

dr inż. Paweł Kopyt
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: *Paweł Kopyt*

2. Wykształcenie i posiadane stopnie zawodowe:

- | | |
|-----------|---|
| 2006 | doktor nauk technicznych, dyscyplina: elektronika, praca pt. „ <i>Methods of Coupled Simulations of Electromagnetic-Thermodynamic Problems</i> ”, promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Gwarek, Politechnika Warszawska |
| 2001 | magister inżynier, specjalność: telekomunikacja, praca pt. „ <i>Optymalizacja układu grzania mikrofalowego pod względem jednorodności rozkładu mocy</i> ”, Politechnika Warszawska |
| 2001-2006 | Studia doktoranckie na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej |
| 1997-2001 | Studia magisterskie na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej |
| 1993-1997 | Technikum Elektroniczno-Mechaniczne im. M. Kasprzaka w Warszawie |

3. Zatrudnienie:

- | | |
|-----------|---|
| 2008-dziś | Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych, adiunkt |
| 2001-2008 | Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Instytut Radioelektroniki, specjalista w projektach badawczych. |

4. 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)

4.1. tytuł osiągnięcia naukowego

Jedno-tematyczny cykl publikacji zatytułowany:

Numeryczne modelowanie elektromagnetyczne komponentów dla mikrofalowych i sub-terahercowych torów odbiorczych

4.2. publikacje wchodzące w skład jedno-tematycznego cyklu publikacji

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR (9):

- [A1] K. Kucharski, P. Zagrajek, D. Tomaszewski, A. Panas, G. Głuszko, J. Marczewski, **P. Kopyt**, “An Influence of Silicon Substrate Parameters on a Responsivity of MOSFET-Based Terahertz Detectors,” *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Vol. 130 (2016), No. 5. **IF: 0.530, wkład: 15%, MNiSW: 15**
- [A2] J. Krupka, B. Salski, **P. Kopyt**, W. Gwarek, “Electrodynamic study of YIG filters and resonators,” *Scientific Reports* 6, 34739. **IF: 5.525, wkład: 20%, MNiSW: 40**

- [A3] **P. Kopyt**, B. Salski, M. Olszewska, D. Janczak, M. Słoma, T. Kurkus, M. Jakubowska, W. Gwarek, "Graphene-based Dipole Antenna for a UHF RFID Tag", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 64, No. 7, Jul. 2016, pp. 1-7. **IF: 2.053, wkład: 65%, MNiSW: 35**
- [A4] **P. Kopyt**, B. Salski, P. Zagrajek, D. Janczak, M. Słoma, M. Jakubowska, M. Olszewska-Placha, W. Gwarek, "Electric Properties of Graphene-Based Conductive Layers from DC Up To Terahertz Range", *IEEE Transactions on THz Science and Technology*, Vol. 6, No. 3, May 2016, pp. 480-490. **IF: 2.298, wkład: 45%, MNiSW: 40**
- [A5] D. Coquillat, J. Marczewski, **P. Kopyt**, N. Dyakonova, B. Giffard, W. Knap, "Improvement of terahertz field effect transistor detectors by substrate thinning and radiation losses reduction", *Optics Express*, Vol. 24, No. 1, Jan. 2016, pp. 272-281. **IF: 3.148, wkład: 35%, MNiSW: 40**
- [A6] **P. Kopyt**, B. Salski, J. Marczewski, J. Lusakowski, "Parasitic Effects Affecting Responsivity of Sub-THz Radiation Detector Built of a MOSFET", *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 36, No. 11, Nov. 2015, pp. 1059-1075. **IF: 1.851, wkład: 65%, MNiSW: 25**
- [A7] **P. Kopyt**, P. Zagrajek, J. Marczewski, K. Kucharski, B. Salski, J. Lusakowski, W. Knap, W. K. Gwarek, "Analysis of sub-THz radiation detector built of planar antenna integrated with MOSFET", *Microelectronics Journal*, Vol. 45, No. 9, Sept. 2014, pp. 1168-1176. **IF: 0.920, wkład: 60%, MNiSW: 20**
- [A8] **P. Kopyt**, "Electrical Characterization of a RF Power Transistor Ceramic Package Including Multiple Wirebonds", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 23, Iss. 1, Jan. 2013, pp. 5-8. **IF: 0.524, wkład: 100%, MNiSW: 15**
- [A9] **P. Kopyt**, B. Salski, P. Zagrajek, D. Obrębski, J. Marczewski, "Modeling of Silicon-Based Substrates of Patch Antennas Operating in the Sub-THz Range", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, zaakceptowane do druku 12-V-2017 z DOI 10.1109/TTHZ.2017.2706026. **IF: 2.298, wkład: 65%, MNiSW: 40**

Publikacje w czasopismach recenzowanych, lista „B” MNiSW (1):

- [A10] D. Yavorskiy, J. Marczewski, K. Kucharski, **P. Kopyt**, W. Gwarek, M. Ratajczyk, W. Knap, B. Piętka, J. Lusakowski, "A THz Scanner based on Planar Antenna-Supplied Silicon Field-Effect Transistors", *Photonics Letters of Poland*, Vol. 4, No. 3, 2012, pp. 100-102. **wkład: 10%, MNiSW: 7**

Publikacje recenzowane (konferencje zagraniczne) po uzyskaniu stopnia doktora (6):

- [A11] **P. Kopyt**, B. Salski, P. Zagrajek, J. Marczewski, "Affordable Sub-THz Band-Pass Mesh Filters," *Proc. 21st International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON-2016)*, 2016, ss. 1-3. **wkład: 70%**
- [A12] **P. Kopyt**, D. Obrebski, P. Zagrajek and J. Marczewski, "The Effect of Gate Layout on Responsivity of MOSFET THz Detector", *Proc. of the 40th Intl. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Hong-Kong, 2015. **wkład: 60%**
- [A13] **P. Kopyt**, P. Zagrajek, D. Obrebski, M. Bauwens, N. S. Barker, J. Marczewski, "Measurements of a MOSFET sub-THz Detector Integrated with Rectangular Patch Antenna", *Proc. of the 39th Intl. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Tucson, USA, 2014. **wkład: 55%**
- [A14] **P. Kopyt**, P. Zagrajek, K. Kucharski, J. Lusakowski, J. Suszek, M. Sypek, J. Marczewski, "Increasing responsivity of THz Radiation Detector Based on MOSFETs", *Proc. of the 39th Intl. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Tucson, USA, 2014. **wkład: 60%**
- [A15] **P. Kopyt**, "Planar Antennas for Integration with FET-based THz Radiation Detectors," *Proc. 19th Intl. Conf. on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON 2012)*, 2012, pp. 276-280. **wkład: 100%**

[A16] P. Kopyt, J. Marczewski, K. Kucharski, J. Lusakowski, W. Gwarek, "Planar antennas for THz radiation detector based on a MOSFET," *Proc. of the 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2011, pp. 1-2. wkład: 80%

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania¹

Numeryczne modelowanie elektromagnetyczne intensywnie rozwijane przez liczne grupy badawcze od lat 80-tych XX w. stanowi cenne narzędzie znacząco usprawniające projektowanie układów elektronicznych, których częstotliwości robocze regularnie rosną. Jeszcze kilka lat temu częstotliwości pracy typowych układów wejściowych leżące w paśmie Ku lub Ka (26-40 GHz) uznawano zazwyczaj za stosunkowo wysokie, a wyższe pasma częstotliwości pozostawały domeną nielicznych zespołów związanych z radioastronomią (np. National Radio Astronomy Observatory, USA). Jednak postępujący rozwój technologii (zwł. mikroelektronicznych) sprawia, że w wielu zastosowaniach (np. łącza telekomunikacyjne zgodne z normą ETSI EN 302-217, czy elektroniczne komponenty spektrometrów pracujących w dziedzinie czasu THz-TDS) nawet częstotliwości z zakresu subterahercowego (od ok. 0.1 do 1 THz – sub-THz) mogą być już uznane za typowe. Zwłaszcza w wypadku wyższych częstotliwości (z pogranicza techniki w.cz. i optyki) oznacza to jednocześnie coraz silniejsze przenikanie się obszarów stanowiących do niedawna wyłączną domenę albo optyki albo technik w.cz. i otwiera nowe pola dla metod obliczeniowych zmuszając do wykorzystywania w pracy jednocześnie opisów stosowanych przez różne środowiska naukowe.

Taka wielodyscyplinarność wynikać może także z konieczności zastosowania nowych technologii dla rozwiązań stosowanych już wcześniej. Jako przykład niech posłużą typowe anteny ładowe, których realizacja w paśmie mikrofalowym przy użyciu typowych materiałów (laminatów mikrofalowych) dostępnych komercyjnie nie jest kłopotliwa już od czasu pierwszych badań takich struktur (zapoczątkowanych w latach 70-tych). Mechanizm działania takich struktur nie zmienia się, ale już ich realizacja stanowi wyzwanie podczas projektowania rozwiązań przeznaczonych do pracy w pasmach sub-THz i realizowanych zazwyczaj za pomocą technologii mikroelektronicznych. Największe wyzwanie stanowi wtedy przestrzeganie specyficznych reguł projektowania dostosowanych do wybranego procesu technologicznego, które w zasadzie nigdy nie są przystosowane do wytwarzania układów promieniujących. Właściwe zaprojektowanie struktury wymaga wtedy uwzględnienia narzuconego z góry podłoża o dużej przenikalności elektrycznej (np. $\epsilon_{r(Si)} = 11.65$ lub $\epsilon_{r(GaAs)} = 12.96$) i zazwyczaj niemałej jego grubości, a także przewidywanej struktury połączeń drutowych wytworzonego chipu zawierającego antenę, której obecność może radykalnie zmienić charakterystykę promieniowania układu. Podczas gdy wyzwania takie są nieobecne podczas projektowania struktur pracujących w niższych pasmach, praca w paśmie sub-THz wymaga od projektanta anten aby znał on także problematykę projektowania układów scalonych i typowych technologii stosowanych w tym sektorze badań i przemysłu. Konieczność zastosowania podobnego podejścia widać także w wypadku anten realizowanych na bazie nowych materiałów przewodzących (np. grafenu), gdzie inne własności samego materiału będą wpływać na sposób projektowania struktury lub jej własności. Oprócz konieczności zaprojektowania samej anteny niezbędne jest więc tutaj szczegółowe charakteryzowanie materiałów w stosunkowo szerokim zakresie częstotliwości przy użyciu właściwie dobranych metod pomiarowych, co ponownie oznacza konieczność szerszego spojrzenia na problem do rozwiązania. Taka rozbudowana procedura charakteryzowania materiałów poprzedzająca numeryczną analizę EM i projektowanie znanych już wcześniej układów może prowadzić do uporządkowania i lepszego wyjaśnienia także fundamentalnych zjawisk fizycznych, co widać dobrze na przykładzie filtrów ferromagnetycznych.

