

AUTOREFERAT

1. Dane personalne

Imię i nazwisko: **Arkadiusz Jan Antończak**
Data i miejsce urodzenia: 24 czerwca 1971 roku, Paczków województwo opolskie

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- Stopień naukowy: **Doktor Nauk Technicznych (nr dyplomu 4329)**
Dziedzina (wg CKSST): Telekomunikacja
Jednostka: Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wrocławska
Temat pracy: *Szybkie pętle fazowe w laserowej telekomunikacji koherentnej*
Data obrony: 18 grudnia 2002 roku (praca obroniona z wyróżnieniem)

Promotor: *Prof. dr hab. inż. Krzysztof Marek Abramski*
Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wrocławska

Recenzenci: *Prof. dr hab. inż. Hubert Trzaska*
Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wrocławska
Prof. dr hab. inż. Wiesław Leonard Woliński
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska
- Tytuł: **Magister inżynier (nr dyplomu 6506/96/Et)**
Kierunek: Elektronika i Telekomunikacja
Specjalność: Telekomunikacja rozsiewcza
Jednostka: Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska
Temat pracy: *Fotoniczny czujnik pola elektromagnetycznego*
Data obrony: 21 czerwca 1996 roku (praca obroniona z wyróżnieniem)

Promotor: *Prof. dr hab. inż. Hubert Trzaska*
Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wrocławska

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Krzysztof Marek Abramski*
Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wrocławska

Praca nagrodzona: I miejscem w konkursie SEP na najlepszą pracę dyplomową na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej w roku akademickim 1995/96 oraz III miejscem w Ogólnopolskim Konkursie im. Adama Smolińskiego na najlepszą pracę dyplomową w roku akademickim 1995/96 z dziedziny optoelektroniki – grudzień 1996 roku
- Tytuł: **Technik elektronik (nr świadectwa 30/TR/91)**
Specjalność: Radiotechnika i telewizja
Szkoła: Technikum elektroniczne
Zespół Szkół Radiotechnicznych im. W. Rotkiewicza w Dzierżoniowie,
Temat pracy: *Urządzenie elektroniczne do regeneracji i aktywizacji kineskopów*
Data obrony: 07 czerwca 1991 roku

Praca nagrodzona: I miejscem w Wojewódzkim Turnieju Młodych Mistrzów Techniki w grupie „C” – użyteczna praca dyplomowa – maj 1991 roku

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

3.1. Przebieg pracy zawodowej:

- Miejsce pracy: Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki (K-4),
Wydział Elektroniki (W-4), Politechnika Wroclawska
Stanowisko: **Adiunkt**
Okres zatrudnienia: od 1 czerwca 2013 roku do obecnie
- Miejsce pracy: Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki,
Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska
Stanowisko: **Adiunkt**
Okres zatrudnienia: od 1 marca 2003 do 31 maja 2013 roku
- Miejsce pracy: Instytut Telekomunikacji i Akustyki,
Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska
Stanowisko: **Asystent**
Okres zatrudnienia: od 1 października 1998 do 28 lutego 2003 roku

3.2. Doświadczenie zawodowe zdobyte za granicą:

Tab.3.1 Zestawienie wybranych wyjazdów zagranicznych oraz ich cel (A – udział aktywny, P – pasywny*)

Lp.	Miejsce	Okres	Cel pobytu
1	Linz	17-22.11.2000	Wizytacja laboratoriów nanotechnologicznych w ramach współpracy z Johannes Kepler University
2	Monachium	17-25.06.2001	CLEO [®] /Europe-EQEC 2001 – A + International Trade Fair LASER World of Photonics
3	Tokio	31.07-08.08.2001	AP-RASC conference – A
4	Monachium	22-28.06.2003	CLEO [®] /Europe-EQEC 2003 – A + International Trade Fair LASER World of PHOTONICS
5	Senlis-Paryż	10-19.10.2004	5 th International Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques – P
6	Barcelona	03-08.07.2005	7 th ICTON Conference – A
7	Monachium	12-19.06.2005	CLEO [®] /Europe-EQEC 2005 – A + International Trade Fair LASER World of Photonics
8	Nottingham	16-22.06.2006	8 th ICTON Conference – A
9	Piza	01-17.09.2006	2 nd EPS-QEOD Europhoton Conference – A
10	Monachium	17-21.06.2007	International Trade Fair LASER World of Photonics
11	Rzym	01-06.07.2007	8 th ICTON Conference – A
12	Edynburg	8-10.05.2008	Wizytacja laboratoriów mikroobróbki laserowej w ramach współpracy z Herriot-Watt University
13	Ateny	20-28.06.2008	10 th ICTON – A
14	Paryż	29.08-06.09.2008	3 rd EPS-QEOD Europhoton Conference – A
15	Drezno	04-07.11.2008	4 th International Workshop on Fiber Lasers – P
16	Oxford	28-29.04.2009	Szkolenie z zakresu budowy systemów do mikroobróbki laserowej w Oxford Lasers Ltd. Zwiedzanie działu R&D
17	Chemnitz	12-13.05.2009	Szkolenie z zakresu budowy systemów do mikroobróbki laserowej w 3D-Micromac AG. Zwiedzanie działu R&D
18	Monachium	13-18.06.2009	International Trade Fair LASER World of Photonics
19	Ponta Delgada	27.06-04.07.2009	11 th ICTON Conference – A
20	Drezno	29.09-01.10.2009	International Laser Symposium on Fiber & Disc Lasers – P
21	Ankona	20-27.06.2010	9 th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques – A
22	Hamburg	28.08-03.09.2010	4 th EPS-QEOD Europhoton Conference – A
23	Chemnitz	26-28.10.2010	3 rd International Symposium on Laser-Micromachining – P

24	Trondheim	01-10.04.2011	Prowadzenie badań wibrometrycznych silników okrętowych w instytucie MARINTEK (The Norwegian Marine Technology Research Institute)
25	Orlando	23.04-03.05.2011	Defence, Security, and Sensing Conference – A
26	Monachium	22-26.05.2011	International Trade Fair LASER World of Photonics
27	San Francisco	19.01-29.01.2012	Photonics West 2012-LASE Conference – A
28	Ankona	24.06-01.07.2012	10 th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques – A
29	Drezno	15-17.10.2012	International Laser Symposium on Fiber & Disc Lasers – P
30	San Francisco	30.01-09.02.2014	Laser-based Micro- and Nano-Processing Conference – A
31	Aveiro	25.05-02.06.2014	2 nd Int. Conference on Applications of Optics and Photonics – P

* - dotyczy konferencji

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

Moim osiągnięciem naukowym stanowiącym znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej Elektronika jest monotematyczny cykl publikacji pt.:

Laserowa modyfikacja materiałów

Cykl publikacji składa się z **14** prac naukowych, w tym **1** monografia oraz **13** artykułów w czasopiśmie z listy filadelfijskiej posiadających *Impact Factor*.

Z osiągnięciem naukowym związanych jest również **10** recenzowanych artykułów konferencyjnych serii *Proceeding of SPIE* zamieszczonych w bazie *Web of Science*, **1** patent RP oraz **4** zgłoszenia patentowe (w tym jedno międzynarodowe), które (mając na względzie wymogi art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku) wymieniono osobno w załączniku nr 4 – odpowiednio pozycje [C1–C10], [P18] oraz [ZP1–ZP4].

Monografia

- [M1] **A.J. Antończak**, *Wybrane zagadnienia z laserowej modyfikacji materiałów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014, 250 stron, ISBN 978-83-7493-864-8,

Udział własny: 100%

Praca jest obecnie przekładana na język angielski. Wydaniem monografii w języku angielskim zainteresowane jest między innymi akademickie wydawnictwo *Lambert Academic Publishing*.

Publikacje w czasopiśmie z listy filadelfijskiej znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports (JRC)*

- [A1] **A.J. Antończak**, Ł. Skowroński., M. Trzcinski, V.V. Kinzhybalo, Ł. Łazarek, K.M. Abramski, *Laser-induced oxidation of titanium substrate: Analysis of the physicochemical structure of the surface and sub-surface layers*, Applied Surface Science, 2014 – praca przyjęta do druku (10.11.2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.062>,

Udział własny: 55%, Punkty MNiSW (2013): **30**, IF (2013): **2,538**,

Byłem pomysłodawcą badań. Przeprowadziłem szczegółową analizę składu chemicznego (XPS, XRD) oraz topografii powierzchni próbek poddanych laserowemu utlenianiu w funkcji fluencji promieniowania. Przygotowałem około 90% manuskryptu (z pominięciem pkt. 2.3.2 oraz części opisu XRD).

- [A2] B. Stępak, **A.J. Antończak**, K. Szustakiewicz, P. Koziół, K.M. Abramski, *Degradation of poly(L-lactide) under KrF excimer laser treatment*, Polymer Degradation and Stability, 2014, Vol. 110, 156–164,
Udział własny: 45%, Punkty MNiSW (2013): **35**, IF (2013): **2,633**,
Byłem pomysłodawcą badań. Przeprowadziłem pełną analizę oraz interpretację poszczególnych wyników. Przygotowałem opis ponad połowy manuskryptu (w szczególności pkt 4. *Results and discussion* oraz 5. *Conclusions*).
- [A3] **A.J. Antończak**, B.D. Stępak, K. Szustakiewicz, M.R. Wójcik, K.M. Abramski, *Degradation of poly(L-lactide) under CO₂ laser treatment above the ablation threshold*, Polymer Degradation and Stability, 2014, Vol. 109, 97–105,
Udział własny: 70%, Punkty MNiSW (2013): **35**, IF (2013): **2,633**,
Byłem pomysłodawcą badań. Przeprowadziłem pełną analizę oraz interpretację poszczególnych wyników. Przygotowałem opis całości manuskryptu.
- [A4] Ł. Łazarek, **A.J. Antończak**, M. Wójcik, J. Drzymała, K.M. Abramski, *Evaluation of the laser-induced breakdown spectroscopy technique for determination of chemical composition of copper concentrates*, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2014, Vol. 97, 74–78,
Udział własny: 45%, Punkty MNiSW (2013): **35**, IF (2013): **3,150**,
Byłem pomysłodawcą badań, prezentowanej metody kalibracji LIBS oraz budowy układu detekcyjnego pozwalającego na znaczącą poprawę czułości spektrofotometru, co kolejno umożliwiło przeprowadzenie badań dla niskiej energii impulsu lasera ekscymerowego (<3mJ). Analizowałem oraz interpretowałem uzyskane wyniki. Współtworzyłem manuskrypt.
- [A5] Ł. Skowroński, **A.J. Antończak**, M. Trzcinski, Ł. Łazarek, T. Hiller, A. Bukaluk, A.A. Wronkowska, *Optical properties of laser induced oxynitride films on titanium*, Applied Surface Science, 2014, Vol. 304, 107–114,
Udział własny: 30%, Punkty MNiSW (2013): **30**, IF (2013): **2,538**,
Byłem pomysłodawcą przeprowadzonych badań. Zamodelowałem teoretycznie analizowane struktury. Wykonałem badania kolorymetryczne. Analizowałem oraz interpretowałem wyniki poszczególnych badań. Przygotowałem opis połowy manuskryptu (w szczególności pkt. 2. *Experimental*, 3. *Methods* dot. modelowania i analizy kolorymetrycznej oraz 4. *Results and discussion*).
- [A6] B. Stępak, **A.J. Antończak**, M. Bartkowiak-Jowska, J. Filipiak, C. Pezowicz, K.M. Abramski, *Fabrication of a polymer-based biodegradable stent using a CO₂ laser*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, Vol. 14, No. 2, 317–326,
Udział własny: 45%, Punkty MNiSW (2013): **20**, IF (2013): **1,331**,
Zdefiniowałem zakres przeprowadzonych badań. Opracowałem metodę wycinania stentów biodegradowalnych przy wykorzystaniu lasera CO₂. Analizowałem wyniki poszczególnych badań. Przygotowałem opis około 45% manuskryptu (głównie 2.3. *Parametric investigation of CO₂ laser cutting* oraz 4.4. *Conclusion*).
- [A7] **A.J. Antończak**, B. Stępak, P.E. Koziół, K.M. Abramski, *The influence of process parameters on the laser-induced colouring of titanium*, Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2014 (2013 – wersja elektroniczna), Vol. 115, No. 3, 1003–1013,
Udział własny: 85%, Punkty MNiSW: **30**, IF: **1,694**,
Byłem pomysłodawcą badań. Zaplanowałem doświadczenia zaprezentowane w pracy. Przeprowadziłem pełną analizę oraz interpretację uzyskanych wyników. Przygotowałem opis całości manuskryptu.

- [A8] P.E. Koziół, **A.J. Antończak**, P.E. Szymczyk, B. Stępak, K.M. Abramski, *Conductive aluminum line formation on aluminum nitride surface by infrared nanosecond laser*, Applied Surface Science, 2013, Vol. 287, pp. 165–171,

Udział własny: 45%, Punkty MNiSW: **30**, IF: **2,538**,

Byłem pomysłodawcą badań. Zaplanowałem doświadczenia zaprezentowane w publikacji. Analizowałem oraz interpretowałem wyniki poszczególnych badań. Przygotowałem opis połowy manuskryptu (w szczególności większość pkt 3. *Results and discussion* oraz 4. *Conclusions*).

