

Dr inż. Bartłomiej Salski
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Instytut Radioelektroniki
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

AUTOREFERAT

1. Wykształcenie i posiadane stopnie zawodowe:

- 2010 doktor nauk technicznych, dyscyplina: elektronika, praca pt. „Application of semi-analytical algorithms in the finite-difference time-domain modelling of electromagnetic radiation and scattering problems”, promotor: prof. dr hab. Wojciech Gwarek, Politechnika Warszawska
- 2006 magister inżynier, specjalność: telekomunikacja, praca pt. „Podział mocy pomiędzy apertury zasilające kuchenką mikrofalową i jego wpływ na rozkład grzania mikrofalowego”, Politechnika Warszawska
- 2006-2010 Studia doktoranckie na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej
- 2000-2006 Studia magisterskie na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej
- 1995-2000 Zespół Szkół Elektrycznych w Opolu, Technikum Elektryczne

2. Zatrudnienie:

- 2011-dzisiaj Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Instytut Radioelektroniki, adiunkt
- 2005-2012 QWED Sp. z o.o., Warszawa, kierownik projektu / inżynier projektant

3. Wskazane osiągnięcia wynikające z ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm., 14.03.2003)

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany

„Modelowanie elektromagnetyczne i charakteryzacja własności dyspersyjnych materiałów oraz struktur”

b) publikacje wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR (10):

- [1]. R. Kowerdziej, J. Parka, P. Nyga, **B. Salski**, "Simulation of a tunable metamaterial with nematic liquid crystal layers", *Liquid Crystals*, vol. 38, no. 3, March 2011, **IF: 1.9, wkład: 10%, MNiSW: 27.**
- [2]. R. Kowerdziej, M. Olifierczuk, **B. Salski**, J. Parka, "Tunable negative index metamaterial employing in-plane switching mode at terahertz frequencies", *Liquid Crystals*, vol. 39, no. 7, May 2012, **IF: 2.0, wkład: 10%, MNiSW: 25.**
- [3]. **B. Salski**, M. Celuch, "On the Equivalence Between the Maxwell Garnett Mixing Rule and the Debye Relaxation Formula," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 8, pp. 2352-2358, 2012, **IF: 2.2, wkład: 90%, MNiSW: 35.**
- [4]. K. S. Kulpa, P. Samczynski, M. Malanowski, A. Gromek, D. Gromek, W. Gwarek, **B. Salski**, and G. Tanski, "An Advanced SAR Simulator of Three-Dimensional Structures Combining Geometrical Optics and Full-Wave Electromagnetic Methods," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 1, pp. 776-784, 2014, **IF: 3.6, wkład: 10%, MNiSW: 40.**
- [5]. **B. Salski**, W. Gwarek, P. Korpas, "Electromagnetic inspection of carbon-fiber-reinforced polymer composites with coupled spiral inductors," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, accepted for publication, 2014, **IF: 2.3, wkład: 80%, MNiSW: 35.**
- [6]. **B. Salski**, "An FDTD model of a Thin Dispersive Layer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, **IF: 2.3, wkład: 100%, MNiSW: 35.**
- [7]. **B. Salski**, "An FDTD Model of Graphene Intraband Conductivity," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, **IF: 2.3, wkład: 100%, MNiSW: 35.**
- [8]. M. Swat, **B. Salski**, T. Karpisz, G. Stepniewski, I. Kujawa, M. Klimczak, R. Buczynski, "Numerical analysis of a highly birefringent microstructured optical fiber with an anisotropic core," *Optical and Quantum Electronics*, 2014, **IF: 1.1, wkład: 30%, MNiSW: 20.**
- [9]. T. Karpisz, **B. Salski**, A. Szumska, M. Klimczak, R. Buczynski, "FDTD analysis of modal dispersive properties of nonlinear photonic crystal fibers," *Optical and Quantum Electronics*, 2014, **IF: 1.1, wkład: 30%, MNiSW: 20.**
- [10]. **B. Salski**, J. Krupka, and P. Kopyt, "Measurements of the sheet resistance of GaN films on a dielectric substrate," *The European Physical Journal Plus*, 2014, **IF: 1.5, wkład: 80%, MNiSW: 25.**

Publikacje w czasopismach recenzowanych po uzyskaniu stopnia doktora (3):

- [11]. **B. Salski**, "The extension of the Maxwell Garnett mixing rule for dielectric composites with nonuniform orientation of ellipsoidal inclusions," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 30, pp. 173-184, 2012, **wkład: 100%.**

- [12]. **B. Salski**, "The Unfolding of Bandgap Diagrams of Hexagonal Photonic Crystals Computed with FDTD," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 27, pp. 27-39, 2012, **wkład: 100%**.
- [13]. M. Olszewska, B. Salski, W. Gwarek, "Szerokopasmowe panele absorbujące z niejednorodną warstwą rezystywną," *Przegląd Telekomunikacyjny*, nr 6, pp. 361 – 364, 2013, **wkład: 20%**.

Książki (1):

- [14]. **B. Salski**, K. Lesniewska-Matys, P. Szczepanski, "On the applicability of photonic crystal membranes to multi-channel propagation", chapter in *Photonic Crystals - Innovative Systems, Lasers and Waveguides*, ISBN: 978-953-51-0416-2, April 2012, **wkład: 50%**.