Wszystko to rodzi zapotrzebowanie na sprawdzone praktyki projektowania i postępowania w badaniach tego rodzaju. Niszę tę mają częściowo wypełniać prowadzone przeze mnie (lub z moim udziałem) prace z dziedziny modelowania obwodów pracujących na pograniczu techniki w. cz. i optyki, w tym także w paśmie sub-THz. Przedstawione w dalszej części tego opracowania

¹ Organizacja odniesień literaturowych:

[A..] – pozycje autora po uzyskaniu stopnia doktora

[B..] – światowe pozycje literaturowe, kluczowe z punktu widzenia osiągnięcia

publikacje dokumentują badania oraz obrazują możliwości jakie daje wykorzystanie detektorów promieniowania sub-THz zbudowanych z tranzystorów polowych. Detektory promieniowania tego rodzaju badałem analizując kilka różnych efektów ograniczających efektywność detekcji. Pierwszym z nich jest wpływ grubego podłoża dielektrycznego i rodzajów falowodowych propagujących się w nim, a kolejnym są elementy pasożytnicze typowych tranzystorów typu MOSFET, które ściśle zależą od wielkości przyrządu. Sformułowane wnioski pozwalają na projektowanie struktur antenowych o wyższej czułości pracujące w paśmie sub-THz. Prace te wiążą się z badaniami własności cienkich warstw grafenowych prowadzonym także w zakresie sub-THz za pomocą spektroskopii czasowej (THz-TDS) i fourierowskiej (FTIR) zastosowaniu takich warstw do konstruowania pierwszych na świecie anten odbiorczych na bazie grafenu i wykorzystania ich w systemach RFID. Zajmowałem się także charakteryzowaniem opravek i połączeń drutowych stosowanych rutynowo w mikroelektronice, co pozwoliło sprawdzić wpływ tych elementów na działanie układów w.cz. i stanowiło motywację do poszukiwania i zaproponowania bezdrutowych metod badania tego typu układów (także w zakresie sub-THz), m.in. w celu wyznaczenia czułości detektorów budowanych w oparciu o różne rodzaje tranzystorów. Ostatnim zagadnieniem należącym do monotematycznego cyklu publikacji poświęconego modelowaniu elementów torów odbiorczych było badanie układów (np. filtrów) zbudowanych w oparciu o granat itru (YIG) stanowiący najmniej stratny materiał ferromagnetyczny. Badania wykorzystujące numeryczne metody modelowania EM, w których brałem udział, pozwoliły na wykazanie nieścisłości w części twierdzeń obecnych w literaturze dotyczącej sferycznych próbek YIG-u wykorzystywanych w technice w.cz. od kilkudziesięciu lat przyczyniając się do lepszego zrozumienia zjawisk plazmonicznych zachodzących na powierzchni takich obiektów. Ma to znacznie nie tylko dla praktyki projektowania układów filtrujących i generujących, ale także dla rozwijającej się spintroniki.

4.3.1. Prace dotyczące detektorów promieniowania sub-THz

Moje prace prowadzone w dziedzinie takiego modelowania elementów składowych torów odbiorczych rozpoczęły się od nawiązania w 2008r. współpracy z zespołem prof. M. Grynberga z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (UW) zajmującym się wówczas badaniami eksperymentalnymi struktur detekcyjnych dla promieniowania z zakresu sub-THz. Badania te koncentrowały się na analizie pracy tranzystorów polowych jako detektorów promieniowania EM i opierano je na sformułowanej w [B1] teorii Dyakonova-Shura (DS) opisującej efekty zachodzące w kanale tranzystorów polowych, dzięki którym możliwa jest nie tylko generacja promieniowania w zakresie sub-THz, ale także – po rozbudowaniu tej teorii w [B2] – detekcja takiego promieniowania, również w klasycznych przyrządach typu MOSFET (np. w [B3]). Efekt ten nie był wcześniej obserwowany, ponieważ najwygodniej obserwuje się go bez polaryzacji drenu, a więc w układzie niezgodnym ze sposobem włączenia tranzystorów w typowych układach detekcji lub wzmacniania, a dodatkowo detektory wymagają oświetlenia stosunkowo silnym promieniowaniem o wysokiej częstotliwości. Eksperymenty polegające na detekcji promieniowania w tym zakresie częstotliwości są prowadzone przez wiele grup badawczych na świecie przy użyciu różnych rodzajów tranzystorów polowych (głównie MOSFET, HEMT, ale także JLFET) [B3][B4][B5]. Zgodnie z teorią DS zakłada się w najprostszym ujęciu, że sygnał u_{THz} o częstotliwości z zakresu sub-THz doprowadzony do bramki i źródła tranzystora moduluje przewodność kanału wpływając na koncentrację nośników w 2-wymiarowym (w przybliżeniu) kanale, która zależy od u_{THz} . Jednocześnie wpływa on również na natężenie pola elektrycznego w kanale odpowiedzialnego za unoszenie nośników. Połączenie tych dwóch jednoczesnych efektów prowadzi do powstawania składowej stałej proporcjonalnej do u_{THz}^2 i dostępnej do zmierzenia/przetwarzania na drugim końcu kanału (np. na drenie przyrządu).

Tym co zdecydowało o popularności opisanej metody detekcji jest jedna z cech zjawiska związana z głębokością wnikania fali o częstotliwości sub-THz w głąb kanału tranzystora. Ze względu na straty występujące w kanale (związane m.in. z niedoskonałościami materiałów i ograniczoną ruchliwością nośników) fala wnikająca w kanał zaniknie przed dotarciem do jego końca w wypadku przyrządów o długim kanale lub takich gdzie mechanizmy odpowiedzialne za straty są szczególnie silne [B6], np. w przyrządach krzemowych. Teoria DS opisuje takie zjawisko jako efekt tzw. nierezonansowej detekcji [B2] i jest on obserwowany w praktycznie wszystkich eksperymentach badających detekcję za

pomocą tranzystorów polowych prowadzonych w temperaturze pokojowej. W detektorach nierezonansowych detekcja występuje na stosunkowo krótkim wstępnym odcinku kanału i długość tego odcinka L_{eff} automatycznie zmienia się wraz z częstotliwością. Oznacza to, że ogólne wymiary tranzystora nie mają kluczowego znaczenia dla wystąpienia opisanego efektu, ponieważ jest on samoskalowalny i wymiar charakterystyczny obszaru, w którym on zachodzi sam dopasowuje się do długości fali. Konsekwencją jest występowanie opisanego efektu w dowolnych tranzystorach polowych, w tym także krzemowych tranzystorach o wymiarach kanału rzędu $10 \times 10 \mu\text{m}$ (wytwarzanych np. w Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych Instytutu Technologii Elektronowej – ITE – w Piasecznie), których częstotliwość graniczna f_T nie przekracza pojedynczych MHz. Przyrządy takie mogą być z powodzeniem wykorzystywane jako detektory promieniowania o częstotliwościach do kilkuset GHz.

Otwiera to możliwości tworzenia niezwykle tanich detektorów promieniowania sub-THz wytwarzanych w dostępnych komercyjnie procesach typu CMOS dedykowanych zastosowaniom cyfrowym o niewielkich częstotliwościach roboczych oferowanych przez wiele wytwórni na świecie. Warunkiem jest właściwe zaprojektowanie układów wejściowych (antenowych) odpowiedzialnych za sprzężanie przyrządu z oświetlającą go falą i prace tego typu stanowiły dużą część moich badań prowadzonych od 2008r. także w ramach trzech projektów badawczych poświęconej tej tematyce (projekt NCBiR pt. „Zaprojektowanie i wykonanie detektora promieniowania sub-THz działającego w oparciu o krzemowy tranzystor MOS” nr OR00015509 realizowany w latach 2009-2011; projekt NCBiR pt. „Wielopikselowy detektor promieniowania THz zrealizowany z wykorzystaniem selektywnych tranzystorów MOS i jego zastosowanie w biologii, medycynie i systemach bezpieczeństwa (THzOnLine)” nr PBS1/A9/11/2012 realizowany w latach 2012-2016 oraz projekt NCN pt. „Projektowanie i optymalizacja detektorów promieniowania sub-THz zbudowanych w oparciu o tranzystory MOS” nr 2012/05/B/ST7/02112 realizowany w latach 2013-2017), gdzie byłem kierownikiem zespołu zadań realizowanych na Politechnice Warszawskiej (w projekcie THzOnLine) lub głównym wykonawcą (w pozostałych projektach).

4.3.1.1. Wpływ podłoża na działanie detektorów sub-THz i metody minimalizowania jego wpływu

Pierwszym etapem badań związanych z poprawieniem czułości detektorów promieniowania sub-THz zbudowanych z krzemowych tranzystorów MOSFET było opracowanie struktur antenowych zgodnych z procesami technologicznymi ITE oraz wytwórni AMS, gdzie planowano wytworzenie struktur testowych. Procesy takie są jednoznacznie zdefiniowane dla wybranych wytwórni oferujących procesy CMOS i typowo wykorzystują grube (ok. kilkuset μm) podłoża krzemowe, na których wytwarzane są przyrządy wraz z warstwą metalizacji, gdzie powstaje antena. Prace te zakończyłem **proponując szereg anten** przeznaczonych do monolitycznej integracji z tranzystorami i opisałem je w **publikacjach [A15], [A16] i [A7]. Jednak wyciągnięcie ogólnych wniosków pozwalających na projektowanie wydajnych struktur detekcyjnych stanowiło oddzielny temat badawczy. Wyniki tych rozpoczętych w 2009r. prac opisałem dopiero w publikacji [A5].**