- [A9] P.E. Koziół, P.A. Górski, **A.J. Antończak**, P. Kabacik, K.M. Abramski, *Spiral Resonator manufactured on AlN ceramics to filter the coupled wave between patch antennas*, Opto-Electronics Review, 2013, Vol. 21, No. 4, 395–401,

Udział własny: 35%, Punkty MNiSW: **20**, IF: **1,279**,

Byłem pomysłodawcą badań. Przeprowadziłem analizę wpływu parametrów procesowych na rezystancję oraz skład chemiczny warstw przewodzących indukowanych laserowo na powierzchni AlN. Analizowałem oraz interpretowałem wyniki poszczególnych badań. Przygotowałem opis 30% manuskryptu (głównie pkt 2. *Conductive layout manufacturing on the AlN ceramics with a laser beam*, 4. *Results and discussions* oraz 5. *Conclusions*).

- [A10] **A.J. Antończak**, M.R. Nowak, K. Szustakiewicz, J. Piękowski, K.M. Abramski, *The influence of organobentonite clay on CO₂ laser grooving of nylon 6 composites*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, Vol. 69, No. 5-8, 1389–1401,

Udział własny: 65%, Punkty MNiSW: **30**, IF (2012): **1,779**,

Byłem pomysłodawcą przeprowadzonych badań. Zamodelowałem teoretycznie proces cięcia poliamidu laserem CO₂ poprzez odparowywanie materiału. Przeprowadziłem pełną analizę oraz interpretację uzyskanych wyników. Przygotowałem opis całości manuskryptu.

- [A11] M.R. Nowak, **A.J. Antończak**, P.E. Koziół, K.M. Abramski, *Laser prototyping of printed circuit boards*, Opto-Electronics Review, 2013, Vol. 21, No.3, 45–50,

Udział własny: 60%, Punkty MNiSW: **20**, IF (2012): **1,279**,

Byłem pomysłodawcą badań. Zaplanowałem doświadczenia zaprezentowane w publikacji. Analizowałem wyniki poszczególnych badań. Przygotowałem opis połowy manuskryptu (w tym m.in. pkt. 5. *Implementation of the designed circuit board* oraz 6. *Conclusions*)

- [A12] **A.J. Antończak**, D Kocoń, M. Nowak, P. Koziół, K.M. Abramski, *Laser-induced colour marking-Sensitivity scaling for a stainless steel*, Applied Surface Science, 2013, Vol. 264, 229–236,

Udział własny: 75%, Punkty MNiSW: **30**, IF: **2,538**,

Byłem pomysłodawcą przeprowadzonych badań. Przeprowadziłem pełną analizę oraz interpretację uzyskanych wyników. Przygotowałem opis całości manuskryptu.

- [A13] M.R. Wójcik, **A.J. Antończak**, P.E. Koziół, Ł.K. Łazarek, B.D. Stępak, K.M. Abramski, *Direct laser writing of Fresnel microlenses with use of the scanning contour ablation method*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, – praca przyjęta do druku (18.12.2014), <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6750-2>,

Udział własny: 50%, Punkty MNiSW: **30**, IF: **1,279**

Byłem pomysłodawcą badań. Jestem współautorem prezentowanego algorytmu wytwarzania struktur 3D. Przygotowałem ponad połowę manuskryptu (w tym: 2. *Model and approximation*, 3 *Experimental setup* 4. *Results and discussion* oraz 5. *Conclusions*).

Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Pierwotnie dostrzegano potencjał oraz koncentrowano się głównie na obróbce laserowej w sensie nadawania materii określonej formy geometrycznej w skali mikro- lub nawet nanometrycznej. Dziś, z naukowego punktu widzenia, uwzględniając powszechność technik laserowych, bardziej interesującym aspektem jest poznawanie oraz wyjaśnianie nowych mechanizmów interakcji światła z materią narażaną na promieniowanie laserowe zarówno w środowisku obojętnym, jak i reaktywnym chemicznie. Proces ten wydaje się nie mieć końca, gdy uwzględnimy fakt ciągłego opracowywania zarówno nowych źródeł laserowych, jak i materiałów.

Choć promieniowanie laserowe utożsamiane jest z selektywnością odmienianą w sensie czasowym, spektralnym i przestrzennym, to jednak większość realnych procesów, które indukowane są pod jego wpływem charakteryzuje wysoka złożoność i różnorodność, wynikająca z możliwościi jednoczesnego występowania zarówno reakcji fotochemicznych, jak i fototermicznych, ograniczonej głębokości wnikania wiązki optycznej, wysokich gradientów temperatur, braku izotermiczności w obrębie podłoża oraz zmiennego, dominującego, w określonym miejscu i/lub czasie procesu, wpływu kinetyki bądź termodynamiki na przebiegające reakcje (z uwzględnieniem środowiska procesowego). Zmiany tym wywołane są skomplikowane i trudne w analizie.

Pomimo iż niełatwo rozdzielić powyższe procesy w literaturze zarysował się charakterystyczny podział. Część prac poświęcona jest głównie geometrycznej modyfikacji różnorodnych materiałów z ograniczoną, bądź całkowicie pominiętą analizą zmian, jakie wywołuje proces w ich strukturze fizykochemicznej, druga zaś dotycząca intencjonalnie jedynie modyfikacji materiałów przy wykorzystaniu promieniowania laserowego obejmuje zwykle przypadek oddziaływania na podłoże gęstościami energii znacząco poniżej progu ablacji.

Ponieważ większości procesów obróbki laserowej towarzyszą nieodzowne i nieodwracalne zmiany w strukturze fizykochemicznej materiału w strefie bezpośredniego oddziaływania promieniowania lub pośredniego wpływu temperatury, które kolejno w zależności od aplikacji mogą wpływać na trwałość rezultatu bądź też warunkować dalszą przydatność materiału pod kątem określonego zastosowania (szczególnie w aplikacjach biomedycznych), zaś w ogólnym rozumieniu stanowią swoiste sprzężenie zwrotne pozwalające na optymalizację procesu – zdaniem autora szczególnie interesującym i użytecznym przypadkiem jest analiza zmian, jakie wywołuje owo promieniowanie podczas realnych, ukierunkowanych na uzyskanie określonego celu (aplikacji), procesów obróbki materiałów. W tym przeświadczeniu prowadzone były przez autora badania, które poniżej krótko scharakteryzowano.

Wykorzystane w opisie oznaczenia literaturowe odnoszą się zarówno do cyklu publikacji stanowiących osiągnięcia naukowe ([M1, A1-A13]), jak również prac konferencyjnych z bazy *Web of Science* ([C1-C10, C36, C40, C50, C51]), patentu ([P18]) oraz zgłoszeń patentowych ([ZP1-ZP4]) wyszczególnionych w załączniku nr 4, które są bezpośrednio związane z przedstawionym osiągnięciem. Wybrane publikacje referencyjne innych autorów oznaczono symbolami [1-21].

Cel pracy:

Podstawowym celem przeprowadzonych badań była analiza zmian własności fizykochemicznych materiałów będących zamierzonym bądź ubocznym efektem oddziaływania promieniowania laserowego o długim czasie trwania impulsu z zakresu ultrafioletu oraz średniej podczerwieni o gęstościach energii bliskich bądź znacząco przewyższających próg ablacji materiału, jak również opracowywanie nowych technologii obróbki materiałów.

Prowadzone badania dotyczyły zarówno przypadków, w których koncentrowałem się głównie na modyfikacji formy geometrycznej materii, w tym:

- prototypowaniu mikrostruktur 3D (mikrosoczewek) na podstawie nowych algorytmów sterowania laserem ekscymerowym, umożliwiających wytwarzanie mikrostruktur w trybie bezpośredniego zapisu na materiale z automatycznym doбором wybranych parametrów procesu [M1], [A13], (Zał. 4: [C2]),
- prototypowaniu stentów naczyniowych z polimerów biodegradowalnych [A6], (Zał. 4: [C36, C40]),
- wytwarzaniu struktur mikrofluidycznych o wysokiej jakości powierzchni kanałów formowanych bezkontaktowo, przy zastosowaniu nowej oryginalnej metody replikacji form (powstałych w procesie mikroobróbki) polimerem o kontrolowanym stopniu sieciowania (również z uwzględnie-

niem rzeczywistych wzorców – np. sieci naczyń krwionośnych na podstawie zdjęć diagnostycznych [M1]. Prace zaprezentowane w monografii dotyczące tego wątku rozszerzono i wysłano (grudzień 2014) do opublikowania w czasopiśmie *Lab on a Chip* w artykule pod tytułem: *Rapid fabrication of micro-devices by controlling the PDMS curing conditions during replication of laser-prototyped mould*.

- modyfikacji własności fizycznych polimerów pozwalających kolejno na ich obróbkę poprzez odparowywanie przy wykorzystaniu laserów o długim czasie trwania impulsu (laser CO₂) z ograniczeniem niepożądanych deformacji materiału w strefie HAZ (*Heat-Affected Zone*) [A10],
- prototypowaniu obwodów drukowanych PCB [A11] i innych [M1],

jak również modyfikacji własności fizykochemicznych wybranych materiałów:

- poprzez kontrolowane utlenianie ich powierzchni (kolorowe laserowe znakowanie metali z powtarzalnością barw spełniającą wymagania branży poligraficznej) [A1, A5, A7, A12], (Zał. 4: [C9, ZP1]),
- dekompozycję naświetlanego podłoża (bezpośrednia laserowo-indukowana metalizacja ceramiki AlN, wykorzystana kolejno do wytwarzania struktur metamateriałowych) [A8, A9], (Zał. 4: [C6, C7, C10, P18]),
- oraz analizę zmian jakie są ubocznym efektem laserowego procesu obróbki materiału szczególnie tam, gdzie zmiany te mogą warunkować dalszą przydatność materiału pod kątem określonego zastosowania (np. w aplikacjach biomedycznych) [A2, A3, A6], (Zał. 4: [C1, C3, C8]).

Prowadzone badania obejmowały również przypadek wykorzystania promieniowania laserowego w spektroskopii do analizy składu pierwiastkowego materiałów o złożonej strukturze chemicznej z zastosowaniem nowej zaproponowanej metody kalibracji LIBS pozwalającej na przeprowadzanie analiz ilościowych [A4], (Zał. 4: [C5]).

Omówienie osiągniętych wyników:

W pracy [A1] przedstawiłem szczegółową analizę wieloczynnikowych zgorzelin wytwarzanych na powierzchni tytanu w procesie korozji wysokotemperaturowej wywołanej fotofizycznym oddziaływaniem promieniowania laserowego (laser Yb:szkło) w środowisku atmosferycznym. W celu uzyskania spójnego obrazu, jak zmienia się morfologia, skład chemiczny, grubość warstwy oraz jej wybrane własności optyczne w funkcji szerokiego zakresu fluencji promieniowania ograniczonej jedynie progiem ablacji przeprowadzono badania z zastosowaniem wielu technik analitycznych. Warstwy charakteryzowano między innymi przy wykorzystaniu kolorymetrii, elipsometrii EA, spektroskopii fotoelektronów wzbudzanych promieniowaniem rentgenowskim XPS w połączeniu z rozpylaniem powierzchni próbką działem jonowym Ar⁺ IBS, dyfraktometrii rentgenowskiej XRD, mikroskopii elektronowej SEM oraz profilometru optycznego. Badania elipsometryczne wskazały, iż charakterystyka zespolonego współczynnika załamania warstw demonstruje znaczące odstępstwa od charakterystyki dla czystego TiO₂ w paśmie 350÷550 nm. Obserwowana rozbieżność rośnie wraz z fluencją promieniowania lasera, a jej maksimum przesuwa się w kierunku pasma widzialnego. To sugeruje, iż zewnątrz optycznie czynna (przezroczysta) warstwa zgorzeleny składa się z tlenków tytanu (głównie TiO₂) domieszkowanych związkami azotu (w postaci TiO_xN_y), jak również ze zredukowanych niestechiometrycznych tlenków tytanu. Analizy XPS oraz XRD potwierdziły możliwość występowania związków azotu oraz czynników niestechiometrycznych (TiN_{0,26}, TiN_{0,22}O_{0,78}, TiO_{0,892}). Wskazano w ten sposób, iż optycznie czynna warstwa wierzchnia nie jest czystym TiO₂, jak dotychczas postulowano [1]. Rozpylając argonowym działem jonowym powierzchnię próbek określono ponadto, jak zmienia się koncentracja poszczególnych pierwiastków w funkcji przekroju warstwy. Pomiary te wskazały, iż skład chemiczny pokryć zmienia się w sposób płynny (gradientowy) nie zaś skokowy, jak dotychczas postulowano [1]. Analiza morfologii powierzchni wykazała, iż chropowatość wytwarzanych tą metodą warstw maleje wraz ze wzrostem fluencji (dla gęstości energii poniżej progu ablacji) dążąc do wartości charakteryzujących wykorzystane w eksperymencie substraty. Powłoki azotko-tlenkowe, których absorpcja jest rozszerzona o zakres pasma widzialnego, możliwe do wytworzenia w opisanym procesie laserowym, mogą być szczególnie atrakcyjne w zastosowaniach fotokatalitycznych bazujących na związkach tytanu (TiO₂).