Publikacje recenzowane (konferencje zagraniczne) po uzyskaniu stopnia doktora (22):

- [15]. **B. Salski**, M. Celuch, "Multipole dispersive media models in a circuit representation and their implementation in FDTD schemes", *6th International Conference on Microwave Materials and their Applications: MMA 2010*, Warsaw, September 2010, **wkład: 80%**.
- [16]. **B. Salski**, M. Celuch, "Optimisation of carbon-reinforced absorbing composites for X and Ku bands", *40th European Microwave Conference 2010*, Paris, September 2010, **wkład: 80%**.
- [17]. R. Kowerdziej, J. Parka, P. Nyga, **B. Salski**, "Designing tunable left handed metamaterials with nematic liquid crystal layers", *4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*, Karlsruhe, September 2010, **wkład: 10%**.
- [18]. **B. Salski**, M. Celuch, "Electromagnetic Modeling of Inhomogeneous Composites with Conductive Inclusions", *13th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering and Applications*, Thun, Switzerland, March 2011, **wkład: 80%**.
- [19]. **B. Salski**, W. Gwarek, M. Celuch, "Semi-analytical FDTD modeling of axisymmetrical and periodic structures," *21st International Conference Radioelektronika 2011*, Brno, April 2011, **wkład: 50%**.
- [20]. **B. Salski**, M. Celuch, "The Debye Rigorous Equivalent of the Maxwell-Garnett Mixing Rule for Effective Modeling of Carbon Suspensions under MW Irradiation," 2011 IEEE MTT-S International Symposium, Baltimore, June 2011, pp. 1-4, **wkład: 90%**.
- [21]. K. Leśniewska-Matys, **B. Salski**, P. Szczepański, "A Novel Phased Array Planar Laser Based on the Membrane 2D Photonic Crystals", *Frontiers in Optics*, 16-20 October 2011, San Jose, USA, **wkład: 30%**.
- [22]. **B. Salski**, M. Olszewska, W. Gwarek, "Planar double-negative metamaterial filters tunable by liquid crystals," *19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2012*, Warsaw, May 2012, **wkład: 40%**.
- [23]. A. Mossakowska-Wyszyńska, K. Leśniewska-Matys, **B. Salski**, "Dynamic operation of 2D PC phased array membrane laser," *II Symposium of the PSP during OPTON 2012*, Katowice, Poland, 15-16th May 2012, **wkład: 25%**.
- [24]. P. Korpas, W. Wojtasiak, J. Krupka, L. Usydus, M. Celuch, **B. Salski**, "Inexpensive Microwave Q-Meter for Precise Dielectric Measurements with Split-post Dielectric Resonators," *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Moscow, Aug. 2012, **wkład: 5%**.
- [25]. M. Olszewska, W. Gwarek, M. Celuch, **B. Salski**, "A Wide-band Microwave Absorber Based on a Cellular Slab," *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Moscow, Aug. 2012, **wkład: 10%**.

- [26]. I. Kujawa, D. Pysz, J. Pniewski, T. Karpisz, R. Kasztelaniec, R. Stepien, **B. Salski**, R. Buczynski, "Highly birefringent fiber with anisotropic artificial material," *XIV Konferencja Światłowodowy i Ich Zastosowania*, Lublin, 2012, **wkład: 30%**.
- [27]. T. Karpisz, **B. Salski**, A. Szumska, M. Klimczak, R. Buczynski, "FDTD analysis of modal dispersive properties in nonlinear photonic crystal fibers," *Information Photonics 2013 Conference*, Warsaw, 2012, **wkład: 30%**.
- [28]. M. Swat, **B. Salski**, T. Karpisz, G. Stepniowski, I. Kujawa, M. Klimczak, R. Buczynski, "Numerical analysis of highly birefringent microstructured fiber with anisotropic core," *Information Photonics 2013 Conference*, Warsaw, 2012, **wkład: 30%**.
- [29]. M. Olszewska, **B. Salski**, W. Gwarek, "Szerokopasmowe panele absorbujące z niejednorodną warstwą rezystywną," *KKRRiT*, Wrocław, 2013, **wkład: 20%**.
- [30]. M. Olszewska, **B. Salski**, W. Gwarek, P. Bajurko, Y. Yashchyshyn, M. Jakubowska, D. Janczak, "A Broadband Metamaterial Absorbing Panel with a Resistive Pattern Made of Ink with Graphene Nanoplatelets," *Proc. European Microwave Week* (Nuremberg, Germany Oct. 6-11, 2013), pp. 1039-1042, **wkład: 30%**.
- [31]. **B. Salski**, W. Gwarek, J. Krupka, P. Korpas, A.Y.B. Chong, V. Kappatos, C. Selcuk, T.H. Gan, P. Theodorakeas, V. Dritsa, M. Kouli, H. Tekin, C. Sapmaz, "Radio Frequency Sensing for Non-Destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Composite Materials for Structural Health Monitoring," *7th International Workshop NDT in Progress*, Dresden, Nov. 7-8, 2013, **wkład: 30%**.
- [32]. **B. Salski**, W. Gwarek, P. Korpas, "Non-destructive testing of carbon-fiber-reinforced polymer composites with coupled spiral inductors," *2014 IEEE MTT-S International Symposium*, Tampa, June 2014, **wkład: 80%**.
- [33]. M. Olszewska-Placha, **B. Salski**, and W. Gwarek, "Angular and spectral characteristics of a wideband microwave absorber," *20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2014*, Gdansk, June 2014, **wkład: 30%**.
- [34]. P. Korpas, **B. Salski**, and S. Reszewicz, "Multichannel measurement system for non-destructive testing of carbon-fiber-reinforced polymer composites," *20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2014*, Gdansk, June 2014, **wkład: 40%**.
- [35]. **B. Salski**, M. Krysicki, M. Bryla, D. Janczak, and M. Jakubowska, "Electromagnetic characterization of composites with conductive inclusions," *20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2014*, Gdansk, June 2014, **wkład: 50%**.
- [36]. M. Olszewska-Placha, **B. Salski**, W. Gwarek, D. Janczak, M. Jakubowska, "Wideband and thin microwave absorber with inhomogeneous resistive sheet made of ink with graphene nanoplatelets," *8th International Conference on Microwave Materials and their Applications: MMA 2014*, Boise, US-OH, June 2014, **wkład: 20%**.