Zgodnie z ugruntowaną teorią propagacji fal EM, grube (o grubości porównywalnej z długością fali) podłoże dielektryczne może podtrzymywać fale propagujące się w nich w postaci rodzajów falowodowych. Warstwa podłoża tworzy falowód dielektryczny, w którym mogą istnieć słabo-tłumione rodzaje falowodowe oznaczane zazwyczaj jako rodzaje TM (dopuszczający istnienie składowych poprzecznych pola magnetycznego i składowej wzdłużnej pola elektrycznego w warstwie dielektryka) oraz TE (dopuszczający istnienie składowych poprzecznych pola elektrycznego i składowej wzdłużnej pola magnetycznego w warstwie dielektryka). Poszczególne rodzaje falowodowe numeruje się biorąc pod uwagę możliwość wzbudzenia ich w strukturze oraz charakterystyczną częstotliwość (częstotliwość odcięcia), od której mogą istnieć. W **publikacji [A5]** rozwiązałem analitycznie równanie charakterystyczne dla uproszczonych 1-wymiarowych struktur tego rodzaju w podłożach o różnej grubości wykonanych z materiałów typowo stosowanych w przemyśle mikroelektronicznym (Si, GaAs oraz GaN). Następnie obliczenia te zweryfikowałem przygotowując numeryczny model takiego 1-wymiarowego problemu i rozwiązując go dla tych samych parametrów uzyskując zadawalającą zgodność. Uzyskane wyniki, choć interesujące jako argument w dyskusjach prowadzonych z naukowcami badającymi doświadczalnie struktury detektorów nie są jednak przełomowe. O nowatorskim charakterze uzyskanych wyników decyduje dopiero kolejny krok, który

opisałem w **publikacji [A5]**. Jak pokazałem w tej publikacji, abstrakcyjny model propagacji w nieograniczonej płycie dielektrycznej i rodzaje pobudzone w takiej strukturze nie różnią się zasadniczo od rodzajów falowodowych pobudzanych w realnej 3-wymiarowej strukturze zbudowanej z anten planarnych wytworzonych na powierzchni dielektryka. Świadczy o tym zdumiewająca zgodność między wyznaczoną numerycznie sprawnością promieniowania (do wolnej przestrzeni) realnych anten planarnych w funkcji grubości dielektryka, a analizą zachowania poszczególnych 1-wymiarowych rodzajów falowodowych opisywanych analitycznie. Oznacza to, że stosunkowo nieskomplikowany analityczny opis uproszczonego zjawiska pozwala na trafne przewidywanie działania realnej struktury, której pełna analiza jest możliwa wyłącznie numerycznymi metodami obliczeniowymi. Stanowi to odpowiedź na adresowane do mnie przez współpracujących ze mną fizyków ciała stałego badających układy detektorów pytania o rolę rodzajów falowodowych propagujących się w rzeczywistych układach. W efekcie, w **publikacji [A5]** zamieściłem wykresy ułatwiające projektowanie struktur promieniujących na typowych podłożach stosowanych w mikroelektronice. Wykresy te pozwalają na wyznaczenie granicznej grubości podłoża, która pozwoli na zminimalizowanie strat wynikających z istnienia rodzajów podłożowych w układach pracujących w wybranym paśmie i wykonanych na wybranym podłożu. Wykresy te przygotowano wykorzystując dane z 3-wymiarowej numerycznej symulacji EM wybranego typu anteny planarnej, a także dane dla podstawowego rodzaju falowodowego uzyskane analitycznie. Zgodnie z oczekiwaniami zgodność tych wykresów jest bardzo duża. Wyniki modelowania EM, z które byłem odpowiedzialny zostały potwierdzone doświadczalnie w eksperymencie prowadzonym w zespole prof. W. Knapa z Laboratoire Charles Coulomb Uniwersytetu Montpellier we Francji. W eksperymencie zbadano czułość 4 detektorów zbudowanych z tranzystora typu MOSFET (wytworzonych w komercyjnym procesie CMOS oferowanym przez wytwórnę STMicroelectronics) monolitycznie zintegrowanego z anteną szerokopasmową. Podłoże każdego z badanych detektorów pocieniono przez szlifowanie (*backside grinding*) do różnych grubości, co prowadziło do zmiany czułości struktur, których wszystkie pozostałe parametry były identyczne. W eksperymencie pokazano dużą zgodność przewidywań opartych na wynikach moich obliczeń z pomiarami. Pokazało także możliwości numerycznego modelowania EM i zademonstrowano ich przydatność w projektowaniu układów detektorowych.

Wnioski z przeprowadzonych badań prowadzonych już od 2009r. pozwoliły na zaproponowanie anten oferujących zadawalającą sprawność promieniowania, które były jednocześnie zgodne z wymaganiami procesów technologicznych ITE, gdzie planowano wykonać detektorowe struktury testowe, które miały pozwolić na pierwszą weryfikację moich założeń dotyczących wpływu podłoża na działanie detektora. Opisano je a **publikacji [A15]**. Pierwszym z zaproponowanych tam projektów była antena wykonana na cienkiej membranie o grubości 40 μm , którą uzyskuje się w jednym z ostatnich procesów technologicznych przez mokre wytrawienie spodniej strony wafera, na którym wcześniej wytworzono przyrząd wraz z warstwami metalizacji (i anteną). Ostatnim procesem jest pokrycie tylnej powierzchni wafera (wraz z wytrawionymi zagłębieniami) warstwą metalu, który będzie stanowić masę anteny. Dzięki tym zabiegom wytworzenie detektora wymaga jedynie nieznacznych zmian w zestawie standardowych procesów technologicznych wykonywanych zazwyczaj na linii produkcyjnej. Jednocześnie uzyskuje się antenę łątową na stosunkowo cienkim podłożu, które nie podtrzymuje rodzajów podłożowych, więc czułość uzyskanego detektora może być stosunkowo wysoka i ograniczona głównie przez własności samego przyrządu MOSFET. Ponieważ technologia ITE nie oferuje możliwości trawienia na sucho i metalizowania uzyskanych otworów (*vias*), nie ma możliwości podłączenia tranzystora do pojedynczej anteny łątowej za pomocą linii mikro-paskowej, co jest najczęściej wybieraną opcją w podobnych projektach. Z tego powodu projektując antenę dedykowaną technologii ITE zdecydowałem się na zastosowanie szyku złożonego z dwóch anten tego rodzaju. Cienka membrana gwarantuje wysoka sprawność promieniowania, a dzięki umieszczeniu tranzystora MOSFET pomiędzy przeciwległymi krawędziami promieniującymi obydwu struktur możliwe jest zasilanie bramki i źródła przyrządu w sposób zapewniający maksymalną amplitudę sygnału pobudzającego. Wynika to z przesunięcia o 180° chwilowych wartości pól EM w pobliżu wybranych krawędzi anten zasilających przyrząd. Takie rozwiązanie nie jest typowo spotykane w literaturze i umożliwiło zrealizowanie działających detektorów bez konieczności modyfikowania technologii ITE, czyli przy użyciu pojedynczej warstwy metalizacji.

Drugim rozwiązaniem zaproponowanym w **publikacji [A15]** i następnie bardziej szczegółowo przeanalizowanym w **publikacjach [A7] i [A16]** był szyk dwóch anten łatowych wykonanych na dodatkowym postumencie z żywicy SU8, która ze względu na możliwość uzyskiwania wysokich i stromych krawędzi jest często wykorzystywana w eksperymentalnych strukturach mikroelektronicznych i optoelektronicznych. W rozwiązaniu tym wykorzystalem podstawową warstwę metalizacji dostępną w wybranej technologii, która będzie stanowić masę gotowej struktury promieniującej. Na warstwie tej wykonuje się postument z SU8 o wybranej grubości, a na tym postumencie wytwarza się łaty promieniujące. Ze względu na niską odporność SU8 na temperaturę nie jest możliwe wykonywanie połączeń między dwiema warstwami metalizacji, co uniemożliwia wykonanie galwanicznego połączenia z łatami. W zaproponowanym przeze mnie rozwiązaniu nie jest ono jednak konieczne, gdyż połączenie galwaniczne konieczne jest tylko między polami kontaktowymi i elektrodami tranzystora. Za połączenie między tranzystorem i antenami odpowiadają sprzęgacze wykorzystujące składową pionową pola E występującego na krawędziach metalizacji. Dzięki temu łaty w paśmie pracy struktury (ok. 340 GHz) są sprzężone z tranzystorem, a jego polaryzacja jest możliwa poprzez linie koplarnie zabezpieczone pasmowo-zaporowymi filtrami wytworzonymi w metalizacji masy. Zachowując niewielką grubość warstwy SU8 można zapewnić sprzężenie z łatami na zadawalającym poziomie. Ponieważ względna przenikalność elektryczna SU8 nie przekracza wartości $\epsilon_r(SU8) = 2.1$, warstwa ta przy swojej grubości 20 μm nie podtrzymuje rodzajów podłożowych i nie powiększa strat struktury. Jednocześnie jest wytrzymalsza mechanicznie niż cienkie membrany krzemowe wytwarzane przez trawienie KOH. Rozwiązanie takie nie zostało zaproponowane nigdzie wcześniej i stanowi kolejny projekt dostosowany do możliwości technologicznych wybranej wytwórni układów scalonych (w tym wypadku ITE).

Detektory wyposażone w opisane wyżej anteny zostały wytworzone, a ich czułość została zbadana eksperymentalnie w laboratorium dra hab. Jerzego Łusakowskiego (UW) oraz, niezależnie, w laboratorium dra Przemysława Zagrajka w Instytucie Optoelektroniki (IO) Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). Wyniki pomiarów wraz z dokładniejszym opisem konstrukcji anteny na postumencie SU8 zostały przedstawione w **publikacji [A7]**. Zawarto tam także wyniki wstępnych prac nad stworzeniem opisu pozwalającego na połączenie wyników pełno-falowych symulacji anten i wyznaczenie ich charakterystyk promieniowania oraz impedancji wejściowej widzianej z zacisków, do których podłączany będzie tranzystor. W modelu pełno-falowym sam tranzystor jest zastępowany skupionym źródłem o arbitralnie wybieranej rezystancji wewnętrznej. Kompletny przyrząd typu MOSFET stanowi bowiem zbyt złożoną strukturę, aby można było uwzględniać go wraz z rozległymi warstwami metalizacji tworzącymi antenę w rzeczywistym modelu. Kompletny model zaproponowany w **publikacji [A7]** pozwala na przewidywanie częstotliwościowej zależności czułości struktury w zależności od zakładanej impedancji wejściowej tranzystora, który w tych obliczeniach może stanowić arbitralnie wybraną zespoloną impedancję. Należy podkreślić, że w czasie gdy przygotowywano ten model większość grup badawczych prowadzących badania nad podobnymi detektorami promieniowania sub-THz zakładała błędnie, że tranzystor typu MOSFET w takim paśmie częstotliwości jest opisany przez impedancję wejściową Z_{gs} zbliżoną do impedancji czystego kanału tranzystora, tak jak to opisano np. w [B6]. Oznacza to przyjęcie założenia o stosunkowo wysokiej amplitudzie impedancji wejściowej. Przygotowując publikację [A7] nie miałem dostępu do wyników charakterystyki struktur typu MOSFET dla tak wysokich częstotliwości. W tamtym okresie, w Polsce nie istniało ani jedno stanowisko do prowadzenia ostrzowej charakterystyki przyrządów w paśmie sub-THz. Tym niemniej, porównanie częstotliwościowej zależności czułości wykonanych detektorów z wynikami obliczeń prowadzonych dla różnych zakładanych impedancji wejściowych sugerowało, że opisane powyżej założenia co do impedancji wejściowej tranzystorów MOSFET w paśmie sub-THz jest nieprawdziwe, i w rzeczywistości zachowanie się tych przyrządów dla bardzo wysokich częstotliwości zależy głównie od wartości elementów pasożytniczych ich struktury i ma charakter pojemnościowy. Model, który wykorzystalem i opisałem w **publikacji [A7]** nie był wcześniej publikowany. Jednocześnie w publikacjach ówczesnych ograniczano się do pełno-falowego projektowania samej anteny i wyznaczania jej charakterystyki odbiciowej (S_{11}) oraz charakterystyki promieniowania bez prób przewidywania częstotliwościowej zależności czułości gotowej struktury.