W pracy [A2] scharakteryzowałem wpływ promieniowania laserowego (laser KrF) na wybrane własności fizykochemiczne poli(L-laktydu) PLLA. Z uwagi na znaczącą głębokość wnikania promieniowania lasera ekscymerowego KrF (248 nm) w PLLA (~233 μm), porównywalną z grubością

wykorzystanych do badań próbek, odnotowano, iż zmiany nim wywołane mają charakter objętościowy (brak bimodalnego rozkładu mas w badaniach różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC oraz chromatografii żelowej GPC). Wraz ze wzrostem fluencji akumulowanej obserwowano stopniową redukcję średniej masy cząsteczkowej polimeru M_n – z: 52 705 na 15 535 g/mol (w jednostkach PS). Wykazano, iż redukcja masy cząsteczkowej przy tej samej fluencji akumulowanej jest istotnie wyższa w przypadku gdy polimer naświetlany jest niższą fluencją pojedynczego impulsu. Silniejszą dekompozycję polimeru dla przypadku naświetlania poniżej progu ablacji wyjaśniono między innymi efektem inkubacji centrów absorpcyjnych (to zagadnienie szerzej przedstawiono w pracach [M1] i (Zał. 4: [C3]) oraz brakiem ablacji najsilniej modyfikowanej warstwy wierzchniej. Analogiczną tendencję zaobserwowano również w zmianach współczynnika polidispersji. W badaniach XPS nie odnotowano pików charakterystycznych dla grup hydroksylowych (–OH) ~286 eV lub karboksylowych (–COOH) ~290 eV. Brak fotoutleniania wyjaśniono faktem, iż proces degradacji w znacznej mierze inicjowany był poprzez temperaturę, zaś taka dekompozycja PLLA przebiega zasadniczo bez generacji wolnych rodników. Analiza ATR/FT-IR wykazała ponadto pojawienie się kilku niewielkich, lecz charakterystycznych pasm absorpcyjnych odpowiednio dla grup winylowych (RCH=CH₂), ketonów (RCOCH=CH₂) i/lub eterów winylowych (ROCH=CH₂), jak również wzrost charakterystycznego dla podwójnego wiązania C=C pasma drgań walencyjnych $\nu_{C=C}$ w okolicach długości fali 1640 cm⁻¹. Pojawienie się powyższych pasm świadczy, iż dekompozycja PLLA wywołana fotofizycznym oddziaływaniem lasera KrF mogła przebiegać zarówno na drodze reakcji Norrish'a typu II, jak i eliminacji *cis* (tożsame produkty dekompozycji), w wyniku których powstają podwójne wiązania węgla w grupach winylowych (–CH=CH₂). Dotychczas publikowane w literaturze badania dotyczące modyfikacji własności fizykochemicznych PLLA obejmowały jedynie analizę zmian struktury wiązań chemicznych XPS [3] oraz (w obu przypadkach) oddziaływania na polimer fluencją wielokrotnie mniejszą od progu ablacji [4]. Z punktu widzenia laserowego wytwarzania implantów medycznych, dużo istotniejsze jest określenie jak zmieniają się własności PLLA przy zastosowaniu fluencji powyżej progu ablacji niezbędnej do nadania mu określonej formy geometrycznej. Zaprezentowane w pracy [A2] badania to pierwsza tego typu analiza.

W pracy [A3] scharakteryzowałem kolejno wpływ promieniowania laserowego (laser CO₂) na wybrane własności fizykochemiczne PLLA. Zastosowane techniki analityczne pozwoliły zaobserwować spójny, wzajemnie uzupełniający się obraz zmian jakie zachodziły w materiale pod wpływem obróbki laserem CO₂. Zarówno DSC, jak i GPC wykazały obecność bimodalnego rozkładu mas polimeru, przy czym intensywność tworzenia się frakcji o niskiej masie cząsteczkowej ($\log M_w < 4,6$) była zależna od zastosowanej fluencji promieniowania. Ponieważ głębokość wnikania promieniowania lasera CO₂ w PLLA (73,5 μ m) była mniejsza od grubości zastosowanych próbek (250,0 μ m) przyjęto, iż obserwowane modyfikacje dotyczyły głównie jego powierzchni. Stopniowy wzrost fluencji powodował przesuwanie się granicy modyfikacji w głąb materiału. Kolejno wykorzystując XPS ustalono, iż oddziaływanie promieniowaniem lasera CO₂, pomimo znajdującego się w atmosferze procesu tlenu, nie powodowało utleniania się warstwy wierzchniej. Wartość O/C pozostawała na stałym poziomie. Podobnie jak w przypadku oddziaływania laserem KrF [A2] nie odnotowano pików charakterystycznych dla grup hydroksylowych lub karboksylowych (brak fotoutleniania). Nieznaczny spadek intensywności pików węgla w łańcuchu głównym (C–O–C=O) oraz węgla w grupie estrowej (O=C–O), wskazywał na przerywanie łańcucha w obrębie tej grupy oraz utratę cząstek gazowych (CO, CO₂), w wyniku termicznej dekompozycji polimerów. Spektroskopia średniej podczerwieni FTIR wykazała analogiczne, aczkolwiek dużo intensywniejsze zmiany w stosunku do przypadku oddziaływania laserem KrF [A2]. Zmiany widoczne w FTIR świadczą, iż dekompozycja PLLA wywołana termicznym oddziaływaniem lasera CO₂ przebiegała między innymi na drodze reakcji eliminacji *cis*. Pomimo, iż w literaturze zaprezentowano wiele prac opisujących wykorzystanie lasera CO₂ do obróbki czystego poli(L-laktydu), bazujących na nim kompozytów (PLLA/CHAp) lub jego kopolimerów (P(LLA/CL)) do wytwarzania skafoldów [5], implantów kostnych [6] lub stentów [7], jak dotychczas nie opublikowano informacji jak zmieniają się własności fizykochemiczne polimeru pod wpływem promieniowania lasera CO₂. Omówiona powyżej praca [A3] to pierwsze tego typu badania. Wyniki te są szczególnie istotne w zastosowaniach biomedycznych, gdzie własności fizykochemiczne polimeru wpływają bezpośrednio na bio- i hemozgodność, tempo degradacji hydrolytycznej oraz cytotoksyczność materiału.

W pracy [A4] skoncentrowano się na przeprowadzeniu badań dotyczących możliwości detekcji pierwiastków śladowych w koncentratkach miedzionośnych na różnych etapach wzbogacania surowca

przy wykorzystaniu spektroskopii LIBS indukowanej niskoenergetycznym laserem ekscymerowym KrF. Analizie poddano trzy pierwiastki śladowe: srebro (Ag), kobalt (Co) oraz wanad (V). Ponieważ spektroskopia LIBS jest metodą porównawczą, ilościowa ocena zawartości określonego pierwiastka wymaga wzorcowania spektroskopu. Zwykle w badaniach jakościowych do kalibracji używa się syntetycznych wzorców (pelletów) o znanym składzie chemicznym poszczególnych pierwiastków. Z uwagi, iż osnowę takiego pelletu stanowi inny materiał, w stosunku do matrycy badanej próbki wpływa to, poprzez szereg czynników (absorpcję, własności fizykochemiczne), na dokładność metody. Zaproponowana w pracy [A4] technika polega na wzorcowaniu spektroskopu pelletami wykonanymi wprost z badanych materiałów (lub materiałów o zbliżonej budowie fizykochemicznej) o znanym składzie chemicznym. Pozwala to na znaczną poprawę dokładności pomiaru.

W pracy [A5] skoncentrowano się na wyznaczeniu własności optycznych (stałych dielektrycznych) zgorzeli wytwarzanych na powierzchni tytanu w procesie korozji wysokotemperaturowej wywołanej fotofizycznym oddziaływaniem promieniowania laserowego (laser Yb:szkło) w środowisku atmosferycznym. Do badań, jako próbki, wytypowano sześć charakterystycznych, możliwych do uzyskania tą metodą, kolorów (zgorzeli o różnej grubości). Na podstawie pomiarów elipsometrycznych, wyznaczono charakterystyki współczynnika odbicia, stałe dielektryczne warstw i podłoża oraz efektywną grubość warstw d_{eff} odpowiadających poszczególnym kolorom. Przedstawiono ponadto parametry modelu Pola (A_0, E_0), Gaussa (A_1, E_1, B_{r1}) oraz Tauc-Lorentza (A_2, E_2, C, E_g) oscylatorów harmonicznych wykorzystanych do estymacji parametrów optycznych badanych zgorzeli. Wykazano, iż efektywna grubość zgorzeli jest niemal idealnie liniowo zależna (współczynnik determinacji $R^2 = 0,994$) od wartości fluencji akumulowanej F_A ze stałą: $d_{\text{eff}} [\text{nm}] \approx 2,9 + 0,1F_A [\text{J}/\text{cm}^2]$. Porównanie charakterystyk reflektancji uzyskanych na podstawie pomiarów elipsometrycznych oraz analizy kolorymetrycznej (wątek szczegółowo opisany w [M1]) pozwoliło wysnuć hipotezę, iż warstwy te złożone są z azotkotlenków tytanu i/lub zredukowanych niestechiometrycznych tlenków tytanu. Przypuszczenie te potwierdzono kolejno wynikami analiz XPS oraz XRD (metoda Rietvelda) przeprowadzonymi w ramach pracy [A1], jak również analizą chemometryczną bazującą na pomiarach XRD [B2]. W ramach omawianej pracy po raz pierwszy w literaturze zaprezentowano jak zmieniają się stałe dielektryczne zgorzeli wytwarzanych na powierzchni tytanu w procesie laserowym, jak również wykazano, iż ich grubość jest liniowo zależna od wartości fluencji akumulowanej.

Praca [A6] poświęcona została analizie wpływu parametrów procesowych na geometrię cięcia, szerokość strefy HAZ oraz zmianę własności mechanicznych PLLA oraz poli(L-laktydu-ko-glikolidu) PLGA podczas obróbki laserem CO₂ (w zakresie zmian własności mechanicznych badania przeprowadzono również dla lasera KrF). Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono optymalne parametry obróbki obu materiałów oraz na tej podstawie wykonano i zaprezentowano przykładową filigranową strukturę stentu naczyniowego o szerokości przęseł i rozpórek porównywalnej ze średnicą talii wiązki wykorzystanego lasera. Szczegóły dotyczące metodyki wycinania stentów oraz optymalizacji procesu zaprezentowano w pracy [M1]. Wykazano tym samym, iż laser CO₂ to efektywne narzędzie do obróbki poli-laktydów. Stwierdzono ponadto, iż w przypadku obu materiałów laserowa mikroobróbka istotnie wpłynęła na ich własności mechaniczne. Wykorzystując laser CO₂ odnotowano wzrost modułu Younga odpowiednio o 12% dla PLLA oraz 20% dla PLGA oraz znaczący spadek zarówno wytrzymałości na rozciąganie R_m (odpowiednio o: -34% dla PLLA i -30% dla PLGA), jaki i względnego wydłużenia w kierunku wzdłużnym ε (-30% dla PLLA oraz -38% dla PLGA). Stosując do cięcia laser ekscymerowy zauważono nieco odmienną tendencję. Moduł Younga zmalał o blisko 19% dla PLLA, bądź pozostawał na stałym poziomie (w zakresie odchylenia standardowego) dla PLGA. Oba materiały wykazały za to większy, niż w przypadku lasera CO₂ spadek wytrzymałości na rozciąganie $R_m \sim 41\%$. Względne wydłużenie w kierunku wzdłużnym ε zmalało odpowiednio -15% dla PLLA oraz -32% dla PLGA. Własności mechaniczne tworzyw termoplastycznych zależą od wielu czynników, w tym od struktury molekularnej. Wykazana w pracach [A2] oraz [A3] defragmentacja łańcuchów polimerowych, a tym samym spadek masy cząsteczkowej jest więc jednym z głównych czynników bezpośrednio odpowiedzialnych za obserwowane tu zmiany. Odpowiedni dobór siły radialnej z jaką stent oddziałuje na naczynie krwionośne, prócz funkcji konstrukcyjnych (utrzymanie funkcji nośnej implantu w pierwszych sześciu miesiącach od zabiegu) wpływa również pośrednio na reakcje zapalne oraz tworzenie się zakrzepów. W trakcie projektowania stentu istotnym jest więc uwzględnienie ewentualnych zmian własności mechanicznych materiału, które mogą być efektem ubocznym, zastosowanego do formowania polimeru, procesu obróbczego.