c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. finite-difference time-domain, FDTD) służy do pełnofalowego rozwiązywania numerycznego wirowych równań Maxwella. Dzięki swej prostocie implementacji oraz interpretacji fizycznej, jak również dużej elastyczności, metoda FDTD stała się jednym z najpopularniejszych narzędzi analizy

elektromagnetycznej. Rozwój tej i innych metod implikuje jednak potrzebę poprawnego odwzorowania własności elektromagnetycznych materiałów stosowanych we współczesnej elektronice i optyce. Najprostszy przypadek jednorodnych materiałów niedispersyjnych, charakteryzowanych stałymi przenikalności elektrycznej oraz magnetycznej, został rozwiązany już w 1966 roku przez autora metody FDTD [37]. Problem pojawia się jednak, gdy mamy do czynienia z materiałami o bardziej złożonej charakterystyce, jak choćby materiały dyspersyjne, które wymagają odwzorowania charakterystyki dyspersyjnej przenikalności elektrycznej i/lub magnetycznej przy pomocy równań różniczkowych w dziedzinie czasu. Pojawia się również potrzeba szerokopasmowej charakteryzacji stosowanych materiałów, aby móc poprawnie i dokładnie przeprowadzić proces analizy/syntezy rozważanego układu/struktury.

Głównym celem naukowym jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta było opracowanie nowych rozwiązań w metodzie FDTD umożliwiających poprawną reprezentację materiałów i struktur o złożonej charakterystyce spektralnej oraz geometrycznej, jak również opracowanie metod charakteryzacji eksperymentalnej wybranych materiałów. Można wyróżnić trzy podstawowe zagadnienia wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta:

- a) modele FDTD materiałów dyspersyjnych (grafen, cienkie warstwy dyspersyjne o grubości znacznie mniejszej niż rozmiar oczka FDTD),
- b) własności dyspersyjne materiałów strukturalnych (materiały kompozytowe domieszkowane włóknami węglowymi, czy nanopłatkami grafenu, kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami węglowymi, kryształy fotoniczne),
- c) charakteryzacja wybranych materiałów (metoda indukcyjna do charakteryzacji/defektoskopii kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi, metoda rezonansowa do analizy rezystywności cienkich warstw polimerowych domieszkowanych nanopłatkami grafenu, metoda pojemnościowa do analizy szerokopasmowej warstw półprzewodnikowych).

Wszystkie zagadnienia wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji są wynikiem działalności badawczej realizowanej przez habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora w 2010 roku w ramach szeregu projektów krajowych oraz międzynarodowych, takich jak:

1. "Nano-conductive polymer composites with predefined architecture and customised dielectric and EMC properties dedicated to shielding and absorbent panels for special buildings", MNT ERA-NET, 2009-2012, QWED Sp. z o. o.
2. "Tunable liquid crystals converters for THz and GHz applications", NCBiR, 2010-2012, Politechnika Warszawska
3. "Radio Frequency Sensing for Non-Destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Composite Materials for Structural Health Monitoring", FP7 REA, 2012-2014, Politechnika Warszawska
4. "Graphene pastes and inks for printing conductive paths and layers for document protection", GRAF-TECH NCBiR, 2013-2015, Politechnika Warszawska.