4.3.1.2. Wpływ elementów pasożytniczych obecnych w strukturze tranzystora MOSFET na działanie detektorów sub-THz wykorzystujących takie przyrządy

W literaturze (np. [B3]) opisano wiele detektorów wykorzystujących krzemowe przyrządy typu MOSFET wytworzone w procesach dostępnych komercyjnie. Projektując te przyrządy zazwyczaj pamięta się – jak w [B7] – o zapewnieniu dopasowania impedancyjnego między przyrządem a zintegrowaną z nim anteną. Wobec braku możliwości dokonania pomiarów impedancji anteny oraz przyrządu projektant może się opierać jedynie na modelach obydwu tych elementów. We wskazanych artykułach przyrząd jest jednak modelowany za pomocą przybliżonego 1-wymiarowego modelu [B3], co prowadzi do bardzo uproszczonego obwodowego modelu zastępczego tranzystora typu MOSFET [B8]. W efekcie, impedancja wejściowa przyrządu jest zawyżona i projektowanie detektora o zakładanych własnościach (np. o zdefiniowanym wcześniej paśmie pracy) staje się procesem bardzo kosztownym i wymagającym nawet kilku prób.

Z tego powodu w swojej dalszej pracy zająłem się modelowaniu przyrządów MOSFET wykorzystywanych jako detektory promieniowania sub-THz z uwzględnieniem elementów pasożytniczych, które mają znaczący wpływ na wartość impedancji wejściowej tranzystorów używanych w układach detekcyjnych pracujących z sygnałami o częstotliwości przekraczającej 300 GHz. Efekty takie są często zaniechane podczas obliczeń bazujących wyłącznie na opisanej w [B2] teorii detekcji promieniowania sub-THz w tranzystorach polowych. Zazwyczaj rozszerza się ją tylko o dodanie do zespolonej impedancji kanału tranzystora [B6] dodatkowej rezystancji dostępowej opisującej skończoną oporność kontaktów omowych, podczas gdy inne efekty (np. pasożytnicze pojemności bramki) są pominięte. Prowadzi to do niedokładnego oszacowania impedancji obciążającej antenę, a to z kolei utrudnia zaprojektowanie odpowiedniej anteny, co widać w mojej publikacji [A7]. Model przyrządu przedstawiony w [A7] należało więc rozbudować po to, aby umożliwić konstruowanie czulszych detektorów zbudowanych przy użyciu tranzystorów typu MOSFET. Dodatkową motywacją w mojej pracy, była także chęć zwrócenia uwagi na niedoskonałość dostępnych teorii (zastosowanych np. w [B7]) sugerujących możliwość dynamicznego impedancyjnego dopasowywania tranzystora MOSFET do anteny poprzez odpowiednie polaryzowanie jego bramki. **W świetle wyników moich badań opisanych w publikacji [A6] wydaje się raczej, iż dla bardzo wysokich częstotliwości zachowanie przyrządu głównie zależy od elementów pasożytniczych**, które z definicji pozostają niezależne od polaryzacji przyrządu. Oznacza to, że wartość impedancji samego kanału tranzystora ma stosunkowo niewielki wpływ na impedancję obciążającą antenę, co potwierdza spostrzeżenia przedstawione wcześniej w **publikacji [A7]**. Przedstawiony w **publikacji [A6]** stworzony przeze mnie zastępczy model obwodowy odwołujący się do konstrukcji typowych struktur MOSFET i pozwalający na przewidywanie czułości danej struktury, został zweryfikowany poprzez pomiary szeregu struktur testowych wyposażonych w opisane w publikacji [A15] anteny planarne wytworzone w ITE na cienkiej membranie krzemowej. Wyniki przeprowadzonych niezależnie przez dra hab. J. Łusakowskiego z UW oraz dra P. Zagrajka z WAT pomiarów struktur różniących się wymiarami kanału okazały się zgodne z przewidywaniami, co uwiarygodniło opracowany model. Wykorzystałem go potem wielokrotnie realizując projekty różnych detektorów sub-THz zbudowanych w oparciu o tranzystory MOSFET.

Model opisany w publikacji [A6] rozbudowałem nieco opisując możliwości jego zastosowania podczas projektowania topologii układów detekcji zbudowanych z tranzystora MOSFET i anteny. Podczas przygotowywania opisu takich struktur w formacie GDSII, typowym dla wytwórni układów scalonych, konieczne jest podejmowanie wielu decyzji nt. szczegółów topologii. Jednym z nich jest liczba kontaktów między warstwą metalizacji i warstwą poli-krzemu, z którego wykonana jest zazwyczaj bramka układów MOSFET. **W publikacji [A12] opisałem sposób zastosowania stworzonego wcześniej modelu struktury MOSFET jako detektora promieniowania sub-THz do analizowania wpływu liczby kontaktów przewidzianych w topologii całego detektora.** Warto podkreślić, że w literaturze nie ma podobnych badań łączących działanie detektora promieniowania sub-THz zbudowanego z tranzystora MOSFET z parametrami topologii takich układów, której narysowanie należy do obowiązków projektanta gotowego układu scalonego przeznaczonego do wykonania.

Wyniki te potwierdziłem potem przeprowadzając z pomocą zespołu prof. Scotta Barkera z University of Virginia, USA, pomiary ostrzowe przykładowych struktur MOSFET i wyznaczenie ich pełnych macierzy [S] dla różnych wartości napięcia polaryzacji bramki. **Wyniki pomiarów impedancji**

wejściowej badanych tranzystorów przedstawiłem w publikacji [A13]. Głównym jej celem było badanie czułości przykładowego detektora zbudowanego z anteny planarnej wykonanej w technice wielowarstwowej oraz tranzystora MOSFET o wymiarach kanału $0.5 \times 1 \mu\text{m}$. Impedancję tego przyrządu zmierzono korzystając z przygotowanych w tym celu odpowiednich struktur pomiarowych i uzyskano **potwierdzenie oczekiwań sformułowanych w publikacjach [A6] i [A7].** Impedancja wejściowa takich struktur mierzona w zakresie częstotliwości 220 – 330 GHz ma niewielką część rzeczywistą i charakter pojemnościowy zależny od pojemności bramki oraz wartości elementów pasywnych. Wyniki te były istotną pomocą dla współpracujących ze mną fizyków z zespołów Uniwersytetu Montpellier i Uniwersytetu Warszawskiego, ponieważ stanowiły potwierdzenie modelu struktury MOSFET i pozwalały na projektowanie kolejnych takich struktur w oparciu o zweryfikowane już dane.

Pomiary opisane w publikacji [A13] stanowiły wstęp do badania czułości różnych struktur typu MOSFET w drodze pomiarów ostrzowych i z pominięciem anten. Ideę takiego eksperymentu zaproponowałem jako rozwiązanie problemu zasygnalizowanego w [B5] polegającego na nieprecyzyjnym sposobie podawania czułości detektorów promieniowania sub-THz badanych poprzez oświetlanie ich falą płaską. W typowym podejściu, źródło o znanej mocy połączone z anteną o znanej kierunkowości oświetla detektor (zintegrowany z anteną) umieszczony w znanej odległości od anteny. W ten sposób znana jest gęstość mocy oświetlającą badany układ oraz znana jest jego odpowiedź (zazwyczaj amplituda sygnału detekcji). Częściowo ze względów historycznych, również w takich pomiarach czułość detektorów określa się w jednostkach V/W, a więc gęstość mocy fali oświetlającej należy przeliczyć na moc doprowadzoną do detektora. W tym celu konieczna jest znajomość apertury skutecznej anteny A_{eff} , którą trzeba wyznaczyć na drodze symulacji numerycznej lub stosując różne przybliżenia. Jak napisano w [B5] (której autorom pomogłem przygotowując odpowiednie modele EM struktury, za co współautorzy podziękowali w sekcji *Acknowledgements*), jako powierzchnię apertury różne grupy badawcze przyjmują różne wartości (np. powierzchnię największego pola metalizacji, limit dyfrakcyjny itp.) co prowadzi do znacząco różnych wyników i uniemożliwia bezpośrednie porównywanie czułości różnych detektorów mierzonych w różnych laboratoriach.

Dla lepszego zaprezentowania struktur przygotowanych przeze mnie podczas prowadzonych badań oraz zaproponowanej przeze mnie metody pomiaru czułości oferowanej przez daną technologię wybrałem kilka reprezentatywnych konstrukcji zaprojektowanych i zbudowanych przez inne grupy badawcze na świecie przy użyciu technologii oferowanych przez wytwórnie IHP (Niemcy), STMicroelectronics (STM, Francja) i LFoundry (LF, Niemcy). Wyniki ich działania przedstawiłem w Tabeli 1., gdzie dla porównania umieściłem także wyniki pomiarów przeprowadzonych przeze mnie przy użyciu technologii oferowanych przez wytwórnie Austria Microelectronics Systems (AMS, Austria), Instytut Technologii Elektronowej (ITE, Polska) oraz United Monolithic Semiconductors (UMS, Francja).