W pracach [A7] oraz [A12] zaprezentowałem wyniki badań wpływu parametrów procesowych (średniej mocy optycznej, prędkości skanowania materiału, temperatury początkowej podłoża, roz-

miaru znakowanego obszaru oraz położenia próbki zarówno względem płaszczyzny ogniskowania systemu, jak i centrum pola pracy) na powtarzalność kolorowego laserowego znakowania odpowiednio [A7] tytanu oraz [A12] stali nierdzewnej AISI 304. W celu obiektywnej oceny obserwowanych zmian fluktuację barwy próbek określano kolorymetrycznie uwzględniając dopuszczalną w przemyśle poligraficznym wartość parametru błędu koloru $\Delta E_{ab}^* \leq 7$ [2]. Wykazano, iż powtarzalność procesu znakowania tytanu wymaga zapewnienia niezależnie: stałości fluencji promieniowania na poziomie lepszym niż 1%, tolerancji temperatury początkowej materiału poniżej $\pm 5^\circ\text{C}$ oraz położenia próbki względem płaszczyzny ogniskowania z błędem mniejszym niż 0,2 mm. W pracy wyjaśniono również dlaczego poszczególne kolory charakteryzują się różną wrażliwością na stałość procesu. Rozszerzona analiza zawarta w pracy [M1] wykazała, iż powtarzalność uzyskania koloru (dla przykładu czerwonego – grubość warstwy tlenkowej ok. 26 nm) wymaga stałości grubości tej warstwy na poziomie lepszym od 0,5 nm. Analogiczne badania przeprowadzone dla stali nierdzewnej [A12] wykazały dopuszczalność średnio trzykrotnie większych tolerancji parametrów procesowych. W pracy [A12] zaprezentowałem również wyniki badań odporności powłok wytwarzanych na stali nierdzewnej na procesy starzeniowe, w szczególności korozję w środowisku agresywnym (o wysokim stężeniu jonów chlorkowych). Badania dowiodły, iż odporność AISI 304 na korozję uzależniona jest wprost od wartości fluencji jaka została wykorzystana do uzyskania określonej barwy. Taki stan rzeczy wynika ze zmiany morfologii chemicznej zgorzeliny w funkcji gęstości energii promieniowania, co z kolei jest efektem przewagi termodynamiki lub kinetyki na danym etapie procesu [M1]. Przy niskich gęstościach energii na powierzchni podłoża tworzy się głównie pasywny tlenek chromowy $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ z uwagi na większe powinowactwo chromu do tlenu (preferencja termodynamiczna), bądź spinel MnCr_2O_3 (stosunek $\text{Cr}:\text{Fe} \gg 1$). Wzrost fluencji prowadzi zaś do dyfuzji żelaza poprzez ciekłą warstwę Cr_2O_3 , co w efekcie przyczynia się do powstania na powierzchni głównie tlenku żelazowego Fe_2O_3 (stosunek $\text{Cr}:\text{Fe} \ll 1$), zaś pierwotna warstwa Cr_2O_3 , jako głębiej położona, ewoluje do formy spinelu $\text{MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ lub $\text{FeFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ gdzie: $0 \leq x \leq 2$. Wynika to z większej ruchliwości jonów Fe^{3+} , a tym samym proces na dalszym etapie kontrolowany jest bardziej poprzez kinetykę niż termodynamikę. Przeprowadzone badania pozwoliły zdefiniować wytyczne modyfikacji budowy dostępnych obecnie komercyjnych systemów do znakowania laserowego tak, aby powtarzalność kolorowego znakowania mogła być uzyskana poza laboratorium. Propozycja rozwiązania problemu została zdefiniowana i zgłoszona do międzynarodowej ochrony patentowej [ZP1]. Wnioski płynące z badań antykorozyjnych stali AISI 304 poddanej obróbce laserowej są istotne nie tylko z punktu widzenia wdrożenia technologii kolorowego znakowania, lecz również w zakresie innych technologii laserowych odnoszących się do obróbki stali nierdzewnej w procesach fotofizycznych.

W pracy [A8] zaprezentowałem badania bezpośredniej laserowo indukowanej metalizacji ceramiki AlN w środowisku różnych gazów procesowych (powietrza, N_2 oraz Ar). Wykazano, iż spadek rezystancji właściwej w funkcji fluencji promieniowania był w głównej mierze wynikiem spadku efektywnej rezystywności warstw, przy niemal niezmienniej grubości metalizacji. Grubość warstwy, w zakresie poniżej progu ablacji w zależności od środowiska procesu wahała się w granicach $3\text{--}10\ \mu\text{m}$. Wykazano również, iż efektywna rezystywność ścieżek była przede wszystkim funkcją stopnia pokrycia kolejnych impulsów O_V , nie zaś mocy optycznej. Najlepszy rezultat osiągnięto dla procesu przeprowadzanego w środowisku argonu (gazu o znikomej reaktywności). Dla stopnia pokrycia 94% rezystywność ścieżek wynosiła $0,64 \cdot 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$, to jest zaledwie dwudziestokrotnie więcej od rezystywności czystego aluminium ($2,8 \cdot 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$). Odpowiadająca temu rezystancja powierzchniowa to 40 m Ω . W przypadku tym obserwowano jednak istotną ablację materiału (na głębokość rzędu 150 μm). Poniżej progu ablacji ($128\ \text{J}/\text{cm}^2$, $O_V = 80\%$), gdzie ubytek ceramiki był na nieznacznym poziomie ($< 8,4\ \mu\text{m}$) rezystancja powierzchniowa oraz rezystywność wynosiły odpowiednio: 0,8 Ω oraz $4,2 \cdot 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$. Strukturyzacja ceramiki w środowisku atmosferycznym nie przyniosła pozytywnego efektu. Wynikało to z reakcji utleniania ceramiki w temperaturach niższych ($> 700^\circ\text{C}$) od temperatury dekompozycji ($\sim 2500^\circ\text{C}$) AlN. W ramach równolegle prowadzonych badań wykazano możliwość wykorzystania bezpośredniej metalizacji ceramiki AlN do prototypowania metamateriałów zarówno na zakres mikrofalowy [A9], (Zał. 4: [C10]), jak i w paśmie terahercowym (Zał. 4: [C4, C7]). W pracy [M1] zaprezentowano również szczegółową analizę ewolucji składu chemicznego oraz morfologii powierzchni wytwarzanych warstw przewodzących w funkcji fluencji promieniowania laserowego.

W pracy [A9] wykazano kolejno możliwość zastosowania bezpośredniej laserowo indukowanej metalizacji ceramiki AlN jako jednego ze sposobów prototypowania metamateriałów typu MNG (*Mu Negative*) charakteryzujących się ujemną wartością przenikalności magnetycznej ($\epsilon_r > 0, \mu_r < 0$). Przeprowadzono cykl eksperymentów analizujących interakcję wytwarzanych powyższą metodą komórek SR (*Spiral Resonator*) z promieniowaniem elektromagnetycznym z zakresu mikrofal (~2,3 GHz). Pomiary wykonano w komorze bezodbiciowej z wykorzystaniem analizatora sieci ZVA-50 firmy Rohde & Schwarz. Wykazano, iż zależnie od sposobu umieszczenia rezonatorów SR względem macierzy antenowej (kierunku pobudzenia), możliwe jest zwiększenie tłumienia pasożytniczych sprzężeń pomiędzy promiennikami anteny S_{21} o wartość 7 lub 9 dB w zależności od zastosowanej konfiguracji. Celem weryfikacji rezultatu uzyskanego dla ceramiki AlN, pomiar powtórzono dla wiersza rezonatorów SR wykonanych z laminatu RO4003 Rogers Corp. klasyczną fotolitografią. Stosowanie innego podłoża wymagało przeprojektowania konstrukcji SR tak, aby pokryć zakres pracy obu rezonatorów. W rezultacie uzyskano porównywalne tłumienie sprzężenia anten dla obu przypadków. Struktury wytwarzane poprzez bezpośrednią metalizację AlN wykazywały nieco szersze pasmo pracy na poziomie ~100 MHz. Przedstawiona w pracy metoda prototypowania struktur metamateriałowych umożliwia szybką eksperymentalną weryfikację projektowanych struktur, bez konieczności przygotowywania klisz lub matryc.

Dotyczy pracy [A10]. Wykorzystanie laserów CO₂ pozwala na erozyjną obróbkę polimerów głównie poprzez wydmuchiwanie roztopionej masy lub odparowywanie materiału. W przypadku większości termoplastów wysoka jakość cięcia uzyskiwana jest jedynie dzięki asyście gazów procesowych usuwających podgrzany powyżej temperatury topnienia polimer. W wielu aplikacjach (mikrofluidyka, kanały do pozycjonowania, falowody optyczne, laserowe frezowanie 3D) wymagane jest jednak tylko częściowe nacinanie bądź precyzyjne, kontrolowane usuwanie materiału, co z kolei uwzględniając konieczność dostarczenia przeszło dwukrotnie większej energii w stosunku do cięcia poprzez wydmuchiwanie w celu odparowania masy polimeru, znacząco poszerza HAZ, a w wielu przypadkach wręcz uniemożliwia, z jakościowego punktu widzenia, obróbkę. Istnieje wiele doniesień opisujących metody poprawy mikroobróbki przy wykorzystaniu laserów CO₂ włączając w to stosowanie warstw ochronnych z innego polimeru [8], schładzanie powierzchni materiału zimnym gazem procesowym przy wykorzystaniu rurek wirowych VORTEX [9], skracanie czasu trwania impulsu lasera zewnętrznym modulatorem akustooptycznym [10] lub obróbkę z wykorzystaniem maski kontaktowej FACLAM [11]. Większość metod wymaga więc modyfikacji bądź systemu [10], bądź technologii (dodatkowy proces nakładania warstw [8] lub konieczność przygotowania stosownego szablonu [11]). W pracy [A10] wykazałem, iż optymalizację obróbki polimerów przy wykorzystaniu lasera CO₂ można osiągnąć również na drodze prostej modyfikacji materiału bazowego, poprzez zmianę własności reologicznych polimeru. Do modyfikacji poliamidu wykorzystano naturalny bentonit sodowy organofilizowany czwartorzędową solą amoniową NanoBent ZW1. Wykazano, iż w przypadku kompozytów wzrost koncentracji domieszki (w zakresie 2,5÷10%) powodował jednocześnie nieznaczne pogłębienie, jak i zawężenie uzyskiwanych nacięć w stosunku do czystego poliamidu. Korzystny wzrost współczynnika kształtu (d/w) był wynikiem mniejszej płynności nanokompozytów w strefie HAZ w odniesieniu do referencyjnego poliamidu. Badania wpływu koncentracji domieszkowania na mikroobróbkę poliamidu PA6 rozszerzono o struktury 3D. Odnotowano powtarzalny, pozytywny wpływ napelnacza na geometrię otrzymywanych struktur. Domieszkowanie (optymalna wartość 7,5 wt. % nanowypełniacza) pozwalało na uzyskiwanie kanałów o profilach zbliżonych do zadanego kształtu teoretycznego. Zastosowany nanowypełniacz poprawił również własności mechaniczne kompozytu w stosunku do czystego poliamidu.

Dotyczy pracy [A11]. Produkcja obwodów HDI (*High Density Interconnections*) w klasie poniżej 100/100 μm wymaga stosowania kosztownych technologii LDI (*Laser Direct Imaging*), które wykorzystują dedykowane systemy do naświetlania płytek. Alternatywnym rozwiązaniem, eliminującym konieczność wywoływania maski po naświetleniu jej promieniowaniem UV może być strukturyzacja płytki przy wykorzystaniu ablacji laserowej. Technologia ta nie pozwala jednak na bezpośrednie usuwanie miedzi z powierzchni laminatów (papierowo-fenolowych FR-2, epoksydowo-szklanych FR-3/FR-4, czy kompozytowych CEM-1/CEM-3) z uwagi na wyższy w stosunku do podłoża próg ablacji miedzi, jak również (w wielu wypadkach) brak możliwości rozróżnienia warstwy przewodzącej oraz podłoża pod względem absorpcji na promieniowanie laserowe. Rozwiązaniem jest pokrycie miedzi materiałem o niższym, dla danej długości fali, progu ablacji. W ramach badań zaprezentowanych w [M1, A11] poświęconych prototypowaniu obwodów drukowanych poprzez ablację warstwy

wierzchniej wykonano testy dla kilku pokryć (polimer, fotorezyst, cyna, bitumin), celem określenia granicznej, możliwej do uzyskania, rozdzielczości wytwarzania obwodów przy zastosowaniu uniwersalnych systemów do mikroobróbki laserowej wyposażonych w źródła nanosekundowe. Powyższa metoda pozwoliła na uzyskanie powtarzalnych ścieżek o minimalnej szerokości 3 mils (76 μm) ze średnią dokładnością na poziomie 5 μm dla pokryć organicznych oraz 11 μm dla przypadku cyny [M1, A11].