Część wyników badań została skomercjalizowana lub jest aktualnie przedmiotem wdrożenia w postaci nowych funkcjonalności narzędzia do symulacji elektromagnetycznych QuickWave (np. wielobiegunowy model dyspersyjny, cienkie warstwy dyspersyjne, model grafenu), a część dotycząca charakteryzacji/defektoskopii kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi (ang. carbon-fibre-reinforced polymer, CFRP) będzie przedmiotem komercjalizacji przez partnerów SME w jednym z projektów badawczych, którego habilitant jest kierownikiem w ramach Politechniki Warszawskiej. Część wyników projektu zostało zgłoszonych w dniu 18.07.2013 jako zastrzeżenie patentowe do Urzędu Patentowego RP o numerze P.404769 „Czujnik elektromagnetyczny do badania stanu strukturalnego materiałów przewodzących”, a w dniu 17.02.2014 otrzymało pozytywne sprawozdanie ze stanu techniki, co otwiera drogę do przyznania patentu w terminie przewidzianym przez krajowe regulacje prawne. W przypadku badań dotyczących zastosowania kompozytów polimerowych domieszkowanych nanopłatkami grafenu do produkcji płaskich szerokopasmowych pochłaniaczy fali elektromagnetycznej, wyniki prac zostały zgłoszone jako zastrzeżenie patentowe o numerze P.405420 „Panel pochłaniający promieniowanie elektromagnetyczne” w dniu 20.09.2013, ale z uwagi na fakt, że wynalazek może mieć znaczenie dla obronności i bezpieczeństwa Państwa, opóźniło to jego analizę w normalnym trybie.

Poniżej przedstawiono wyniki prac wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta.

Modele FDTD materiałów dyspersyjnych

(grafen, cienkie warstwy dyspersyjne o grubości znacznie mniejszej niż rozmiar oczka FDTD)

W pracy [6] habilitant zajął się modelowaniem FDTD cienkich warstw dyspersyjnych i zaproponował nowe rozwiązanie oczka FDTD zawierającego warstwę materiału dyspersyjnego o grubości mniejszej niż rozmiar oczka, $d < a$. Wykazano, że zastosowanie obwodowego modelu zastępczego oczka FDTD umożliwia zastąpienie oczka niejednorodnego oczkiem jednorodnym o parametrach zastępczych. Zaproponowane przekształcenie jest jednoznaczne w przypadku jednobiegunowych modeli dyspersyjnych (elektrycznie bądź magnetycznie), a w przypadku modeli wielobiegunowych prowadzi do rozwiązania przybliżonego o bardzo dobrej dokładności pod warunkiem, że poszczególne bieguny są odległe od siebie w dziedzinie częstotliwości. Przykładowo, sytuacja taka ma często miejsce w przypadku własności spektralnych szkieł stosowanych do produkcji mikrostrukturanych włókien światłowodowych o kontrolowanej charakterystyce dyspersyjnej [9],[26]-[28], które są przedmiotem dalszej części jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta.

Pierwszą zaletą zaproponowanego rozwiązania jest jego jednoznaczność, w przeciwieństwie do wcześniej znanych technik, takich jak uśrednianie objętościowe (ang. volume averaging), czy uśrednianie harmoniczne (ang. harmonic averaging). Drugą zaletą jest brak dodatkowych nakładów obliczeniowych potrzebnych do rozwiązania ujednorodnionego oczka FDTD, w porównaniu do przypadku oczka jednorodnie wypełnionego analizowanym materiałem dyspersyjnym ($d \geq a$). Zaproponowane rozwiązanie może mieć zastosowanie do reprezentacji cienkich warstw przewodzących wykonanych z materiałów kompozytowych, takich jak pasty polimerowe domieszkowane nanopłatkami grafenu, czy cienkich warstw półprzewodnikowych, jak również może być przydatne do rozwiązania oczek FDTD wypełnionych kilkoma różnymi materiałami dyspersyjnymi. Wymienione przykłady są przedmiotem dalszej części jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta.

Szczególnie interesującym w kontekście cienkich warst przewodzących jest jednorodna warstwa grafenu, która może być reprezentowana w zakresie do kilku teraherców, gdzie dominują przejścia wewnątrzpasmowe, modelem dyspersyjnym Drude'a. Habilitant wykazał w [6], że ujednorodnienie oczka FDTD zawierającego taką cienką warstwę powoduje, że składowa normalna pola elektrycznego efektywnie zachowuje się jak model oscylacyjny Lorentza w wyniku pojemności oczka FDTD otaczającego grafen i dołączonej szeregowo do indukcyjnego modelu Drude'a. W kolejnej pracy, habilitant zajął się odwzorowaniem własności jednorodnej warstwy grafenu podmagnesowanej stałym

polem magnetycznym [7], która wykazuje własności żyotropowe. Habilitant wykazał, że przewodność powierzchniową można w takim przypadku przedstawić w postaci zmodyfikowanego modelu Drude'a [7]. Habilitant opracował model FDTD tak zdefiniowanego grafenu oraz wykazał, że wbrew szeregu opracowaniom naukowym, grafen nie wymaga zmniejszenia rozmiarów oczka FDTD, ani zastosowania specjalnych technik korekcji [7]. Uzasadnienie postulatu wymagało, tak jak w poprzednich pracach habilitanta, zastosowania obwodowego modelu zastępczego oczka FDTD.