W dostępnej literaturze dominuje jeden sposób określania czułości zbudowanych detektorów. Pomija się zazwyczaj kwestie dopasowania impedancyjnego anteny i przyrządu, w tym także kwestie obecności elementów pasywnych. Oszacowaną wartość czułości wyrażoną w [V/W] uzyskuje się mierząc wartość napięcia fotodetekcji dostępnego na wyjściu badanego detektora i szacując wartość mocy doprowadzonej do jego wejścia na podstawie znanej gęstości mocy fali EM oświetlającej strukturę oraz oszacowanej powierzchni skutecznej A_{eff} detektora (jego anteny). W publikacjach [Tabela1-B], [Tabela1-D], [Tabela1-E] i [Tabela1-F] wykorzystano po prostu wartość fizycznej powierzchni detektora (lub soczewki zintegrowanej z nim). W publikacji [Tabela1-C] wartość powierzchni skutecznej detektora wyznaczono na drodze numerycznej symulacji elektromagnetycznej parametry anteny zintegrowanej z tranzystorem. Drugą metodą stosowaną podczas wyznaczania czułości, która wraz z postępem wiedzy w tej dziedzinie jest obecnie niezmiernie już rzadko stosowana, są obliczenia oparte wyłącznie na podejściu analitycznym, jak w publikacji [Tabela1-A]. Wynik szacowania czułości wybranego detektora za pomocą opisanej metody jest więc obarczony dużym błędem systematycznym związanym z wyborem wartości A_{eff} . Co równie istotne, oświetlenia całej struktury (często wiele detektorów w jednym wspólnym czipie) stosunkowo szeroką wiązką promieniowania nie pobudza wyłącznie wybranego detektora, ale także wszystkie sąsiednie detektory, podłoże, oraz połączenia drutowe. Jak pokazano w publikacji [B9] nawet połączenia drutowe mogą

działać jak anteny znacznie zwiększając realną powierzchnię A_{eff} detektora. Oszacowanie czułości w oparciu o dane dotyczące samej anteny lub fizycznych wymiarów wybranego piksela jest więc zazwyczaj błędne. Dane umieszczone w Tabeli 1. potwierdzają te wnioski. Zgodnie z opublikowanymi danymi przyrządy wykonane w bardzo podobnych technologiach i zaopatrzone w podobne anteny charakteryzują się diametralnie różnymi (nawet o dwa rzędy wielkości) czułościami, co może budzić zastrzeżenia co do dokładności stosowanych metod charakteryzacji.

Tabela 1. Zestawienie oszacowanych wartości czułości wybranych detektorów promieniowania sub-THz zbudowanych w oparciu o tranzystory polowe.

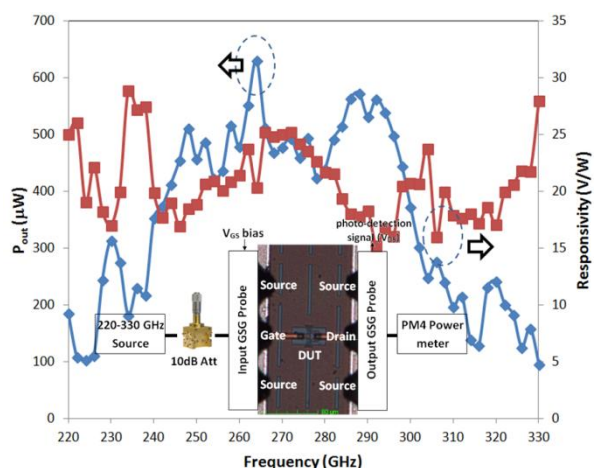
Technologia	Częst. [GHz]	Czułość przyrządu	Dodatkowy wzmacniacz	Metoda oszacowania czułości	Ref.
250 nm NMOS SiGe (IHP)	600	250 V/W	140 V/V	Czysto analitycznie	[A]
65 nm CMOS Si (STM)	1027	10 V/W	80 V/V	Pomiarowo, ale A_{eff} każdego piksela oszacowane na podst. jego pow. fizycznej i kierunkowości anteny.	[B]
65 nm CMOS Si (STM)	650	13.75 V/W	80 V/V	Pomiarowo, ale A_{eff} każdego piksela oszacowane na podst. kierunkowości anteny wyznaczonej symulacyjnie.	[C]
150 nm CMOS Si (LF)	600	350 V/W	–	Pomiarowo, ale A_{eff} każdego piksela oszacowane na podst. jego pow. fizycznej.	[D]
130 nm CMOS Si (STM)	300	2600 V/W	35 V/V	Pomiarowo, ale A_{eff} każdego piksela oszacowane na podst. jego pow. fizycznej.	[E]
130 nm NMOS SiGe (IHP)	650	450 V/W	–	Pomiarowo, ale A_{eff} każdego piksela oszacowane na podst. pow. soczewki.	[F]
350 nm CMOS Si (AMS)	220-330	35 V/W	–	Bezpośrednio, na drodze pomiarów <i>on-wafer</i>	Moje badania
3 μ m NMOS Si (ITE)	220-330	7.5 V/W	–	Bezpośrednio, na drodze pomiarów <i>on-wafer</i>	
100 nm HEMT GaAs (UMS)	220-330	250 V/W	–	Bezpośrednio, na drodze pomiarów <i>on-wafer</i>	

Odnośniki:
 [A] U. Pfeiffer, E. Ojefors, "A 600-GHz CMOS Focal-Plane Array for Terahertz Imaging Applications", *Proc. European Solid-State Circuits Conf.*, Sep. 2008, pp. 110-113.
 [B] R. Al Hadi, H. Sherry, J. Grzyb, N. Baktash, Y. Zhao, E. Ojefors, A. Kaiser, A. Cathelin, U. Pfeiffer, "A broadband 0.6 to 1 THz CMOS imaging detector with an integrated lens," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Jun. 2011.
 [C] E. Ojefors, N. Baktash, Y. Zhao, R. Al Hadi, H. Sherry, U. Pfeiffer, "Terahertz imaging detectors in a 65-nm CMOS SOI technology," *Proc. European Solid-State Circuits Conf.*, Sep. 2010, pp. 486-489.
 [D] S. Boppel, A. Lisauskas, M. Mundt, D. Seliuta, L. Minkevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, M. Mittendorff, S. Winnerl, V. Krozer, H. G. Roskos, "CMOS Integrated Antenna-Coupled Field-Effect Transistors for the Detection of Radiation From 0.2 to 4.3 THz," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 60, No. 12, Dec. 2012, pp. 3834-3843,
 [E] F. Schuster, H. Videlier, A. Dupret, D. Coquillat, M. Sakowicz, M. Tchagaspian, B. Giard, W. Knap, "A broadband THz imager in a low-cost CMOS technology," *Proc. IEEE Intl. Solid-State Circuits Conf.*, Feb. 2011, pp. 42-43.
 [F] R. Jain, H. Rucker, U. Pfeiffer, "Zero Gate-Bias Terahertz Detection with an Asymmetric NMOS Transistor," *Proc. 41st Intl. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz 2016)*, Copenhagen, Denmark, 25-30 Sept. 2016.

Zaproponowane przeze mnie podejście wykorzystujące pomiar ostrzowy nie tylko do wyznaczania macierzy [S] struktur tranzystorowych ale także do bezpośredniego pomiaru czułości takich struktur jest pozbawione opisanego wyżej problemu. Ponadto, dzięki zastosowaniu koplarnych (CPW) lub niesymetrycznych linii paskowych łączących sondy pomiarowe z samym przyrządem eliminuje znacząco wpływ podłoża na wyniki pomiaru. Z oczywistych względów nie ma także wpływu połączeń drutowych, które zazwyczaj silnie powiększają aperturę efektywną anten, co pokazano w [B9]. Przy znanej mocy dostarczanej przez źródło promieniowania sub-THz, znanej wartości strat wtrąceniowych zastosowanych sond pomiarowych oraz znanej wartości współczynnika S_{11} badanej struktury można jednoznacznie określić moc doprowadzoną do zacisków badanego przyrządu i mierząc wartość fotonapięcia na wyjściu układu bezpośrednio wyznaczyć jego czułość w [V/W]. W pomiarze uwzględnia się także całe pasmo falowodowe (np. WR3), a ze względu na efektywniejsze sprzężenie między źródłem promieniowania i badanym układem można stosować źródła o niewielkiej mocy. W związku z tym w tej roli można użyć, oferowanych przez kilka światowych firm, ekstenderów częstotliwości

współpracujących z analizatorami obwodów, co umożliwia wyznaczenie macierzy [S] przyrządu oraz jego czułości w jednym pomiarze. W metodzie tej nie występują żadne dodatkowe współczynniki (np. A_{eff}), dzięki czemu pozwala ona na określenie maksymalnej (granicznej) czułości oferowanej przez przyrząd wytworzony w danej technologii. W gotowym detektorze wartość ta może być tylko mniejsza ze względu na dopasowanie impedancyjne między anteną i przyrządem. Wyniki uzyskane przeze mnie są zbieżne (co do rzędu wielkości) z najgorszymi oszacowaniami przedstawionymi w Tabeli 1. (odnośniki [Tabela1-B] i [Tabela1-C]), a nieco większa czułość krzemowych technologii MOSFET oszacowana przeze mnie wynika zapewne z nieidealnego dopasowania anteny i przyrządu w konstrukcjach detektorowych opisanych w literaturze.

Metoda ta była tematem mojego wystąpienia w [A17]. Pierwsze wyniki takich prac, nie prowadzonych dotychczas przez żadną inną grupę badawczą, przeprowadziłem z użyciem skonstruowanej przeze mnie manualnej stacji pomiarowej przeznaczonej do pomiarów ostrzowych w zakresie częstotliwości milimetrowych i sub-THz. Stacja ta zastępuje z powodzeniem komercyjne urządzenia tego typu będąc przy tym od nich tańsza o co najmniej rząd wielkości. Została ona przedstawiona na Rysunku 1. wraz z wynikami przykładowych pomiarów struktury MOSFET prowadzonych w zakresie WR3. Dostęp do tego przyrządu pomiarowego i możliwość jego dowolnego rekonfigurowania i przenoszenia okazały się kluczowe ze względu na konieczność prowadzenia pomiarów w Instytucie Optoelektroniki WAT i przewożenia tam sprzętu, co nie byłoby tak łatwe w wypadku komercyjnych stacji pomiarowych, które są nie tylko delikatniejsze ale także znacznie cięższe i większe. Te wstępne, nieopublikowane jeszcze wyniki, potwierdzają skuteczność takiego podejścia i pozwoliły na bezpośrednie porównanie wybranych struktur typu MOSFET na podłożu krzemowym oraz tranzystorów typu HEMT na podłożu GaAs.



Rysunek 1. Zbudowana przeze mnie stacja do pomiarów ostrzowych (a) oraz wyniki ostrzowego pomiaru czułości struktury tranzystorowej MOSFET zrealizowanego za jej pomocą (b).