Dotyczy pracy [A13]. Jednym z ciekawszych sposobów wytwarzania mikrostruktur 3D w trybie bezpośredniego zapisu na materiale (LDW) z wykorzystaniem wiązki laserowej o profilu *Top-Hat* jest metoda ablacji powierzchni poprzez wielokrotne skanowanie jej po zadanym konturze (SCA) [21]. Prezentowane w literaturze podejście – stała wartość apertury maski oraz minimalizacja błędu kwadratowego różnicy pomiędzy zadanym profilem a wynikiem aproksymacji jednocześnie wzdłuż całego profilu na podstawie losowo dobieganych wartości promienia konturu i/lub prędkości skanowania materiału ogranicza jednak zasadniczo funkcjonalność modelu do realizacji struktur, których profil poprzeczny względem środka symetrii opisany jest wyłącznie funkcją monotonicznie malejącą, co znacząco zmniejsza możliwości aplikacyjne metody. W pracy [A13] zaproponowano rozszerzenie powyższego modelu do postaci umożliwiającej obróbkę powierzchni, której profil opisany jest funkcją monotonicznie malejącą na przedziałach z dopuszczeniem występowania punktów osobliwych (charakterystycznych, np. dla soczewek Fresnela), to jest najmniej korzystnego z punktu widzenia mikroobróbki przypadku. Odtworzenie zadanej trajektorii w punktach, gdzie funkcja traci ciągłość wymaga dużej precyzji obróbki, co implikuje konieczność stosowania możliwie małej średnicy maski. Skanowanie jednak dużych powierzchni tak małą aperturą, przy uwzględnieniu małej częstotliwości repetycji laserów ekscymerowych (typowo poniżej 1 kHz) wydłużyłoby czas trwania procesu do nieakceptowanych wartości. W pracy [A13] zaproponowano więc algorytm automatycznie ustalający dla danej trajektorii R optymalną średnicę maski D z zadanego zbioru N z uwzględnieniem zarówno minimalizacji czasu wykonania pojedynczej struktury, jak i możliwie wiernego odwzorowania obrabianej powierzchni, zwłaszcza w otoczeniu punktów osobliwych. W opracowanym algorytmie przyjęto iteracyjną metodę (dla każdej kolejnej trajektorii) określania błędu odwzorowania zadanego profilu z uwzględnieniem geometrii profilu uzyskanego w poprzednich krokach. Wykazano na przykładach, iż proponowany algorytm pozwala na wytwarzanie struktur, których profil opisany jest funkcją monotonicznie malejącą na przedziałach z dopuszczeniem występowania punktów osobliwych. W eksperymencie skoncentrowano się na opracowaniu metody, nie zaś określeniu maksymalnej możliwej do uzyskania dokładności wytwarzanych struktur, co po części wynikało ze stosunkowo dużego (jak na rozważaną aplikację) rozmiaru najmniejszej dostępnej maski (250 μm), jak również braku homogenizacji promieniowania w wykorzystanym systemie laserowym ze względu na mały przekrój wiązki lasera.

Monografia [M1] stanowi podsumowanie wyników moich badań przeprowadzonych w okresie czterech ostatnich lat. W pracy zaprezentowałem rozszerzoną analizę zagadnień przedstawionych w publikacjach [A1-A13]. Opisałem również wybrane rezultaty moich prac w zakresie prototypowania mikrostruktur 3D w oparciu o nowe algorytmy sterowania laserem ekscymerowym oraz replikacji struktur mikrofluidycznych typu *Lab On a Chip* wytwarzanych w procesie obróbki laserowej celem uzyskania kanałów o wysokiej jakości powierzchni, jak również innych struktur funkcjonalnych, w tym powierzchni hydrofobowych, mikrosoczewek oraz form do miękkiej fotolitografii. Z uwagi na brak spójnych źródeł prezentujących geometryczne aspekty mikroobróbki laserowej w pierwszej części rozdziału trzeciego monografii dokonałem autorskiego zestawienia wybranych zagadnień dotyczących tej tematyki. Opracowanie obejmuje charakterystykę podstawowych wiązek laserowych stosowanych w obróbce materiałowej, definicje oceny ich jakości, opis sposobów kompensacji niejednorodności rozkładu pola modowego oraz szczegółową klasyfikację podstawowych konfiguracji systemów do mikroobróbki zarówno w trybie bezpośredniego zapisu na materiale, jak i projekcji maski.

Najważniejsze osiągnięcia naukowe:

- ✓ w zakresie prototypowania mikrostruktur 3D:
 - opracowanie algorytmu sterowania laserem ekscymerowym pozwalającego na prototypowanie mikrostruktur 3D w trybie LDW z automatycznym doбором wybranych parametrów procesu umożliwiającym kolejno realizację struktur w oparciu o zadany model oraz maksymalny dopuszczalny błąd odtworzenia profilu wzorcowego [M1], [A13], (Zał. 4: [C2]),
 - opracowanie oryginalnej metody wytwarzania mikrostruktur poprzez replikację matryc, uzyskiwanych na drodze mikroobróbki laserowej, przy wykorzystaniu poli(di-metylosiloksanu) PDMS o kontrolowanym stopniu usieciowania [M1],

- ✓ w zakresie kolorowego laserowego znakowania metali:
 - szczegółowa analiza wpływu parametrów procesowych na powtarzalność kolorowego znakowania stali nierdzewnej AISI 304 [A12], (Zał. 4: [C9]) i tytanu [A1, A7] oraz wyjaśnienie zmienności tolerancji tych parametrów w funkcji koloru (grubości warstwy) [A7],
 - scharakteryzowanie własności optycznych (stałych dielektrycznych, parametrów modelu Pola (A_0 , E_0), Gaussa (A_1 , E_1 , Br_1) oraz Tauc-Lorentza (A_2 , E_2 , C , E_g) oscylatorów harmonicznym wykorzystanych do estymacji parametrów optycznych badanych warstw) oraz grubości i niejednorodności laserowo indukowanych zgorzelin na powierzchni tytanu w funkcji akumulowanej fluencji promieniowania [A1, A5], (Zał. 4: [C50]),
 - szczegółowa analiza składu chemicznego zgorzelin tytanowych oraz morfologii powierzchni w funkcji zarówno przekroju warstwy (czasu rozpylania jonowego Ar+) [A1, A5], jak i grubości warstwy (akumulowanej fluencji promieniowania) [A1], (Zał. 4: [B2, C51]),
 - powyższy zakres badań zwieńczono opracowaniem oryginalnej metody kolorowego laserowego znakowania metali, którą zgłoszono do międzynarodowej ochrony patentowej (Zał. 4: [ZP1]),
 - technologia ta została nagrodzona złotym medalem na wystawie Brussels Innova 2012 (*The World Exhibition on Inventions, Research and New Technologies*) (Zał. 4: pkt II.D),

- ✓ w zakresie laserowej obróbki polimerów:
 - wykazanie, iż zmiana własności reologicznych (zmniejszenie masowego współczynnika płynięcia MFR) kompozytu PA6/ZW1 poprzez domieszkowanie organofilizowanym nanowypełniaczem na poziomie 5÷7,5 wt % pozwala na znaczącą poprawę jakości obróbki tworzywa (przy jednoczesnej poprawie własności mechanicznych) w stosunku do czystego poliamidu przy wykorzystaniu lasera CO₂ [A10],
 - wytwarzanie oraz użyteczność nanokompozytów PA6/ZW1 w zakresie obróbki laserowej zgłoszono do ochrony patentowej (Zał. 4: [ZP2, ZP3, ZP4]),
 - określenie wybranych własności optycznych poli(L-laktydu) oraz poli(L-laktydu-ko-glikolidu), progów oraz charakteru ich ablacji, możliwości mikroobróbki, jak również wpływu parametrów procesowych na szeroko rozumianą jakość uzyskiwanych struktur w zakresie UV (laser KrF) [M1] oraz MIR (laser CO₂) [M1, A6], (Zał. 4: [C1]),
 - opracowanie metody wycinania biodegradowalnych stentów wieńcowych o wymiarach elementów konstrukcyjnych (rozpórek i pręseł) porównywalnych z talią wiązki użytego w procesie lasera CO₂ [M1, A6], (Zał. 4: [C1, C36, C40]),
 - wykazanie, iż naświetlanie poli(L-laktydu) promieniowaniem UV (laser KrF) o gęstości energii poniżej progu ablacji wywołuje efekt inkubacji centrów absorpcyjnych, przy czym intensywność obserwowanych zmian jest wprost proporcjonalna do wartości fluencji akumulowanej [M1], (Zał. 4: [C3]),
 - szczegółowa charakterystyka wpływu promieniowania laserowego z zakresu UV (248 nm) oraz MIR (10,6 μm) o gęstościach energii poniżej progu ablacji (umożliwiających geometryczną obróbkę materiału) na własności mechaniczne [A6] oraz fizykochemiczne [A2, A3] PLLA oraz PLGA,

- ✓ w zakresie wytwarzania struktur przewodzących:
 - dogłębna analiza wpływu promieniowania laserowego na efektywność bezpośredniej laserowo indukowanej metalizacji ceramiki AlN oraz wykazanie, który z parametrów procesowych i w jakim stopniu determinuje grubość metalizacji oraz rezystywność wytwarzanych warstw [A8], (Zał. 4: [C6]). Określenie jak zmienia się skład chemiczny oraz morfologia warstwy wierzchniej w funkcji akumulowanej fluencji promieniowania,
 - przedstawienie możliwości wykorzystania powyższej technologii do prototypowania metamateriałów typu *Mu Negative* MNG zarówno na zakres mikrofalowy (~2,3 GHz) [A9], (Zał. 4: [C10]), jak i w paśmie terahercowym (~0,5 THz) (Zał. 4: [C4, C7]),
 - propozycja oraz uzyskanie ochrony patentowej na sposób laserowego wytwarzania elementarnej komórki 3D przestrzennych struktur metamateriałowych (Zał. 4: [P18]),
 - opracowanie metody, pozwalającej na bieżącą (w trakcie procesu) ocenę stopnia redukcji GO przy wykorzystaniu lasera ekscymerowego [M1].

- ✓ w zakresie laserowo indukowanej spektroskopii:
 - opracowanie metody kalibracji spektrometru LIBS pozwalającej na przeprowadzanie analiz ilościowych pierwiastków śladowych próbek o złożonej (wieloczynnikowej) strukturze chemicznej [A4], (Zał. 4: [C5]).

Najistotniejsze wnioski:✓ w zakresie prototypowania mikrostruktur 3D:

Wykazano, iż metoda wytwarzania mikrostruktur poprzez replikację matryc, uzyskiwanych na drodze mikroobróbki laserowej, przy wykorzystaniu PDMS-u o kontrolowanym stopniu usieciowania umożliwia wytwarzanie układów mikrofluidycznych o owalnym przekroju kanału, jak również innych struktur funkcjonalnych, w tym powierzchni hydrofobowych, mikrosoczewek oraz form do miękkiej fotolitografii [M1].

✓ w zakresie kolorowego laserowego znakowania metali:

Przeprowadzone badania wykazały, iż powtarzalność kolorowego laserowego znakowania zarówno tytanu, jak i stali nierdzewnej AISI 304 uwarunkowana jest głównie powtarzalnością oraz stałością gęstości energii promieniowania na powierzchni materiału, w szczególności wartości średniej mocy optycznej, prędkości skanowania podłoża oraz położenia próbki względem płaszczyzny ogniskowania. Wykazano również, iż istotny wpływ na przebieg procesu ma temperatura początkowa materiału [A7, A12], (Zał. 4: [C9]). Dowiedziono, iż możliwe jest kolorowe znakowanie powyższych metali z wymaganą w przemyśle poligraficznym powtarzalnością ($\Delta E_{ab}^* \leq 7$) [2] z zachowaniem kolorystyki logotypu lub wzoru w zakresie możliwych do uzyskania kolorów, jak również, że istnieje konieczność modyfikacji dostępnych obecnie komercyjnych systemów do znakowania laserowego tak, aby efekt ten mógł być uzyskany poza laboratorium [A7, A12].

Propozycja rozwiązania problemu znakowania metali w sposób powtarzalny w przypadkach, gdy te umieszczone są w niewłaściwej odległości od optyki systemu (lub gdy kolejne przedmioty sztuka do sztuki różnią się gabarytami), z uwzględnieniem fluktuacji gęstości mocy (zależnej od stanu wygrzania lasera, procesów starzeniowych źródła, zabrudzenia lub degradacji optyki toru, którym prowadzona jest wiązka, czy położenia plamki w obrębie pola skanowania materiału) została zdefiniowana i zgłoszona do ochrony patentowej (Zał. 4: [ZP1]).

Ustalono, iż grubość wytwarzanych na powierzchni tytanu powłok jest liniowo zależna od wartości zastosowanej fluencji. Wykazano również, iż wynikowy kolor, jaki powstaje w trakcie znakowania tytanu nie jest wyłącznie efektem interferencyjnym, jak powszechnie zakładano [12–17], lecz w znaczącej mierze wynika z absorpcji materiału, która to na skutek zmiany morfologii chemicznej zgorzeliny [A1, A5], (Zał. 4: [B2, C50, C51]) zmienia się w trakcie formowania warstwy. Dowiedziono tym samym, iż wytwarzane na powierzchni tytanu zgorzeliny nie są wyłącznie konglomeratem tlenków tytanu, jak postulowano w wielu pracach, lecz w zależności od zastosowanej fluencji zawierają w swym składzie również azotki TiN_x i/lub azototlenki TiN_xO_y oraz związki niestechiometryczne [A1, A5], (Zał. 4: [B2, C50, C51]).

Ustalono, iż wytworzone na powierzchni stali AISI 304 kolorowe zgorzeliny charakteryzuje stosunkowo dobra odporność na procesy starzeniowe z wyłączeniem agresywnych warunków środowiskowych [A12]. Wyjaśniono dlaczego próbki o różnej barwie charakteryzuje różna odporność na korozję w agresywnych warunkach środowiskowych.

✓ w zakresie laserowej obróbki polimerów:

Przeprowadzone badania dowiodły, iż domieszkowanie poliamidu PA6 nanocząsteczkowym wypełniaczem (NanoBent ZW1) pozwala na znaczącą poprawę geometrii mikroobróbki uzyskanego w ten sposób kompozytu zarówno w przypadku nacinania, pełnego przecięcia, jak i grawerowania 3D [A10]. Wykazano, iż ma to związek ze zmianą własności reologicznych materiału, to jest zmniejszeniem masowego współczynnika płynności. Optymalny rezultat osiągnięto w zakresie 5÷7,5% wagowych nanowypełniacza, co odpowiadało przeszło pięciokrotnej redukcji MFR [M1].