Własności dyspersyjne materiałów strukturalnych

(mieszanki domieszkowane włóknami węglowymi, czy nanopłatkami grafenu, kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami węglowymi, kryształy fotoniczne)

Drugim zagadnieniem wchodzącym w skład jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta jest analiza i modelowanie własności dyspersyjnych materiałów strukturalnych różnej postaci. W pierwszej kolejności, badania dotyczyły kompozytów polimerowych domieszkowanych materiałami przewodzącymi w postaci proszków, włókien węglowych, czy nanopłatków grafenowych. Mają one coraz szersze zastosowanie w elektronice drukowanej, ale mogą być również użyte do produkcji płaskich szerokopasmowych paneli pochłaniających falę elektromagnetyczną, których współautorem jest habilitant [13],[25],[29],[30],[33],[36].

Jednym z problemów w kontekście tego typu mieszanin jest odpowiednia reprezentacja makroskopowych parametrów elektromagnetycznych, które są wypadkową własności materiałów wchodzących w skład mieszaniny. W przypadku rzadkich mieszanin, t.j. poniżej progu perkolacji, z powodzeniem można stosować analityczny model Maxwella-Garnetta, który dla zadanego kształtu domieszki oraz jej zawartości objętościowej prowadzi do zespolonej przenikalności elektrycznej w szerokim widmie częstotliwości. Niestety, model ten nie posiadał do niedawna swej reprezentacji numerycznej w metodzie FDTD, co oznaczało potrzebę aproksymacyjnego wyznaczenia jego odwzorowania w postaci jedno- lub wielobiegunowego modelu Debye'a [16],[18]. W pracy habilitanta [3],[20] wykazano po raz pierwszy, że istnieje jednoznaczne przekształcenie modelu Maxwella-Garnetta do modelu Debye'a (i odwrotnie). Jest to o tyle istotne, że do tej pory nie było możliwości bezpośredniego modelowania rzadkich mieszanin metodą FDTD i trzeba było posilkwować się podejściem przybliżonym, jak to pokazano we wcześniejszej pracy habilitanta [16].

Wyniki opublikowane w [3] umożliwiają zatem bezpośrednie optymalizowanie składu mieszaniny w ramach symulacji FDTD.

Habilitant wykazał w [3], że w przypadku domieszki w postaci proszków do odwzorowania własności mieszaniny wystarczy jednobiegunowy model Debye'a. Jeśli natomiast domieszka wykonana jest z długich włókien lub cienkich kwadratowych płatków wystarczy dwa bieguny modelu Debye'a. Wszelkie dodatkowe modyfikacje, jak wielofazowość mieszaniny, czy bardziej złożony kształt domieszki, powodują zwiększenie liczby biegunów potrzebnych do dokładnej reprezentacji modelu Maxwella-Garnetta w metodzie FDTD, co zostało szczegółowo opisane w [3]. W kolejnej publikacji habilitanta [11] wykazane zostało, że model Maxwella-Garnetta można zastosować do mieszanin o dowolnym rozkładzie orientacji domieszek. Przykładem mogą być cienkie warstwy z past kompozytowych, w których domieszki z włókien węglowych układają się tylko w płaszczyźnie warstwy. Habilitant wykazał, że w tym szczególnym dwuwymiarowym przypadku wystarczy przeskalować oryginalny model Maxwella-Garnetta stosując współczynnik 1.5 [11], podczas gdy stosowane dotychczas w literaturze parametry były dobierane doświadczalnie i prowadziły do błędów [11].

W przypadku gęstych mieszanin modele analityczne zawodzą i najczęściej stosuje się wtedy charakterystykę eksperymentalną. Habilitant wskazał jednak w swej pracy [35] na możliwość zastosowania metody FDTD do estymacji własności elektromagnetycznych mieszanin o dowolnym poziomie domieszkowania. W tym celu przygotowuje się prostopadłościenny model FDTD mieszaniny, który umieszcza się w linii płasko-równoległej w celu pomiaru macierzy rozproszenia [S]. Następnie, na podstawie znanych z literatury algorytmów [38] można wyznaczyć efektywny zespolony współczynnik załamania modelowanej próbki mieszaniny. Habilitant wykazał, że proponowane podejście jest zbieżne z wynikami eksperymentalnymi zmierzonymi dla tuszy domieszkowanych nanopłatkami grafenu [35]. Zaletą modelowania elektromagnetycznego jest jednak znacznie zmniejszenie kosztów procesu syntezy kompozytów o wymaganych parametrach, zmniejszając do niezbędnego minimum część eksperymentalną.

Podobne podejście zostało zastosowane przez habilitanta dla domieszki wykonanej z włókien węglowych, a celem było oszacowanie efektywnej przewodności elektrycznej w poprzek wiązki włókien w kompozytach CFRP [35]. Miało to istotne znaczenie w oszacowaniu efektywnej przewodności pełnego kompozytu CFRP i porównanie z wynikami

charakteryzacji eksperymentalnej wykonanej w ramach prac badawczych wchodzących w skład trzeciego z podstawowych zagadnień wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta. Należy podkreślić, że w przeciwieństwie do uprzednio wymienionych tuszy domieszkowanych nanopłatkami grafenu, eksperymentalne oszacowanie efektywnej przewodności elektrycznej w poprzek wiązki włókien w kompozytach CFRP byłoby trudne oraz niepraktyczne. Wynika to z faktu, że kompozyty CFRP mają strukturę tkaniny w której poszczególne wiązki włókien przeplatane są między sobą w różnych kierunkach, a większość metod stosowanych do pomiaru rezystancji powierzchniowej (na kwadrat) mierzy wielkość skalarną uśrednioną na obszarze pomiarowym. Należy również nadmienić, że w ramach wspomnianych prac habilitant opracował model FDTD rezystywnych drutów w celu odwzorowania włókien węglowych na siatce obliczeniowej. Model ten poddany został wdrożeniu oraz komercjalizacji w symulatorze elektromagnetycznym QuickWave.