4.3.2.3. Struktury antenowe dla detekcji sub-THz zaprojektowane w wyniku opisanych badań

Anteny opisane w publikacjach [A15] i [A16] oraz w sposób bardziej szczegółowy w [A6], [A7] służyły głównie do weryfikacji tezy nt. wpływu podłoża na działanie detektora sub-THz. Nie były one projektowane z myślą o żadnych konkretnych zastosowaniach. Pozwoliły one jednak na zgromadzenie doświadczeń związanych z projektowaniem struktur tego rodzaju, ich wytwarzania oraz ich charakteryzowaniem. Wnioski z tych działań pozwoliły na projektowanie bardziej rozbudowanych struktur, do których należy opracowanie przeze mnie szeregu linii detektorów przeznaczonych do pracy w nowych spektrometrach sub-THz służących do wykrywania substancji. Typowe spektrometry pracujące w tym paśmie korzystają z szerokopasmowych detektorów promieniowania i odpowiednich algorytmów detekcji (np. detekcja koherentna w spektrometrach typu THz-TDS) lub odpowiednich torów pomiarowych zawierających interferometr (np. interferometr Michelsona w spektrometrach typu FTIR). Nowy spektrometr pracuje na nieco innej zasadzie, ponieważ wykorzystuje zestaw wielu wąskopasmowych detektorów promieniowania sub-THz, z których każdy jest dostrojony do innej częstotliwości środkowej. Jednoczesne analizowanie sygnałów z każdego z tych detektorów pozwala

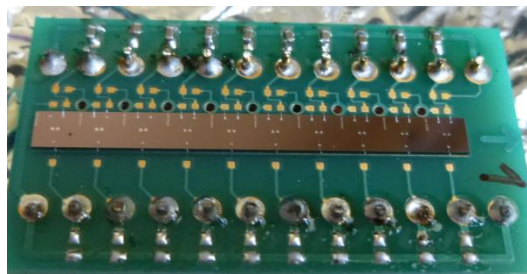
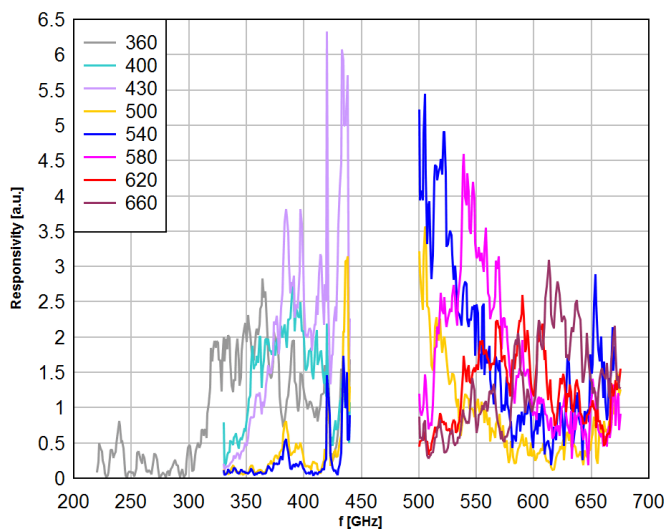
na identyfikowanie wybranych substancji, których charakterystyczne cechy widma absorpcji znajdują się paśmie częstotliwości obejmowanym przez linijkę.

Dzięki badaniom przeprowadzonym wcześniej, opierając się na modelu zastępczego tranzystora MOSFET dominowanego przez elementy pasożytnicze struktury oraz wykorzystując ustaloną topologię anteny wykonywanej na cienkiej membranie krzemowej przygotowałem zestaw kilku linijek złożonych z 10 lub z 8 pikseli. Każdy z pikseli zrealizowałem jako szereg dwóch anten łatowych, których wymiary były dobierane w taki sposób, aby uzyskać właściwą częstotliwość roboczą struktury. Wstępne wersje linijek zostały zaprojektowane dla częstotliwości od 230 do 350 GHz. Pomiarów wykonanych w ITE struktur testowych na krzemowych podłożach typu Silicon-On-Insulator (SOI) dominujących w przemyśle mikroelektronicznym pokazały, że konieczna jest dodatkowa modyfikacja modelu takiego podłoża. **Stanowiło to motywację do podjęcia badań, których wyniki opisałem w publikacji [A9].** Detektory z antenami testowymi należącymi do pierwszych wersji linijek detektorowych wykonanych na podłożu typu SOI zostały zmierzone przez dra P. Zagrajka z WAT. Wyznaczona w tych pomiarach częstotliwościowa charakterystyka czułości była odstrojona w górę względem przewidywań opartych na modelu z publikacji [A6] i podłożu (membrane) opisanej jako wykonana z jednorodnego materiału. Przenikalność tego materiału ustalono początkowo mierząc grubość wafer tego samego podłoża za pomocą spektrometru THz-TDS w szerokim zakresie częstotliwości (od 200 GHz do ponad 3 THz). Bliższa analiza tego problemu przedstawiona w [A9] pokazała, że takie podejście nie jest poprawne, gdyż przenikalność elektryczna podłoża SOI zawierającego wiele cienkich warstw wykonanych z kwarcu (SiO_2) silnie zależy nie tylko do polaryzacji pola E w fali oświetlającej próbkę, ale także od grubości spodniej części wafera (tzw. *handling wafer*) wykonanej z krzemu. To właśnie ta warstwa jest pocieniana w procesie wytwarzania membran krzemowych. W efekcie, wartość przenikalności elektrycznej mierzona w spektrometrze THz-TDS (gdzie dominuje składowa pola E styczna do interfejsów między warstwami) nie opisuje dokładnie cienkiego podłoża pod antenami łatowymi (gdzie dominuje składowa normalna do interfejsów), a inna grubość warstwy *handling wafer* dodatkowo zakłóca wynik tego pomiaru.

Poprawienie dokładności modelu numerycznego dla podłoża typu SOI poprzez wprowadzenie do niego cienkich (sub-falowych) warstw SiO_2 nie jest możliwe, gdyż wymagałoby znacznego zagęszczenia siatki obliczeniowej. Z tego powodu w [A9] **zaproponowałem dwie metody zmodyfikowania modelu podłoża**, które prowadzą do podobnych wyników zgodnych z wynikami pomiarów. Jedną z nich polega na opisanu anteny łatowej jako fragmentu niesymetrycznej linii paskowej, której przenikalność efektywna jest znana dla danej szerokości linii i grubości dielektryka. Obecność w podłożu typu SOI wielu warstw o różnej przenikalności uwzględniłem modyfikując znane wzory i rozszerzając je do czterech lub do pięciu warstw, w zależności od tego, czy pasywacja umieszczona jako ostatnia (górną) warstwa była uwzględniana, czy też pomijana. Na podstawie takich obliczeń wyznaczyłem zastępczą przenikalność samego podłoża uwzględniającą osobliwości pola na krawędziach paska/anteny. Uwzględnienie w opisany sposób uwarstwionego podłoża w modelu detektora pozwala na uzyskanie wyników zgodnych z pomiarami. Podstawową jego wadą jest jednak konieczność zmiany wartości przenikalności przy zmianach szerokości łaty promieniującej. Kolejną wadą jest inna dyspersja jednorodnego podłoża opisanego zastępczą przenikalnością niż dyspersja podłoża uwarstwionego, co może prowadzić do istotnych niedokładności dla wyższych częstotliwości. Efekt ten jest tylko częściowo kompensowany przez rozproszone pola EM (*fringing fields*) w pobliżu krawędzi promieniujących łaty. Jako alternatywę zaproponowałem zatem podejście polegające na zastosowaniu warstw anizotropowych o właściwie dobranych parametrach. Dzięki temu można uwzględnić wszystkie istotne efekty występujące w rzeczywistym podłożu (łącznie z dyspersją) bez potrzeby modyfikowania parametrów modelu podłoża niezależnie od szerokości łaty promieniującej ani bez stosowania nadmiernie zagęszczonej siatki obliczeniowej.

Zastosowanie obydwu metod opisu podłoża w modelu anteny wykonanej na podłożu typu SOI dało wyniki bardzo bliskie wynikom pomiarów wykonanych struktur. Uwzględnienie w modelu numerycznym modelu podłoża opartego na warstwach anizotropowych pozwoliło na zaprojektowanie linijki złożonej z 8 pikseli dostrojonych do częstotliwości od 360 GHz do 660 GHz i przeznaczonej do wykrywania laktozy, która charakteryzuje się maksimum absorpcji dla częstotliwości ok. 500 GHz. Wyników pomiarów tej linijki przeprowadzonych przez dra P. Zagrajka jeszcze nie opublikowano, ale

przedstawiono je na Rysunku 2a. obok zdjęcia testowej linijki detektorów pokazanej na Rysunku 2b. Wykorzystują one tranzystory NMOS z ITE, a więc maksymalną czułość zrealizowanych detektorów można szacować, zgodnie z danymi umieszczonymi w Tabeli 1., na poziomie nie większym niż 7.5 V/W.



Rysunek 2. a) Zmierzone przez dra P. Zagrajka (WAT) charakterystyki spektralne zaprojektowanej przeze mnie linijki detektorów na zakres od 360 GHz do 660 GHz na podłożu typu SOI; b) zdjęcie jednej z wytworzonych linijek wraz z dedykowaną płytką PCB umożliwiającą zachowanie ortogonalnego położenia połączeń drutowych względem polaryzacji fali zaprojektowanych anten.