Wykazano, iż zastosowanie warstwy ochronnej z PDMS-u pozwala na istotną poprawę mikroobróbki PLLA. Rozwiązanie to umożliwia całkowite wyeliminowanie osadzania się na powierzchni polimeru, wyrzucanej podczas obróbki, części płynnej frakcji przecinanego materiału [M1].

Ustalono, iż poli(L-laktyd), zwłaszcza podczas naświetlania laserem KrF, wykazuje efekt inkubacji centrów absorpcyjnych zwiększający przeszło dwukrotnie absorpcję optyczną dla długości fali 248 nm [M1], (Zał. 4: [C3]). Efekt ten przypisano zarówno zmianie otoczenia chemicznego istniejących chromoforów w następstwie defragmentacji polimeru (obserwowanej w analizach między innymi jako zmniejszanie się ciężaru cząsteczkowego), jak i tworzeniu się nowych chromoforów, w tym grup winylowych. Obecność występowania w materiałach modyfikowanych podwójnego wiązania $RC=CH_2$ potwierdzono spektroskopią średniej podczerwieni [A2, A3], (Zał. 4: [C1, C8]).

Wykazano, iż obróbka polilaktydów z fluencjami znacznie powyżej progu ablacji indukuje zmiany w strukturze chemicznej materiałów o mniejszej intensywności, niż te obserwowane przy długotrwałych ekspozycjach na promieniowanie o niskiej gęstości energii (lampy UV-VIS, plazma, laser poniżej progu ablacji). Badania przeprowadzone dla niższych fluencji, poniżej progu ablacji, celem wyjaśnienia efektu inkubacji centrów absorpcyjnych w PLLA w zakresie oddziaływania promieniowania lasera KrF wykazały, iż zmiany jakie obserwowano były proporcjonalne do wartości fluencji akumulowanej [M1], (Zał. 4: [C3]).

Ustalono ponadto, iż zarówno oddziaływanie promieniowaniem lasera CO₂, jak i KrF, pomimo znajdującego się w atmosferze procesu tlenu, nie powoduje utleniania warstwy wierzchniej. Obserwowano deoksydację oraz zmniejszanie masy cząsteczkowej polimerów między innymi w wyniku reakcji Norrish'a typu II (dla przypadku lasera KrF) bądź eliminacji cis (laser KrF oraz CO₂) [A2, A3], (Zał. 4: [C1, C8]). Pomiary własności mechanicznych wykazały kolejno istotne osłabienie polimerów będące bezpośrednim następstwem powyższych zmian [A6].

✓ w zakresie wytwarzania struktur przewodzących:

Wykazano, iż bezpośrednia laserowa metalizacja ceramiki AlN to efektywny sposób uzyskiwania niskoomowych kontaktów na powierzchni rozważanego półprzewodnika. Obróbka ceramiki w środowisku gazów obojętnych pozwoliła uzyskać rezystancje powierzchniowe poniżej 10 mΩ, wielokrotnie niższe od prezentowanych dotychczas w literaturze [18–20]. Ustalono, iż rezystancja powierzchniowa zależna jest w głównej mierze od efektywnej rezystywności warstwy. Ta natomiast jest przede wszystkim funkcją stopnia pokrycia kolejnych impulsów lasera, nie zaś mocy optycznej [A8], (Zał. 4: [C6]). Najlepszy rezultat ($\rho = 0,64 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$) osiągnięto dla procesu w osłonie argonu. Wykorzystanie spektroskopii XPS oraz mikroanalizy EDX pozwoliło ustalić, jak zmienia się skład chemiczny warstw przewodzących wytwarzanych powyższą metodą w funkcji fluencji akumulowanej oraz poszczególnych gazów procesowych. Dowiedziono, iż laserowa metalizacja AlN nie powoduje zmian w składzie chemicznym ceramiki pod warstwą metalizacji [M1].

Przedstawiono kolejno możliwość wykorzystania powyższej technologii jako jednego ze sposobów prototypowania metamateriałów typu MNG zarówno na zakres mikrofalowy (~2,3 GHz) [A9], (Zał. 4: [C10]), jak i, w wyniku miniaturyzacji obwodów rezonansowych, w paśmie terahercowym (~0,5 THz) (Zał. 4: [C4, C7]). Zaproponowano również sposób laserowego wytwarzania elementarnej komórki 3D przestrzennych struktur metamateriałowych (Zał. 4: [P18]).

Przeprowadzone prace w zakresie prototypowania obwodów drukowanych poprzez ablację warstwy wierzchniej pozwoliły określić, które czynniki ograniczają dokładność oraz powtarzalność metody. Ustalono, iż głównym elementem limitującym rozdzielczość procesu (poza średnicą plamki) jest czas trwania impulsu lasera, który poprzez efekty termiczne wpływa na jakość strukturyzacji maski. Wykorzystanie laserów nanosekundowych umożliwiło wytwarzanie ścieżek o minimalnej szerokości 3 mils (76 μm) z dokładnością na poziomie kilku μm w zależności od typu zastosowanej maski [A11]. Wartość ta wynika z ograniczeń sprzętowych, nie zaś metody.

✓ w zakresie laserowo indukowanej spektroskopii:

Wykazano, iż kalibracja spektrometru LIBS pelletami wykonanymi wprost z badanych materiałów (lub materiałów o zbliżonej budowie fizykochemicznej) o znanym składzie chemicznym (ustalonym inną techniką pomiarową – np. Atomową Spektrometrią Absorpcyjną) pozwala na uzyskanie wysokiej dokładności pomiaru [A4], (Zał. 4: [C5]).

Aspekt praktyczny i zastosowanie:

Przeprowadzone badania zaowocowały opracowaniem nowych algorytmów, technologii obróbki oraz metod pomiarowych. Poniżej przedstawiono listę najważniejszych zastosowań:

- zaproponowano nowy algorytm sterowania laserem ekscymerowym umożliwiający wytwarzanie mikrostruktur 3D w trybie bezpośredniego zapisu na materiale z automatycznym doбором wybranych parametrów procesu. Algorytm umożliwia realizację struktur w oparciu o zadany model oraz maksymalny dopuszczalny błąd odtworzenia profilu wzorcowego [M1], [A13], (Zał. 4: [C2]),
- opracowano oryginalną metodę wytwarzania mikrostruktur poprzez replikację matryc, uzyskiwanych na drodze mikroobróbki laserowej, przy wykorzystaniu PDMS-u o kontrolowanym stopniu usieciowania [M1] – tematyka ta jest aktualnie również publikowana,

- zaproponowano sposób powtarzalnego kolorowego znakowania metali (sposób modyfikacji dostępnych obecnie komercyjnych systemów do znakowania laserowego) w przypadkach, gdy te umieszczone są w niewłaściwej odległości od optyki systemu (lub gdy kolejne przedmioty sztuka do sztuki różnią się gabarytami), z uwzględnieniem fluktuacji gęstości mocy (zależnej od stanu wygrzania lasera, procesów starzeniowych źródła, zabrudzenia lub degradacji optyki toru, którym prowadzona jest wiązka, czy położenia plamki w obrębie pola skanowania materiału). Opracowana technologia została zdefiniowana i zgłoszona do ochrony patentowej (Zał. 4: [ZP1]) oraz nagrodzona złotym medalem na Światowej Wystawie Wynalazków, Badań Naukowych i Nowych Technologii Brussels Innova 2012 – (Zał. 4: pkt II.D),
- przedstawiono metodę modyfikacji poliamidu PA6 nanocząsteczkowym wypełniaczem (Nano-Bent ZW1) pozwalającą na znaczącą poprawę geometrii mikroobróbki uzyskanego w ten sposób kompozytu zarówno w przypadku nacinania, pełnego przecięcia, jak i grawerowania 3D popularnym w przemyśle laserem CO₂ [A10], (Zał. 4: [ZP2]),
- opracowano metodę wytwarzania stentów biodegradowalnych przy wykorzystaniu lasera CO₂ [M1, str.150-151],
- zaprezentowano kilka technik wytwarzania przewodzących struktur przy zastosowaniu mikroobróbki laserowej [M1, A8, A11], (Zał. 4: [C4, C6]),
- zaprezentowano możliwość wytwarzania struktur metamateriałowych przy wykorzystaniu mikroobróbki laserowej [M1, A9], (zał. 4: [C4, C7, C10]),

Literatura – prace referencyjne:

- [1] D.P. Adams, R.D. Murphy, D.J. Saiz, D.A. Hirschfeld, M.A. Rodriguez, P.G. Kotula, B.H. Jared, Nanosecond pulsed laser irradiation of titanium: Oxide growth and effects on underlying metal, *Surf. Coat. Technol.*, 248 (2014) 38-45.
- [2] F. Bunting, *The Color Shop, Color Primer: An Introduction to the History of Color, Color Theory, and Color Measurement*, Light Source Computer Images, Inc., An X-Rite Company, Grandville, Michigan, 1998, 44,
- [3] S.T. Hsu, H. Tan, Y.L. Yao, *Effect of excimer laser irradiation on crystallinity and chemical bonding of biodegradable polymer*, *Polymer Degradation and Stability*, 2012, Vol. 97. No. 1, 88–97,
- [4] P. Slepíčka, I. Michaljaníčová, P. Sajdl, P. Fitl, V. Švorčík, *Surface ablation of PLLA induced by KrF excimer laser*, *Applied Surface Science*, 2013, Vol. 283, 438–444,
- [5] W.Y. Zhou, S.H. Lee, M. Wang, W.L. Cheung, W.Y. Ip, *Selective laser sintering of porous tissue engineering scaffolds from poly (L-lactide)/carbonated hydroxyapatite nanocomposite microspheres*, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2008. Vol. 19, 2535–2540,
- [6] S. Hoeges, M. Lindner, H. Fischer, W. Meiners, K. Wissenbach, *Manufacturing of bone substitute implants using Selective Laser Melting*, 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2009, 2230–2234,
- [7] N. Grabow, C.M. Bünger, C. Schultze, K. Schmohl, D.P. Martin, S.F. Williams, K. Sternberg, K.P. Schmitz, *A biodegradable slotted tube stent based on poly (L-lactide) and poly (4-hydroxybutyrate) for rapid balloon-expansion*, *Annals of Biomedical Engineering*, 2007, Vol. 35, 2031–2038,
- [8] C.K. Chung, Y.C. Lin, G.R. Huang, *Bulge formation and improvement of the polymer in CO₂ laser micromachining*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, Vol. 15, No. 10, 1878–1884,
- [9] M.F. Chen, Y.S. Ho, W.T. Hsiao, W.L. Huang, Y.P. Chen, *Laser cutting of GFRM using assisted cooling-air generated by Vortex tube*, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Materials Processing*, 2008, Guilin-Guangzhou, China,
- [10] K.M. Nowak, H.J. Baker, D.R. Hall, *Cold processing of green state LTCC with a CO₂ laser*, *Applied Physics A*, 2006, Vol. 84, No. 3, 267–270.
- [11] C.K. Chung, S.L. Lin, *On the fabrication of minimizing bulges and reducing the feature dimensions of microchannels using novel CO₂ laser micromachining*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, Vol. 21, No. 6, 065023.
- [12] Á. Pérez Del Pino, P. Serra, J.L. Morenza, *Oxidation of titanium through Nd:YAG laser irradiation*, *Applied Surface Science*, 2002, Vol. 197–198, 887–890,
- [13] Á. Pérez Del Pino, J.M. Fernandez-Pradas, P. Serra, J.L. Morenza, *Coloring of titanium through laser oxidation: comparative study with anodizing*, *Surface Coating Technology*, 2004, Vol. 187, No. 1, 106–12,
- [14] D.P. Adams, R.D. Murphy, D. Saiz, M. Rodriguez, D. Hirschfeld, *Nanosecond Pulsed Laser Color Marking of Titanium: Analysis of Oxide Layer Phase*, *Conference Paper CLEO: Science and Innovations San Jose, California 2013, CM1H.7.*

- [15] Á. Pérez Del Pino, P. Serra, J.L. Morenza, *Coloring of titanium by pulsed laser processing in air*, Thin Solid Films, 2002, Vol. 415, 201–205.
- [16] E. Gyorgy, Á. Pérez Del Pino, P. Serra, J.L. Morenza, *Structure formation on titanium during oxidation induced by cumulative pulsed Nd:YAG laser irradiation*, Applied Physics A, 2004, Vol. 78, 765–770.
- [17] Á. Pérez Del Pino, P. Serra, J.L. Morenza, *Laser surface processing of titanium in air: Influence of scan traces overlapping*, Journal of Laser Applications, 2003, Vol. 15, No. 2, 120–3.
- [18] Y. Hirayama, H. Yabe, M. Obara, *Selective ablation of AlN ceramic using femtosecond, nanosecond, and microsecond pulsed laser*, Journal of Applied Physics, 2001, Vol. 89, No. 5, 2943–2949.
- [19] H. Zheng, H.M. Phillips, J.L. Tan, G.C. Lim, *Laser-induced conductivity in aluminum nitride*, In International Symposium on Photonics and Applications, Part of the SPIE Conference on Photonic Systems and Applications, Proceedings of SPIE, 1999, Vol. 3898, 280–286.
- [20] N. Morita, T. Watanabe, Y. Yoshida, *Direct formation of conductor films by laser sublimating of ceramics*, Applied Physics Letters, 1989, Vol. 54, 1974–1975.
- [21] K. Naessens, H. Ottevaere, R. Baets, P. Van Daele, H. Thienpont, *Direct writing of microlenses in polycarbonate with excimer laser ablation*, Applied Optics, 2003, Vol. 42, No. 31, 6349–6359.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych)

5.1. Działalność naukowa prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora

Pierwsze badania naukowe rozpocząłem podczas realizacji pracy magisterskiej. Celem moich działań była ocena możliwości adaptacji elektrooptycznych modulatorów światła do konstrukcji fotonicznego czujnika pola elektromagnetycznego, modelowanie oraz analiza wybranych parametrów układu, w tym: pasma pracy, czułości i dynamiki czujnika, kierunkowości pomiaru oraz zniekształceń mierzonego pola. W ramach realizacji pracy przeprowadziłem szczegółowe badania kilku modulatorów elektrooptycznych, zaproponowałem dwie alternatywne konstrukcje czujnika (polarymetryczną oraz interferometryczną), zdefiniowałem kolejno schematy zastępcze układów pozwalające na ich modelowanie oraz określiłem ograniczenia fotonicznych metod pomiaru pola elektromagnetycznego.