Opracowane metody ekstrakcji makroskopowych parametrów elektromagnetycznych materiałów o niejednorodnym składzie/strukturze habilitant stosował również do analizy własności dyspersyjnych przestrajanych ciekłokrystalicznie metamateriałów [1],[2],[17],[22].

Habilitant zajmował się również kształtowaniem charakterystyk dyspersyjnych rodzajów prowadzonych w falowodach optycznych przy pomocy kryształów fotonicznych. W rozdziale książki *Photonic Crystals - Innovative Systems, Lasers and Waveguides* [14] habilitant pokazał, że poprzez odpowiedni dobór stałej sieci krystalicznej oraz średnicy otworów można uzyskać jednomodową propagację supermodu w membranie półprzewodnikowej z wieloma kanałami defektowymi. Tak uzyskany supermod pozwala na zwiększenie zysku kierunkowego wiązki generowanego lasera [14],[21],[23]. W dalszych pracach habilitant zajmował się zastosowaniem kryształów fotonicznych do kształtowania dyspersji modowej w światłowodach mikrostrukturalnych [39],[9],[26]-[28]. Dzięki uzyskaniu spłaszczonej dyspersji modowej w zakresie częstotliwości pracy pompy laserowej, pracującej w zakresie dyspersji anomalnej, możliwe jest uzyskanie w materiałach centrosymetrycznych takich efektów nieliniowych trzeciego rzędu, jak propagacja solitonowa, czy mieszanie czterofalowe. Wszystkie te efekty mogą zaś prowadzić do generacji supercontinuum, czyli szerokopasmowego widma promieniowania. W pracach [8],[9],[26],[27] habilitant wykazał, że opracowane wcześniej przez habilitanta wielobiegunowe modele dyspersyjne [15], w tym również niejednorodnych oczek FDTD [6], mogą mieć zastosowanie do wyznaczenia wykresów dyspersyjnych światłowodów mikrostrukturalnych.

W innej pracy [12], habilitant zajął się analizą diagramów dyspersyjnych kryształów fotonicznych o siatce heksagonalnej. W poprzednich pracach wskazywano na niejednoznaczność rozwiązania z uwagi na kartezjańskie periodyczne warunki brzegowe stosowane typowo w metodzie FDTD, które nie umożliwiają jednoznacznie narzucić dowolnej wartości wektora falowego w pierwszej nieredukowalnej strefie Brillouina. Habilitant wykazał, że zastosowanie relatywnie prostego algorytmu obróbki wyników analizy FDTD pozwala wygenerować jednoznaczny diagram dyspersyjny kryształu fotonicznego o siatce heksagonalnej bez żadnej ingerencji w metodę FDTD.

Charakteryzacja wybranych materiałów

(metoda indukcyjna do charakteryzacji/defektoskopii kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami węglowymi, metoda rezonansowa do analizy rezystywności cienkich warstw polimerowych domieszkowanych nanopłatkami grafenu, metoda pojemnościowa do analizy szerokopasmowej warstw półprzewodnikowych)

Habilitant zajmował się również charakteryzacją/defektoskopią materiałów. W pracy [5], habilitant przedstawił nową metodę analizy stanu strukturalnego kompozytów wzmacnianych włóknami węglowymi (CFRP), coraz szerzej stosowanych do budowy lekkich konstrukcji, takich jak poszycie samolotu. Zaproponowana metoda opiera się na pomiarze sprzężenia pomiędzy dwoma cewkami planarnymi wykonanymi na podłożu dielektrycznym, których sprzężenie zależy od struktury badanego kompozytu CFRP znajdującego się w pobliżu czujnika. Habilitant wykazał w [5], że opracowana technika pozwala na wykrycie wielu rodzajów defektów, takich jak delaminacja, wewnętrzne pęknięcia, czy szczeliny powietrzne. Habilitant wykazał również, że dzięki zależności głębokości wnikania od częstotliwości możliwe jest oszacowanie głębokości występowania defektu.

Pierwszą zaletą zaproponowanej metody jest relatywnie niski koszt produkcji czujników, który sprowadza się głównie do kosztu laminatu (np. FR4). Drugą zaletą jest możliwość zastosowania macierzy czujników i dzięki temu istotnego zwiększenia szybkości inspekcji dużych powierzchni, takich jak poszycie samolotu. W tym kontekście kluczowa jest powtarzalność wykonania elementów macierzy, która w zaproponowanej technologii jest bardzo duża. Dla porównania, powtarzalność wykonania klasycznych cewek indukcyjnych stosowanych w metodzie prądów wirowych może skutkować rozbieżnością pomiaru na poziomie nawet 20%, co często utrudnia lub wręcz uniemożliwia praktyczne zastosowanie takich czujników w macierzy pomiarowej. Trzecią bardzo istotną zaletą rozwiązania zaproponowanego przez habilitanta w [5] jest możliwość inspekcji zakrzywionych

powierzchni, jeśli macierz czujników wykonana jest na elastycznym podłożu, takim jak PTFE. Czwartą zaletą jest anizotropia pomiaru, dzięki czemu wynik pomiaru w pojedynczym punkcie badanego kompozytu daje informację nie tylko o występowaniu defektu, jego charakterze i głębokości, ale również o kierunku ewentualnego zaburzenia/defektu [5].