Zastosowanie opisanej powyżej linijki SOI w spektrometrze zbudowanym w Instytucie Optoelektroniki WAT pozwoliło na prawidłowe wykrywanie próbki laktozy wśród próbek kontrolnych wykonanych z innych substancji. Niezależnie, podobny układ oparty na detektorze zaprojektowanym przeze mnie znacznie wcześniej skonstruowano na Wydziale Fizyki UW. Zawierał on tylko jeden piksel i służył do obrazowania m.in. do analizowania zawartości papierowych, nieprzezroczystych kopert. **Konstrukcję tego ostatniego układu** wykorzystującego dedykowane przedwzmacniacze i detektor oraz wąskopasmowe źródło promieniowania o częstotliwości ok. 315 GHz, a także uniwersalne stoliki XY **przedstawiono w publikacji [A10].**

W trakcie prowadzonych badań opracowałem także inne anteny przeznaczone do eksperymentów prowadzonych przez współpracujące ze mną grupy badawcze. Są wśród nich wyniki badania wpływu rodzaju podłoża (podłoża typu *bulk*, SOI, i in.) na działanie detektora wykorzystującego moją antenę opisane **w publikacji [A1].**

4.3.2.4. Struktury pomocnicze współpracujące z detektorami sub-THz zaprojektowane w wyniku opisanych badań oraz badania uzupełniające te prace

W ramach prowadzonych badań nad detektorami promieniowania opracowałem dodatkowe struktury pełniące funkcje pomocnicze względem samych detektorów. Pierwszą z tym struktur jest oprawka detektora zrealizowanego na pocienianej membranie krzemowej. **Wyniki tych prac przedstawiłem publikacji [A14],** gdzie opisałem konstrukcję zwierciadła półsferycznego, które zwiększając aperturę efektywną anteny detektora jest jednocześnie jego oprawką. Motywacją do podjęcia tych prac była planowana liczba detektorów w linijce i zaporowy koszt zakupu dla każdego z nich komercyjnego zwierciadła parabolicznego lub eliptycznego. Zaproponowałem zatem zastąpienie zwierciadła parabolicznego zwierciadłem półsferycznym, którego kształt jest w pewnej części zbliżony do zwierciadła parabolicznego. Podobne rozwiązanie, ale odniesione do soczewek zaproponowano wiele lat wcześniej w [B10]. Podejście związane ze zwierciadłami jest jednak w literaturze nieznanne. Opisany w [A14] projekt zwierciadła jest niezwykle tani, ponieważ można go wykonywać niezwykle szybko za pomocą odpowiednich frezów palcowych o kulistym zakończeniu. Oznacza to możliwość zbudowania niemal dowolnie dużej macierzy detektorów i zaopatrzenie każdego z nich w oddzielne zwierciadło wytworzone przez frezowanie. Przeprowadzony eksperyment polegający na zmierzeniu czułości testowego detektora i porównaniu go z czułością tego samego detektora umieszczonego nad

powierzchnią zwierciadła o różnej powierzchni potwierdził, że pomimo bardzo niskich kosztów wykonania, czułość detektora wzrasta proporcjonalnie do powierzchni apertury zwierciadła. Zaproponowany projekt zwierciadła i sposób zwiększania czułości detektorów promieniowania sub-THz zastrzegłem poprzez dokonanie zgłoszenia patentowego Biurze Patentowym RP. Zgłoszenie zostało uznane w listopadzie 2016r. (wynalazek zarejestrowany jako PL409222).

Kolejną strukturą dedykowaną do projektowanego spektrometru były pasmowo-przepustowe filtry siatkowe, których zadaniem było poprawienie selektywności poszczególnych detektorów. Każdy piksel jest zbudowany w oparciu o stosunkowo wąskopasmową antenę łątową, ale selektywność takiej konstrukcji nie jest duża, więc korzystne jest umieszczenie w torze pomiarowym dodatkowego filtra, który ją podniesie. Filtry tego typu są oferowane komercyjnie przez kilka firm na świecie, ale ich koszt jest bardzo wysoki, co łącznie z liczbą potrzebnych filtrów (min. 8 sztuk) sprawia, że próba zaprojektowania i wytworzenia takich struktur samodzielnie jest uzasadniona. **Wyniki tych prac przedstawiłem w publikacji [A11]**, gdzie opisałem konstrukcję przykładowego filtra z pasmem przepustowym położonym wokół częstotliwości 340 GHz oraz sposób jej wykonania jako zestaw odpowiednich nacięć wykonanych laserem CO₂ w blasze ze stali nierdzewnej o grubości 70 μm. Przedstawiłem także wyniki przeprowadzonych pomiarów wykonanej struktury oraz opisałem analizę uzyskanych danych wskazując na możliwe źródła różnic między oczekiwaniami i uzyskanymi wynikami. Wytworzony filtr okazał się porównywalny z filtrami komercyjnymi będąc przy tym o co najmniej rząd wielkości tańszy. Opierając się na uzyskanych doświadczeniach zaprojektowałem 8 filtrów dostrojonych do częstotliwości pikseli wchodzących w skład linijki SOI dla laktozy.

Badania dotyczące detektorów promieniowania sub-THz uzupełniłem analizą opravek ceramicznych stosowanych dla czipów tranzystorowych oraz detektorów promieniowania bliskiej podczerwieni. **Wyniki tych prac opisałem w publikacji [A8]**, gdzie analizowałem schemat zastępczy oprawki tego rodzaju i proponowałem metody pomiaru takich struktur. Wynikiem tych badań był schemat zastępczy oprawek przydatny podczas przewidywania wpływu umieszczenia czipu detektora w oprawce ceramicznej. Z przeprowadzonych badań wynika, że w wypadku stosowania detektorów promieniowania sub-THz do obrazowania lub w spektrometrii, wpływ oprawki nie jest istotny ze względu na bardzo wolne zmiany obwiedni sygnału. Jednak wobec rosnących wymagań wobec detektorów sub-THz pojawiających się w związku z koncepcjami zastosowania ich jako układy odbiorcze w łączach danych wykorzystujących kluczowanie amplitudy istotną będzie umiejętność przewidzenia wpływu zastosowania oprawki w układzie. Jest to szczególnie istotne w wypadku stosowania soczewek eliptycznych lub hipersferycznych powiększających aperturę efektywną detektora, ponieważ zastosowanie jakiegóż formy oprawki z długimi połączeniami drutowymi wydaje się tam nie do uniknięcia.

4.3.2. Badania własności cienkich warstw grafenowych prowadzone w zakresie częstotliwości aż do THz i zastosowanie takich warstw do konstruowania pierwszych grafenowych anten odbiorczych przeznaczonych dla systemów RFID

Metody analizy anten za pomocą numerycznych metod obliczeniowych pozwalają także na rozwijanie elementów antenowych w niższych pasmach częstotliwości, także struktur konstruowanych z użyciem nowych materiałów opartych na grafenie. **Wstępem do tych prac było przeprowadzenie przeze mnie oraz dra P. Zagrajka (WAT) rozbudowanej charakteryzacji past grafenowych i przedstawienie tej metodologii w publikacji [A4]**. W pracy tej zaproponowałem 4 różne metody pomiarowe w celu uzyskania rezystancji na kwadrat wybranych próbek past w paśmie częstotliwości od DC do kilkudziesięciu THz. W literaturze nie prowadzono wcześniej podobnych pomiarów własności materiałów. Dzięki zebranim danym pomiarowym możliwe było zaproponowanie dokładnego szerokopasmowego modelu opisującego badane pasty, także w zakresie UHF, co było istotne z powodu planowanych zastosowań past przewodzących. Przeprowadzenie charakteryzacji wymagało zastosowania m.in. spektrometru THz-TDS. Do przetwarzania surowych danych pomiarowych zabranych dzięki temu przyrządowi przygotowałem dedykowane algorytmy, pozwalające na wygodne wyekstrahowanie danych nt. rezystancji zamiast typowych informacji oferowanych przez oprogramowanie dostarczone przez producenta. Aby rozszerzyć zakres pomiarowy w górę, zastosowałem także spektrometr FTIR wraz z tymi samymi algorytmami, co pozwoliło na systematyczne opracowanie danych i zapewnienia ich spójności na granicy poszczególnych zakresów

pomiarowych realizowanych diametralnie różnymi metodami i przyrządami pomiarowymi. W efekcie uzyskałem wartości rezystancji dla wszystkich analizowanych próbek i pokazałem, że dla bardzo wysokich częstotliwości (powyżej kilkunastu THz) badane pasty stają się pochłaniające.

Dzięki zebranych danym nt. własności past grafenowych mogłem zaprojektować pierwsze na świecie działające anteny zbudowane na bazie grafenu. Struktury te przeznaczyłem do pracy paśmie UHF i przystosowałem do współpracy z czytnikami systemu RFID w standardzie EPC Global. **Wyniki tych prac przedstawiłem podczas konferencji International Microwave Symposium (IMS) 2015 w publikacji [A20], a następnie w postaci znacznie rozbudowanej w publikacji [A3].** Znaczącą wartością przedstawionej tam analizy był model struktury pozwalający na wyznaczenie jej impedancji wejściowej zbudowany jako połączenie dipola i pętli z prądem, a więc podstawowych radiatorów, których opisy są powszechnie znane i łatwo dostępne, co doprowadziło do powstania stosunkowo wygodnego pół-analitycznego modelu zaproponowanej przeze mnie nowej struktury anteny dedykowanej zastosowaniom RFID. Warto podkreślić, że publikacja [A20] przygotowana na konferencję IMS w 2015r. była gotowa i zgłoszona na konferencję już w grudniu 2014r. zgodnie z wymaganiami organizatorów. Opublikowanie jej rozbudowanej wersji nastąpiło z opóźnieniem, podczas którego powstała publikacja [B11] o zbliżonej tematyce, której współautorami byli A. Geim i K. Novoselov – laureaci nagrody Nobla z dziedziny fizyki przyznanej im w 2010r. za odkrycie grafenu. Stwierdzenie, że prace prowadzone przeze mnie oraz przez tych naukowców w dziedzinie anten grafenowych były prowadzone równoległe wydaje się więc uzasadnione mimo, że w publikacji [A3] umieściłem odwołanie do [B11] uznając daty zgłoszeń obydwu artykułów.

4.3.3. Badania własności próbek granatu itru (YIG) jako elementu obwodów wejściowych

Metody numeryczne oparte na FDTD pomyślnie zastosowane do modelowania materiałów o cechach anizotropowych, jak w wypadku podłoża SOI dla anten sub-THz, wykorzystałem także w badaniu własności materiałów ferromagnetycznych, które wykazują zyotropowość i są często stosowane jako elementy składowe komercyjnych źródeł sub-THz do wytwarzania sygnału o częstotliwości podstawowej poddawanej potem powielaniu. Stanowią także element filtrów, a ich badanie wymaga zastosowania złożonych numerycznych metod obliczeniowych, **co pokazałem (wraz ze współautorami) w publikacji [A2].** Dzięki zastosowaniu numerycznych modeli filtra pasmowo-przepustowego wykonanego z próbki YIG zasilanej pętlą udało się w tej pracy w pełniejszy sposób wyjaśnić zjawiska zachodzące w sferycznej próbce wykonanej z YIG-u. Okazało się, że filtry tego rodzaju pracują w paśmie położonym wokół częstotliwości rezonansu plazmonicznego podtrzymywanego na powierzchni kulki, a nie w paśmie wokół częstotliwości rezonansu ferromagnetycznego materiału, z którego wykonana jest kulka. Publikacja uporządkowała stosowane obecnie nazewnictwo, a wnioski z niej umożliwiają dokładniejsze projektowanie filtrów oraz źródeł sygnału w paśmie milimetrowym i sub-THz, co jest jednym z celów badań otwieranych w najbliższej przyszłości w ramach projektu TEAM-TECH pt.: „Wysokoprecyzyjne techniki charakteryzacji materiałów w zakresie fal milimetrowych oraz subterahercowych do zastosowań mikroelektronicznych”, w którym pełnię funkcję zastępcy kierownika.

