „International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves” – 1 tydzień - Trest, Czechy.

S4. Maj 2014 - staż naukowy w University of Southampton w ramach współpracy między zespołami badawczymi – 2 tygodnie, Southampton, Anglia.

S5. Październik 2018 – staż naukowy w University of Calabria (Department of Physics – Unical) w ramach współpracy między zespołami badawczymi – 1 tydzień, Rende, Włochy.

S6. Październik – grudzień 2021 – staż naukowy w University of Calabria (Department of Physics – Unical) w ramach współpracy między zespołami badawczymi – 2 miesiące, Rende, Włochy.

8. Wykaz członkostwa w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

- Redaktor tematyczny (Topic Editor) czasopisma „Symmetry” (IF 2023=2.7) wydawanego przez MDPI.
- Członek Rady Recenzentów (Reviewer Board Member) czasopisma „Photonics” (IF 2023=2.4) wydawanego przez MDPI.

9. Wykaz recenzowanych prac naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.

Autor wniosku habilitacyjnego recenzował prace naukowe w następujących czasopismach z listy JCR:

- Nanomaterials (15 recenzji)
- Photonics (9 recenzji)
- Liquid Crystals (8 recenzji)
- Crystals (7 recenzji)
- Optics Express (6 recenzji)
- Materials (5 recenzji)
- Optics Letters (4 recenzje)
- Micromachines (4 recenzje)
- ACS Photonics (2 recenzje)
- IEEE Access (2 recenzje)
- Optical Materials Express (2 recenzje)
- JOSA A (2 recenzje)
- Applied Physics Letters (1 recenzja)
- Advanced Optical Materials (1 recenzja)
- Advanced Photonics Research (1 recenzja)
- RSC Advances (1 recenzja)
- Applied Sciences (1 recenzja)
- JOSA B (1 recenzja)

- International Journal of Molecular Sciences (1 recenzja)
- Frontiers in Physics (1 recenzja)

10. Wykaz uczestnictwa w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny.

- Recenzent wniosków w konkursie OPUS finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki.
- Członek komitetu naukowego przyznającego nagrody w ramach prezentacji ustnych i plakatowych na Konferencji Młodych Naukowców „Wiedza i Innowacje” wiWAT 2015, 01-03 grudzień 2015, WAT, Warszawa.

III. WSPÓŁPRACA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Współpraca z sektorem gospodarczym.

Moja współpraca z otoczeniem gospodarczym jest w głównej mierze związana z współwykonaniem w 2 grantach badawczych (wymienionych w pkt II.5. i oznaczonych jako G6 oraz G8) zrealizowanych w konsorcjum wspólnie z Przemysłowym Centrum Optyki S.A., które odpowiadało za wdrożenie wyników naukowych będących wynikiem realizacji zadań naukowych przewidzianych w harmonogramie obu grantów badawczych.

IV. DANE NAUKOMETRYCZNE

Dane naukowe na dzień 30.06.2023.

1. Impact Factor.

- Sumaryczny Impact Factor (IF) z roku opublikowania/5-letni: 84.694/88.884
- Sumaryczny Impact Factor (IF) z roku opublikowania/5-letni dla publikacji z cyklu [H1-H10]: 40.531/41.203

2. Liczba cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.

- Web of Science 406 (bez autocytowań - 347)
- Scopus 425 (bez autocytowań - 364)
- Google Scholar 499 (bez autocytowań - 424)

3. Liczba cytowań dla publikacji z cyklu [H1-H10], z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.

- Web of Science: 247 (bez autocytowań - 213)
- Scopus: 257 (bez autocytowań - 223)
- Google Scholar: 298 (bez autocytowań - 253)

4. Indeks Hirscha.

- Web of Science: 14 (bez autocytowań - 11)
- Scopus: 13 (bez autocytowań - 11)
- Google Scholar: 15 (bez autocytowań - 13)

5. Liczba punktów MNiSW.

- Dla publikacji przed rokiem 2019: 520.
- Dla publikacji od roku 2019: 980.

Podpisane elektronicznie przez Rafał Kowrdziej

(Certyfikat kwalifikowany) w dniu 2023-08-18.