Opracowany czujnik indukcyjny został zgłoszony w dniu 18.07.2013 jako zastrzeżenie patentowe do Urzędu Patentowego RP o numerze P.404769 „Czujnik elektromagnetyczny do badania stanu strukturalnego materiałów przewodzących”, a w dniu 17.02.2014 otrzymał pozytywne sprawozdanie ze stanu techniki, co otwiera drogę do przyznania patentu w terminie przewidzianym przez krajowe regulacje prawne. W pełni funkcjonalny prototyp urządzenia do defektoskopii płaskich paneli kompozytowych liniowym zestawem czujników został wykonany według koncepcji i pod kierownictwem habilitanta na Politechnice Warszawskiej w ramach projektu “Radio Frequency Sensing for Non-Destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Composite Materials for Structural Health Monitoring”, FP7 REA. Obecnie koncepcja ta jest rozwijana przez partnerów w projekcie, a w szczególności: Brunel Innovation Centre (Cambridge, UK) oraz National Technical University of Athens (Greece). W ramach tych prac dostosowuje się ją do badania większych, zakrzywionych powierzchni. Urządzenie to może znaleźć zastosowanie w przemyśle produkującym kompozyty wielowarstwowe oraz w defektoskopii już wykorzystywanych warstw kompozytowych (na przykład w eksploatowanych już samolotach).

W innej części swej działalności, habilitant zajmował się charakteryzacją kompozytów polimerowych domieszkowanych nanopłatkami grafenu (ang. graphene nanoplatelets) stosowanych jako pasty rezystywne do produkcji płaskich elastycznych szerokopasmowych paneli pochłaniających falę elektromagnetyczną [30], będących tematem oddzielnej rozprawy doktorskiej [40]. Do pomiarów stosowany były rezonatory dielektryczne typu single-post oraz typu split-post, opracowane przez prof. Jerzego Krupkę [41], pracujące na częstotliwości 5 GHz. Wybór rezonatora zależał od poziomu rezystancji powierzchniowej badanej warstwy. W przypadku małego poziomu domieszkowania (poniżej progu perkolacji), stosowany był rezonator dielektryczny typu split-post. Celem pomiarów było uzyskanie rezystancji $30 \Omega/\text{kwadrat}$, która zapewnia optymalne pasmo pracy projektowanego panelu [30],[36].

Kolejnym etapem działalności dotyczącej charakteryzacji materiałów była metoda pojemnościowa służąca do pomiaru warstw rezystywnych nanoszonych na podłoże dielektryczne. W metodzie pojemnościowej badany materiał rezystywny traktowany jest jako elektroda stratna kondensatora, której parametry - w wyniku zależności głębokości wnikania fali elektromagnetycznej od częstotliwości - są wyraźnie dyspersyjne. W przypadku jednorodnej warstwy, impedancja takiego kondensatora stratnego jest reprezentowana modelem Debye'a. Jeśli własności dielektryczne podłoża, jak i parametry geometryczne układu są znane, istnieje możliwość wyznaczenia rezystancji powierzchniowej badanej warstwy. Sytuacja komplikuje się jeśli warstwa rezystywna jest niejednorodna, w wyniku porowatości lub nierównomiernego rozkładu domieszki w materiale półprzewodnikowym. W konsekwencji model dyspersyjny może się istotnie skomplikować.

Habilitant zastosował w [10] metodę pojemnościową do oceny jednorodności domieszkowania warstwy arsenku galu (GaN) naniesionego metodą epitaksjalną na podłoże z ceramiki alundowej. Dobre dopracowanie tej technologii jest kluczowe dla dalszego rozwoju tranzystorów dużej mocy. Pomiary wykonywane były przy pomocy sondy pojemnościowej Agilent 16451B Dielectric Test Fixture podłączonej do analizatora impedancji Agilent 4294A, który mierzy widmo impedancji w zakresie od 40 MHz do 110 MHz. Wykonane pomiary widma impedancji mają wyraźnie charakter odmienny od modelu Debye'a, czy Cole-Cole, co wskazuje na dużą niejednorodność rezystywności badanego wafla półprzewodnikowego [42]. Fakt ten został potwierdzony pomiarami mapy rezystywności przy pomocy rezonatora dielektrycznego (ang. split-post dielectric resonator) wykonanymi na częstotliwości 5 GHz. W celu oszacowania rezystywności oraz określenia jej charakteru, habilitant zaproponował obwodowy model zastępczy takiej warstwy półprzewodnikowej, który dobrze opisuje własności dyspersyjne badanej warstwy GaN naniesionej na ceramikę alundową.