Dogłębna analiza własności modulatorów elektrooptycznych zainspirowała mnie do wykorzystania ich jako szybkich elementów wykonawczych pozwalających na kontrolę częstotliwości promieniowania laserów, jak również budowę układów stabilizacji częstotliwości różnicowej laserów. Wątek ten stał się motywem przewodnim mojego doktoratu – *Szybkie pętle fazowe w laserowej telekomunikacji koherentnej*. Po przeprowadzeniu szeregu eksperymentów zdefiniowałem tezę naukową pracy stwierdzeniem, iż kontrola długości optycznej rezonatora laserowego z wykorzystaniem modulatora elektrooptycznego pozwala znacznie – o kilka rzędów wielkości – polepszyć stałość częstotliwości heterodynowej między laserem odniesienia i laserem sygnałowym w układach optycznej detekcji koherentnej. Ponadto zastosowanie modulatora elektrooptycznego pozwala rozszerzyć zakres stabilizowanych fluktuacji o pasmo górnych częstotliwości niedostępnych dla przestrajania termicznego lub przesuwnika piezoceramicznego. Podstawowym celem prowadzonych wówczas prac było opracowanie koncepcji, budowa oraz badanie układów szybkiej pętli fazowej PLL wykorzystującej modulator elektrooptyczny do stabilizacji częstotliwości heterodyny mikrolaserów pompowanych laserami półprzewodnikowymi. Równolegle poszukiwałem nowych alternatywnych metod kontroli częstotliwości promieniowania mikrolaserów. W efekcie przeprowadzonych badań wykazałem, iż efektywnym i relatywnie szybkim sposobem zmiany częstotliwości promieniowania kompaktowych mikrolaserów (zwierciadła wykonane wprost na kryształach ośrodka czynnego) jest optotermiczne przestrajanie lasera poprzez modulację mocy pompy (Zał. 4: [C57, C64]).

Do szczególnych osiągnięć związanych z omawianym wątkiem mogę zaliczyć:

- ✓ opracowanie i realizację (po raz pierwszy w literaturze) heterodyny mikrolaserów na ciele stałym z elektrooptyczną stabilizacją częstotliwości różnicowej (Zał. 4: [C56, C63]),
- ✓ opracowanie optotermicznego przestrajania mikrolaserów, wykorzystanie tej techniki do ich stabilizacji oraz prezentacja po raz pierwszy wyników stałości częstotliwości układu (Zał. 4: [C57, C64]),
- ✓ opracowanie procedur projektowania i optymalizacji parametrów optycznej pętli fazowej, jak również projekt i wykonanie wszystkich bloków elektronicznych układu stabilizacji (doktorat),
- ✓ sformułowanie kryteriów doboru częstości naturalnej pętli PLL w celu optymalizacji stałości częstotliwości heterodyny optycznej (doktorat),

- ✓ uzyskanie wysokiej stałości częstotliwości różnicowej badanych heterodyn (wariancja Allana $\sigma < 1$ Hz przy czasie uśredniania $\tau = 10$ s dla metody elektrooptycznej – lasery He-Ne (Zał. 4: [C59, C60, C63]); $\sigma = 1,5$ Hz @ $\tau = 10$ s dla metody elektrooptycznej – lasery na ciele stałym (Nd:YAG) (Zał. 4: [C56, C63]) oraz $\sigma < 74$ kHz @ $\tau = 10$ s dla metody optotermicznej: Nd:YAG, Nd:YVO₄) (Zał. 4: [C57, C64]).

W okresie studiów doktoranckich prowadziłem równocześnie badania nad optymalizacją fotonicznych metod pomiaru pola elektromagnetycznego. Wykazałem, iż podstawowym ograniczeniem klasycznego podejścia (polarymetrycznej bądź interferometrycznej konfiguracji) jest niska czułość układu (>100 V/m) wynikająca z dużego napięcia półfalowego modulatora elektrooptycznego. Wykorzystując doświadczenie w kontroli i stabilizacji mikrolaserów, zaproponowałem nowe rozwiązanie bazujące na układzie mikroheterodyny przestrajanej modulatorem elektrooptycznym umieszczonym we wnętrzu jednego z mikrolaserów (Zał. 4: [C61, C62, C65]). Zaproponowane przeze mnie rozwiązania układowe zostały objęte ochroną patentową (Zał. 4: [P11–P14]).

Przed uzyskaniem stopnia doktora brałem udział w realizacji 5 projektów naukowo-badawczych, których wykaz zamieszczono w załączniku nr 4 – pozycje 10÷14 na liście projektów (Zał. 4: pkt. II.J – Tab.1.). Byłem również promotorem pomocniczym 3 prac dyplomowych. W ramach opieki nad jedną z prac współtworzyłem (zdefiniowanie konfiguracji, projekt i budowa układu demodulatora FM) opracowanie dopplerowskiego wibrometru laserowego (Zał. 4: [C58]).

5.2. Działalność naukowa prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora

Działalność naukowa jaką prowadziłem po uzyskaniu stopnia doktora obejmowała kilka obszarów badań. Pomijając wątek opisany w ramach prezentacji monotematycznego osiągnięcia naukowego badania, które były przedmiotem moich zainteresowań można sklasyfikować następująco:

I. Kontynuowałem rozwój fotonicznych metod pomiaru pola elektromagnetycznego

W ramach dalszych badań opracowałem i zbudowałem czujnik fotoniczny na bazie mikroheterodyny laserów Nd:YVO₄ na wspólnym podłożu (eliminującym termiczny dryft częstotliwości różnicowej) ze światłowodowym układem zarówno pompowania, jak i detekcji częstotliwości różnicowej o relatywnie wysokiej czułości pomiarowej ($\Delta\nu/\Delta U \cong 10$ MHz/V) i szerokim odstępem międzymodowym (~ 28 GHz) (Zał. 4: [C46, C48]). Konstrukcja czujnika (wykalibrowanego w komorze TEM) zapewniała możliwość pomiaru pola zwłaszcza w strefie bliskiej (statycznej) z zachowaniem pełnej informacji o strukturze (widmie) mierzonego sygnału. Zaproponowałem ponadto konstrukcję czujnika na bazie mikrolasera z wewnętrzną modulacją w układzie z optycznym dyskryminatorem częstotliwości oraz aktywną stabilizacją punktu pracy (Zał. 4: [C32, C33]). Dwie alternatywne propozycje rozwiązań układowych czujnika poddano ochronie patentowej (Zał. 4: [P9, P10]).

II. Jednoczęstotliwościowe mikrolasery na ciele stałym oraz lasery z generacją wyższych harmonicznych

Dalsze moje prace dotyczyły opracowań nowych konstrukcji mikrolaserów, w szczególności przestrajalnych laserów jednoczęstotliwościowych (z wymuszaniem pracy jednomodowej) oraz źródeł z generacją wyższych harmonicznych (SHG). Do szczególnych osiągnięć związanych z omawianym wątkiem mogę zaliczyć opracowanie oraz prezentację realizacji:

- ✓ jednoczęstotliwościowego mikrolasera Nd:YAG/KTP z dwójłomnym filtrem Lyota (KTP + płytka Brewstera), generacją drugiej harmonicznej ($\lambda = 532$ nm o mocy wyjściowej 50 mW) oraz możliwością termicznego przestrajania częstotliwości promieniowania w trybie *mode-hopping* w paśmie 0,41 nm (109 GHz) @ 1064 nm przy zachowaniu pracy w jednym modzie podłużnym (Zał. 4: [B12, C30, C45]),
- ✓ jednoczęstotliwościowego mikrolasera Nd:YVO₄/KTP z dwójłomnym filtrem Lyota (KTP + *walk-off*: YVO₄), generacją drugiej harmonicznej (532 nm) oraz możliwością termicznego przestrajania częstotliwości promieniowania w paśmie 0,62 nm (164 GHz) @ 1064 nm przy zachowaniu pracy w jednym modzie podłużnym o mocach wyjściowych 70 mW (Zał. 4: [C26]) oraz 110 mW (Zał. 4: [B10]),
- ✓ monolitycznego jednoczęstotliwościowego mikrolasera Nd:YVO₄/YVO₄/KTP z dwójłomnym filtrem Lyota, generacją drugiej harmonicznej (532 nm) oraz możliwością termicznego przestrajania częstotliwości promieniowania o mocach wyjściowych 85 mW (całkowita sprawność optyczna $\eta_o \approx 9\%$) (Zał. 4: [B7, C23, C25]) oraz 160 mW ($\eta_o \approx 16,8\%$) (Zał. 4: [C15]),

- ✓ mikrolasera Nd:YAG/BiBO z generacją promieniowania z zakresie światła niebieskiego (473 nm) o mocy wyjściowej 20 mW (Zał. 4: [B8, C28]).

Powyżej wymienione konstrukcje prezentowane były w postaci kompaktowych prototypów zintegrowanych z układem chłodzenia. Wybrane aspekty prowadzonych badań zostały objęte ochroną patentową (Zał. 4: [P5]).

III. Lasery światłowodowe

Osobny wątek naukowy w zakresie opracowywania nowych źródeł promieniowania dotyczył budowy i optymalizacji laserów światłowodowych (Zał. 4: [B5, B6, B9, B13, B14, C12–C14, C21]). W ramach prowadzonych prac zaprezentowano między innymi prostą i skuteczną metodę kompensacji zniekształceń impulsu laserowego wywołanych nasycaniem się ośrodka czynnego we wzmacniaczach światłowodowych dużej mocy. Korzystając z arbitralnego źródła sygnałów elektrycznych oraz modeli opisujących funkcję wzmocnienia układu (w tym przypadku dwu stopniowego wzmacniacza MOPA) zamodelowano numerycznie i zaprezentowano możliwość uzyskania rozmaitych impulsów laserowych o kształtach zgodnych z zadaniem teoretycznie (Zał. 4: [B5, C21]). W innych pracach wykazano, iż zastosowanie rezonatora pierścieniowego (dodatкового sprzężenia zwrotnego) dla sygnału emisji spontanicznej ASE emitowanego przez jony Yb^{3+} (1 μm) we wzmacniaczach Er/Yb umożliwia kontrolę pasożytniczego efektu wzbudzenia się niepożądanego akcji laserowej na długości fali 1 μm oraz stabilizuje pracę wzmacniacza na długości fali 1,55 μm (Zał. 4: [B6, C14]). Wykazano również, iż zaprezentowana metoda korzystnie wpływa na sprawność optyczną wzmacniacza. Pozostałe prace z zakresu budowy laserów światłowodowych obejmowały projekt, budowę i optymalizację laserów światłowodowych pracujących w III oknie telekomunikacyjnym (1550 nm) w konfiguracji MOPA dwustopniowej – o mocy wyjściowej 5 W (20 W mocy pompującej @ 975 nm) (Zał. 4: [B13, B14, C12]) oraz trójstopniowej – 20 W (140 W mocy pompującej @ 915 nm) (Zał. 4: [C13]). W ramach prowadzonych prac badawczych opracowałem szereg układów elektronicznych niezbędnych do przeprowadzenia eksperymentów, m.in. sterowniki prądu i temperatury laserów półprzewodnikowych wykorzystywanych jako pompy do zasilania laserów światłowodowych średniej i dużej mocy, rozmaite układy chłodzenia oraz konstrukcje mechaniczne opracowywanych laserów.

Z wątkiem tym wiąże się bezpośrednio oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne, wymienione w Zał. 4 (pkt. IIB, poz. nr 1). Wybrane rozwiązania układowe zostały objęte ochroną patentową (Zał. 4: [P3, P4]).