4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Habilitant zajmuje się również od wielu lat techniką grzania mikrofalowego w różnych zastosowaniach. Początkowo, jego działalność w tym zakresie dotyczyła projektowania małych aplikatorów do podgrzewania ciekłych odczynników chemicznych oraz wspomagania procesu projektowania kuchenek mikrofalowych. Po ukończeniu doktoratu habilitant zajmował się również projektowaniem przemysłowych aplikatorów mikrofalowych. W projekcie Eureka „Food waste treatment on ships by microwave drying”

habilitant odpowiedzialny był za projekt instalacji do utylizacji mikrofalowej odpadów żywnościowych na statkach rejsowych. Następnie, w ramach zlecenia komercyjnego habilitant zajmował się projektem instalacji oraz konsultacjami w trakcie wykonania systemu do mikrofalowej utylizacji (dewulkanizacji) opon samochodowych o mocy mikrofalowej 50kW. Instalacja zaprojektowana przez habilitanta została wdrożona przez firmę MARPO ze Szczecina i jest wykorzystywana w bieżącej działalności produkcyjnej tej firmy. Habilitant wspiera również wysiłki firmy MARPO zmierzające do budowy instalacji produkcyjnej o mocy 600 kW. Wynikiem prac jest również zastrzeżenie patentowe zgłoszone do Urzędu Patentowego RP w dniu 21.05.2012 „Sposób i urządzenie do prowadzenia recyklingu odpadów organicznych, a szczególnie zużytych opon, przy wykorzystaniu techniki mikrofalowej”, jak również zgłoszenie patentowe do Europejskiego Urzędu Patentowego z dnia 28.08.2012 o numerze EP 2 666 812 A1 ”Method and apparatus for recycling of organic waste preferably used tires using microwave technique” opublikowane w dniu 27.11.2013.

Innym projektem związanym z przemysłowym grzaniem mikrofalowym jest „The development of innovative technology for bituminous surface thermal bonding with microwave radiation”. Projekt ten, wykonywany jest obecnie w ramach Program Badań Stosowanych NCBiR przez konsorcjum, w którego skład wchodzi Instytut Badawczy Dróg i Mostów oraz firma QWED Sp. z o.o.. Habilitant bierze tam udział w opracowaniu systemu mikrofalowego do spajania wzdłużnych szczelin technologicznych występujących w nawierzchniach drogowych.

Habilitant współpracuje również z firmą QWED Sp. z o.o. w zakresie rozwoju oraz wdrożenia nowych modeli FDTD materiałów, takich jak:

- materiały o nieliniowości trzeciego rzędu, typu Kerr'a i Ramana,
- cienkie warstwy dyspersyjne,
- model wewnątrz-pasmowego przewodnictwa grafenu,
- model dwu- oraz cztero-poziomowych układów atomowych.

W latach 2010-2011, habilitant uczestniczył również w projekcie „SAR-based augmented Inertial Navigation Architecture” finansowanym przez Europejską Agencję Obrony i zajmował się opracowaniem systemu do tworzenia odpowiedzi impulsowej wybranych obiektów naziemnych na podstawie pełnofalowych symulacji FDTD. System ten

służył do zwiększenia dokładności symulatora radaru SAR opartego na optyce geometrycznej [4].

W ostatnich latach habilitant zajmuje się również modelowaniem pełnofalowym optycznych zjawisk nieliniowych, takich jak generacja supercontinuum w mikrostrukturalnych włóknach światłowodowych, zjawisko nasycenia absorpcji w dwupoziomowych układach atomowych, czy akcji laserowej w cztero-poziomowych układach atomowych. Prace te wykonywane są we współpracy z dr. Ryszardem Buczyńskim z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych oraz w ramach projektu Iuventus Plus „Hybrid modeling of a laser action with the finite difference time domain method”.

Habilitant został wyróżniony następującymi nagrodami:

1. Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w latach 2008-2009 (nagroda grupowa)
2. Wyróżnienie komunikatu ”Periodic FDTD modeling of 3D Photonic Crystals” wybranego wśród najlepszych młodych naukowców podczas *18th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2010*
3. Stypendium finansowane przez Unię Europejską w ramach Programu Rozwojowego Politechniki Warszawskiej (2013-2014)
4. Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2011-2012 (nagroda grupowa)

Literatura

- [37]. K. Yee, “Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media,” *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.14, 1966.
- [38]. X. Chen, T. M. Grzegorzczak, B.-I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, “Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials,” *Phys. Rev. E*, vol. 70, pp. 016608(1-7), 2004.
- [39]. B. Salski, M. Celuch, W. Gwarek, ”FDTD for nanoscale and optical problems,” *Microwave Magazine*, 2010.
- [40]. Marzena Olszewska–Placha, *Nowy typ paneli absorbujących fale elektromagnetyczne*, rozprawa doktorska, 2014.

- [41]. J. Krupka, W. Strupinski, and N. Kwietniewski, "Microwave conductivity of very thin graphene and metal films," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol.11, no.4, pp. 3358-3362, 2011.
- [42]. M. Schlesinger, *Modern Aspects of Electrochemistry*, Springer, 2009.