IV. Stabilizacja bezwzględnej częstotliwości promieniowania laserów

Równoległe do prac poświęconych projektowaniu rozmaitych konstrukcji mikrolaserów prowadziłem badania mające na celu opracowanie nowych metod stabilizacji bezwzględnej częstotliwości promieniowania powyższych źródeł. Prezentowane przeze mnie konstrukcje wykorzystywały jako wzorzec częstotliwości stabilizowane termicznie światłowodowe siatki Bragga w obudowach klasycznych (o stałości własnej $\Delta\lambda/\Delta T \approx 6,8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$) i atermicznych (0,35 $\text{pm}/^\circ\text{C}$). Zaproponowane rozwiązanie umożliwiało uzyskanie stałości częstotliwości na poziomie $6 \cdot 10^{-7}$ (wartość zmierzona – siatka standardowa) oraz $3 \cdot 10^{-8}$ (wartość estymowana – siatki atermiczne) (Zał. 4: [B16, C27, C31]).

Odrębnym oryginalnym opracowaniem przeze mnie sposobem stabilizacji częstotliwości mikrolaserów, nie wymagającym stosowania zewnętrznych etalonów, była metoda wykorzystująca dyspersyjne własności filtru Lyota, którego główną funkcją w układzie było wymuszanie jednoczęstotliwościowej pracy mikrolasera. Punkt pracy lasera stabilizowany był przy wykorzystaniu informacji o wartości aktualnej mocy strat w filtrze Lyota (dla niepożądanego polaryzacji). Prosta kalibracja długości fali polegająca na wprowadzeniu do kontrolera wartości długości fali (określonej zewnętrznym analizatorem widma) modów ograniczających zakres pracy jednomodowej, umożliwiała kolejno automatyczną preselekcję jednej z 15 długości fali (z krokiem $\sim 32 \text{ pm}$). Zbudowany przeze mnie układ potwierdził koncepcję i funkcjonalność metody (Zał. 4: [B3]). Całość niezbędnej do realizacji tematu elektroniki opracowałem we własnym zakresie. Wybrane rozwiązania układowe zostały objęte ochroną patentową (Zał. 4: [P6–P7]).

V. Dopplerowska wibrometria laserowa

Ostatnim obszarem badań, nie wchodzącym w skład osiągnięcia naukowego, rozpoczętym jeszcze przed uzyskaniem stopnia doktora (Zał. 4: [C58]) był rozwój wibrometrii laserowej klasycznej

i światłowodowej. Publikowane przeze mnie prace prezentowały konstrukcje zbudowane w oparciu o lasery He-Ne (Zał. 4: [B11]), opracowane we własnym zakresie jednoczęstotliwościowe mikrolasery pracujące w zakresie światła zielonego (532 nm) (Zał. 4: [B4, C16, C19, C22]) oraz konstrukcje wibrometrów światłowodowych wykorzystujące komponenty techniki *Wavelength Division Multiplexing* WDM telekomunikacji światłowodowej, w tym wibrometry wielokanałowe (Zał. 4: [B15, C11, C17, C18, C20, C24]). W pracy (Zał. 4: [B4]) wykazałem, iż opracowane przeze mnie „zielone” jednoczęstotliwościowe mikrolasery na ciele stałym o wysokiej koherencji promieniowania $\Delta\nu \sim 85$ kHz (droga koherencji $\sim 3,5$ km) i łatwości uzyskania mocy w zakresie kilkudziesięciu mW stanowią interesującą alternatywę dla powszechnie stosowanych laserów He-Ne zwłaszcza w zastosowaniach do wibrometrii podwodnej z uwagi na niską absorpcję wody dla tej długości fali. Eksperymenty wykonane w środowisku wodnym pozwoliły uzyskać relatywnie wysoki stosunek S/N na wyjściu detektora – odpowiednio > 20 dB dla powierzchni rozpraszających oraz > 30 dB dla powierzchni odbłaskowych (taśma 3M) w paśmie $RBW = 10$ kHz dla mocy optycznej na wyjściu układu 5 mW i odległości do obiektu 1,2 m (Zał. 4: [C16]). W kolejnych badaniach zaprezentowano złożone światłowodowe konstrukcje wibrometryczne wykorzystujące lasery o bezpiecznej dla ludzkiego oka długości fali 1550 nm. Prowadzone badania obejmowały charakterystykę rozpraszania różnych obiektów, optymalizację układów detekcji światłowodów – wolna przestrzeń oraz optymalizację konstrukcji wielopunktowego wibrometru (Zał. 4: [B15, C11, C17, C18, C20, C24]). Z wątkiem tym wiąże się bezpośrednio oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne, wymienione w zał. 4 (pkt. IIB, poz. nr 2). Zaproponowane rozwiązania układowe zostały objęte ochroną patentową (Zał. 4: [P2, P15–P17]).

W okresie od uzyskania stopnia doktora do chwili obecnej brałem czynny udział w **10** projektach naukowo-badawczych, których wykaz zamieszczono w załączniku nr 4 – pozycje 1÷10 na liście projektów. W przypadku **3** projektów nr 1, 2 oraz 4 (na liście projektów) oprócz głównej funkcji (prowadzenia prac badawczych) współodpowiedzialny byłem/jestem za merytoryczne koordynowanie projektem. Byłem również promotorem **57** prac dyplomowych związanych z prezentowanym zakresem badań.

6. Podsumowanie dorobku naukowego

Pełne zestawienie dorobku naukowego znajduje się w załączniku nr 4. Poniżej przedstawiono jedynie krótkie statystyczne podsumowanie.

Tab. 6.1. Zestawienie dorobku naukowego – całość

Kategoria	Przed uzyskani-em(-u) stopnia dra	Po	Razem	
Publikacje w czasopismach	z listy filadelfijskiej z bazy JCR:	0	24	24
	z listy filadelfijskiej spoza bazy JCR:	0	1	1
	angielskojęzycznych spoza listy filadelfijskiej:	0	1	1
	polskojęzycznych:	0	3	3
Referaty na konferencjach	międzynarodowych widniejących w bazie WoS	0	41	41
	międzynarodowych spoza bazy WoS:	6	1	7
	krajowych:	2	7	9
Książki	skrypty:	1	0	1
	monografie:	0	1	1
Patenty:	przyznane, opublikowane:	0	14	14
	udzielone – w druku:	0	4	4
Zgłoszenia	krajowe	4 (0*)	10	10
patentowe:	międzynarodowe	0	2	2
Podsumowanie:		13 (9*)	109	117

* - wartość pomniejszona z uwagi na przekształcenie zgłoszeń patentowych sprzed 2002 roku na patenty RP

Tab. 6.2. Informacje o publikacjach filadelfijskich zawartych w bazie *Journal Citation Reports* (JCR) z okresu po uzyskaniu stopnia dra

Czasopismo (alfabetycznie)	Impact Factor (IF)	Punktacja MNiSW	Liczba prac i rok publikacji		Pozycja z Zał. 4
Applied Physics A: Materials Science and Processing	1,694	30	1	2013	[A7]
Applied Physics B: Lasers and Optics	2,189	32	2	2x 2011	[B5, B7]
Applied Surface Science	2,538*	30*	5	3x 2014	[A1, A5, B1]
	2,538	30		2x 2013	[A8, A12]
Archives of Civil and Mechanical Engineering	1,331*	20*	1	2014	[A6]
Bulletin of the Polish Academy of Sciences	0,945	20	1	2010	[B9]
Chemometrics and Intelligent Laboratory System	2,381*	35*	1	2014	[B2]
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1,779	30	2	1x 2013	[A10]
	1,779*	30*		1x 2014	[A13]
Measurement Science and Technology	1,494	32	1	2011	[B4]
Optica Applicata	0,308	-	1	2004	[B11]
Optics Express	3,753	32	1	2011	[B6]
Opto-Electronics Review	1,279	20	5	3x 2013	[A9, A11, B3]
	1,027	27		2x 2010	[B8, B10]
Polymer Degradation and Stability	2,633*	35*	2	2x 2014	[A2, A3]
Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy	3,150*	35*	1	2014	[A4]
Podsumowanie:	46,839	662 pkt.	24	-	-

* - przyjęto dane (IF oraz punktację MNiSW) za rok 2013, z uwagi na brak informacji z roku 2014

Tab. 6.3. Informacje o publikacjach filadelfijskich spoza bazy (JCR) z okresu po uzyskaniu stopnia dra

Czasopismo (alfabetycznie)	Punktacja MNiSW	Liczba prac i rok publikacji		Pozycja z Zał. 4
Bulletin of the Polish Academy of Sciences	9	1	2008	[B12]
Podsumowanie:	9 pkt.	1	-	-

* - przyjęto dane (IF, pkt. MNiSW) za rok 2013, z uwagi na brak informacji z roku 2014

Tab. 6.4. Informacje o artykułach spoza listy filadelfijskiej z okresu po uzyskaniu stopnia dra

Czasopismo (alfabetycznie)	Punktacja MNiSW	Liczba prac i rok publikacji		Pozycja z Zał. 4
Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania	6	1	2008	[B16]
Photonics Letters of Poland	10*	1	2014	[B13]
Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne	6	2	2x 2010	[B14, B15]
Podsumowanie:	22 pkt.	4	-	-

* - przyjęto punktacje MNiSW za rok 2013, z uwagi na brak danych za rok 2014

Tab. 6.5. Informacje o przyznanych patentach RP z okresu po uzyskaniu stopnia dra

Lp.	Nr patentu	Tytuł	Data publikacji	Pozycja z Zał. 4
1	PL218123B1	Sposób przecinania kompozytów warstwowych	31.10.2014	[P1]
2	PL218013B1	Głowica czujnika światłowodowego	30.09.2014	[P2]
3	PL217528B1	Układ do generacji promieniowania optycznego w średniej podczerwieni	31.07.2014	[P3]
4	PL217542B1	Układ do generacji promieniowania optycznego w średniej podczerwieni	31.07.2014	[P4]
5	PL214235B1	Sposób generacji promieniowania laserowego o dwóch częstotliwościach i ortogonalnych polaryzacjach i układ lasera dwuczęstotliwościowego o ortogonalnych polaryzacjach	31.07.2013	[P5]
6	PL213947B1	Sposób stabilizacji częstotliwości promieniowania laserowego i układ stabilizacji częstotliwości promieniowania laserowego	31.05.2013	[P6]
7	PL213946B1	Sposób stabilizacji częstotliwości promieniowania laserowego i układ stabilizacji częstotliwości promieniowania laserowego	31.05.2013	[P7]
8	PL204147B1	Sposób pomiaru wielkości fizycznych i czujnik foniczny do pomiaru wielkości fizycznych	31.12.2009	[P8]
9	PL200608B1	Układ czujnika fonicznego	30.01.2009	[P9]
10	PL200607B1	Układ czujnika fonicznego	30.01.2009	[P10]
11	PL192569B1	Miernik do pomiaru wielkości fizycznych	31.11.2006	[P11]
12	PL185501B1	Sposób modulacji wiązki światła oraz układ do modulacji wiązki światła	30.05.2003	[P12]
13	PL186201B1	Foniczny miernik pola elektromagnetycznego	28.11.2003	[P13]
14	PL186200B1	Sposób pomiaru pola elektromagnetycznego	28.11.2003	[P14]
15	P.393799*	Układ detekcji sygnału optycznego, zwłaszcza dla wibrometru laserowo-światłowodowego	31.01.2011*	[P15]
16	P.393800*	Urządzenie do pomiaru drgań i przemieszczeń obiektów	31.01.2011*	[P16]
17	P.394327*	Sposób pomiaru drgań i przemieszczeń obiektów oraz urządzenie do pomiaru drgań i przemieszczeń obiektów	24.03.2011*	[P17]
18	P.399372*	Sposób wytwarzania przestrzennych struktur metamateriałowych	30.05.2012*	[P18]

* - pozycje 15÷18 figurują aktualnie w bazie UPRP pod numerami zgłoszeń. Szczegóły dotyczące tych pozycji znajdują się w załączniku nr 4.

Całkowita ilość punktów MNiSW za dorobek naukowy z okresu po uzyskaniu stopnia dra: 1 203 punktów w tym:

- 671 punktów – publikacje z listy filadelfijskiej w tym 662 pkt. z JCR oraz 9 pkt. spoza bazy JCR
- 22 punktów – artykuły spoza listy filadelfijskiej
- 260 punktów – punktowane publikacje naukowe znajdujące się w bazie *Web of Science* (WoS)
- 250 punktów – przyznane patenty RP* (do punktacji wliczono jedynie 10 ostatnich patentów)

* - punkty wg rozporządzenia MNiSW z dnia 13.07.2012 r. oraz rozporządzenia MNiSW z dnia 17.10.2007 r.

Sumaryczny impact factor według listy JCR, zgodnie z rokiem opublikowania: $\Sigma \text{IF} = 46,839$

Tab. 6.6. Liczba cytowań moich prac oraz indeks Hirscha (h-index)

Baza danych	Stan na dzień	Liczba prac w bazie	Liczba cytowań	h-index
<i>Scopus</i> bez autocytowań		59	45	3
<i>Web of Science</i> bez autocytowań	29 grudnia 2014 roku	63	51	3
Zestawienie własne bez autocytowań *		-	60*	4*

* - z uwagi na dużą liczbę prac publikowanych w latach 2013-2014, dla których dane widniejące w bazie *Web of Science* nie są w pełni aktualne przeprowadziłem własne podsumowanie cytowań (z pominięciem autocytowań), których wykaz zamieściłem w załączniku nr 8. Każdorazowo weryfikowałem poprawność cytowania. Zamieściłem również odnośniki elektroniczne do poszczególnych prac cytujących.

Wrocław, dnia: 29 grudnia 2014 roku

Arkadiusz Antoniczek