4.3.4. Podsumowanie przedstawionych w pracy osiągnięć opisanych w jedno-tematycznym ciągu publikacji oraz dalsze plany naukowe habilitanta

Moje osiągnięcia badawcze stanowiące podstawę dla jedno-tematycznego ciągu publikacji umieściłem na krótkiej liście poniżej:

- Badania związane z wpływem grubości podłoża na działanie anten detektorów promieniowania sub-THz oraz **sformułowanie i opublikowanie po raz pierwszy (publikacja [A5])** wytycznych pozwalających na określenie bezpiecznej grubości maksymalnej podłoża.
- Sformułowanie i **opublikowanie po raz pierwszy (publikacja [A6]) pełnego modelu** tranzystora MOSFET wykorzystywanego jako detektor promieniowania sub-THz i zweryfikowanie go poprzez porównanie z wynikami pomiarów struktur testowych
- **Przeprowadzenie po raz pierwszy** w zakresie sub-THz systematycznych **ostrzowych pomiarów** struktur testowych w celu wyznaczenia zarówno ich macierzy [S] jak i czułości wybranych przyrządów na promieniowanie sub-THz.

- Zaprojektowanie szeregu anten przeznaczonych dla detektorów promieniowania sub-THz, w tym linijki detektorów dla spektrometru pracującego w paśmie sub-THz wraz z opracowaniem **nowatorskiej (opublikowanej w publikacji [A10]) metodologii uwzględniania własności podłoża typu SOI** podczas projektowania detektora i jego anteny.
- Zaprojektowanie i wykonanie układów pomocniczych dla spektrometru sub-THz, w tym zwierciadeł półsferycznych dedykowanych dla zaprojektowanych detektorów (**chronionych patentem PL409222 mojego autorstwa i opisanych następnie w publikacji [A14]**) oraz siatkowych filtrów pasmowo-przepustowych wraz z przeprowadzeniem ich pomiarów i analizą wyników (**opisanych w publikacji [A11]**).
- Zbadanie także w paśmie sub-THz własności przewodzących warstw grafenowych (**opisane w publikacji [A4]**) oraz zaprojektowanie i wykonanie **pierwszych na świecie anten grafenowych (opisanych w publikacji [A3])** wraz z analizą ich działania, a następnie ich zastosowanie w systemie RFID.
- Przeprowadzenie analizy numerycznej materiałów ferromagnetycznych wykorzystywanych jako komponenty torów sub-THz i filtry w torach wejściowych, **co pozwoliło na wyjaśnienie na nowo zjawisk** zachodzących w takich elementach (**opisane w publikacji [A2]**).

Korzystając z doświadczeń zebranych dotychczas podczas prowadzonych przeze mnie prac badawczych i projektowych związanych z modelowaniem elektromagnetycznym, a także mikroelektroniką i ostrzową techniką pomiarową, techniką cyfrową oraz techniką radiową planuję w kolejnych latach szerzej zająć się konstruowaniem detektorów i źródeł promieniowania w zakresie milimetrowym i sub-THz na potrzeby charakteryzacji materiałów oraz telekomunikacji. Bezpośrednią motywacją tej działalności są zadeklarowane cele nowego projektu badawczego, którego jestem zastępcą kierownika. Projekt ten dotyczy charakteryzowania materiałów w tych zakresach częstotliwości i chęć skonstruowania w jego ramach źródeł sygnału testowego pracujących w trybie CW, które byłyby zintegrowane z rezonatorami pomiarowymi projektowanymi na takie pasma. Źródła takie oraz rozwijana wraz z nimi technika obróbki komponentów falowodowych i planarnych będzie także – na co liczę – podstawą dla badań w zakresie rozwiązań radiokomunikacyjnych pracujących w paśmie sub-THz. W tych zastosowaniach przydatne będą także moje kilkuletnie już doświadczenia wyniesione ze współpracy z krajowymi i zagranicznymi wytwórcami układów scalonych (m.in. AMS, IHP, UMS, ITE, Lab III-V) i znajomości metodologii projektowania takich struktur. Będzie to pozwalało na stopniowe integrowanie kolejnych bloków funkcjonalnych konstruowanych źródeł promieniowania, co jest obserwowanym obecnie trendem światowym w zakresie rozwiązań sub-THz. Zagadnienia te częściowo łączą się także z moimi planami rozwijania impulsowych źródeł promieniowania wysokiej częstotliwości (sub-THz i THz) wykorzystujących nieliniowe efekty zachodzące we włóknach mikrostrukturalnych oświetlanych wysokoenergetycznymi impulsami optycznymi. Jest to całkowicie nowa klasa źródeł, które stanowiąc odrębny obszar badań, reprezentują także niebanalne wyzwanie naukowe oraz konstrukcyjno-projektowe obejmujące jednocześnie kilka zakresów częstotliwości i dziedzin badawczych (od zakresu milimetrowego po pasma optyczne). Wydaje mi się, że realizacja ww. planów pozwoli na szczelne zapewnienie terminarza mozolnie konstruowanej w Instytucie Radioelektroniki i Technik Multimedialnych PW grupy badawczej, której jestem jednym z liderów.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Niezależnie od ciągu tworzącego monotematyczny ciąg publikacji dotyczących mikrofalowych i sub-THz torów odbiorczych w okresie po uzyskaniu stopnia doktora zajmowałem się szeregiem zagadnień związanych z aktualnie realizowanymi projektami badawczymi lub zadaniami wynikającymi ze zobowiązań powziętych w ramach prowadzonej w Instytucie Radioelektroniki i Technik Multimedialnych współpracy międzynarodowej. Tematyka tych badań została w skrócie przedstawiona poniżej.

a) projektowanie anten na potrzeby grup badawczych współpracujących ze mną oraz publikacje konferencyjne rozbudowane potem w artykuły opublikowane w czasopismach

- [A17] **P. Kopyt**, "THz coupling with transistors – antennas and parasitics," *Proc. of the Laboratory of Terahertz and Mid-Infrared Collective Phenomena in Semiconductor Nanostructures (TERAMIR) Workshop*, Krakow, Poland, May, 2016.
- [A18] **P. Kopyt**, B. Salski, P. Zagrajek, D. Obrebski, and J. Marczewski, "Accurate Modeling of Silicon-Based Substrates for Sub-THz Antennas," *Proc. of the 41st Intl. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Copenhagen, Denmark, 2016.
- [A19] J. Marczewski, D. Obrębski, C. Kolaciński, M. Zbieć, K. Kucharski, P. Zagrajek, **P. Kopyt**, "Development of Multi-Pixel NMOS-based THz Detectors and Readout System Target-ed for Spectroscopy Applications," *Proceedings of 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2016*, pp. 191-196.
- [A20] **P. Kopyt**, B. Salski, M. Olszewska, D. Janczak, M. Słoma, T. Kurkus, M. Jakubowska, W. Gwarek, "Graphene-based Dipole Antenna for a UHF RFID Tag," *Proc. 2015 IEEE MTT-S International Symposium*, Phoenix, USA, 2015.
- [A21] D. Coquillat, J. Marczewski, **P. Kopyt**, N. Dyakonova, S. Ruffenach, D. But, F. Teppe, F. Schuster, B. Giffard, W. Knap, "Experimental and theoretical investigations of the responsivity of field effect transistors based Terahertz detectors versus substrate thickness," *Proc. of the 40th Intl. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Hong-Kong, 2015.
- [A22] K. Karpierz, T. Kochman, M. Grynberg, K. Kucharski, J. Marczewski, **P. Kopyt**, W. Knap, J. Łusakowski, "THz emission from silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistors", *Proc. 43rd "Jaszowiec" 2014 International School & Conference on the Physics of Semiconductors*, Wisła, POLAND June 7–12, 2014, ss. 1-6.
- [A23] D. Yavorskiy, **P. Kopyt**, J. Marczewski, J. Łusakowski, "Imaging of a THz Beam with Si-MOSFET Detectors", *Proc. of the 39th Intl. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Tucson, USA, 2014.
- [A24] K. Nogajewski, H. Boukari, **P. Kopyt**, W. Gwarek, T. Wojtowicz, H. Mariette, M. Grynberg, J. Łusakowski, "Antenna-equipped Field Effect Transistors on CdTe/CdMgTe Quantum Wells as Terahertz Detectors," *Proc. 40th "Jaszowiec" 2011 Intl. School and Conference on the Physics of Semiconductors*, 2011, pp. 1-4.

W trakcie prowadzonych badań opracowałem także inne anteny przeznaczone do eksperymentów prowadzonych przez współpracujące ze mną grupy badawcze. W publikacji [A19] zastosowano antenę na cienkiej membranie krzemowej w testach nowego układu odczytowego z wewnętrznym przetwarzaniem, który pozwala na eliminowanie szumów typu $1/f$ za pomocą wąskopasmowego wzmacniacza. Kilka moich anten wykorzystano także w wstępnych badaniach emisji promieniowania sub-THz z tranzystora polowego, których wyniki opisano w publikacji [A22]. Podobne anteny wykorzystano także w konstruowaniu układu obrazowania wiązek promieniowania sub-THz przedstawionego w publikacji [A23]. W publikacji [A24] wykorzystano dedykowane anteny szczelinowe w badaniach związanych z detekcją promieniowania sub-THz za pomocą przyrządów polowych wykorzystujących 2-wymiarowy gaz elektronowy o bardzo dużej ruchliwości nośników wytworzony w studni kwantowej uzyskanej na podłożu z tellurku kadmu (CdTe).

Publikacja konferencyjna [A18] była rozbudowanym streszczeniem poświęconym modelowaniu podłoża typu SOI i projektowaniu anten wytwarzanych na takich uwarstwionych strukturach składających się z cienkiej membrany uzyskanej poprzez lokalne trawienie podłoża. Publikacja ta została następnie rozbudowana i opublikowana jako artykuł [A1]. Publikację [A20] przygotowałem na konferencję IMS 2015. Dotyczyła ona pierwszych na świecie anten na bazie grafenu, które zostały wytworzone a nie tylko modelowanie, a następnie sprawdzone doświadczalnie. Potem znacznie rozszerzyłem ją dodając nowe treści poświęcone modelowaniu i opublikowałem jako publikacja [A4]. Sytuacja wyglądała podobnie w wypadku publikacji [A21], która zawierała analizę wpływu grubości podłoża dielektrycznego na pracę anten drukowanych na jego górnej powierzchni i po raz pierwszy zaprezentowano ją na dużej konferencji poświęconej promieniowaniu z zakresu sub-THz, THz i podczerwieni. Potem praca ta została rozszerzona i opublikowana w prestiżowym czasopiśmie jako [A6].

b) Projektowanie elementów torów radiowych systemów radiolokacyjnych i radiokomunikacyjnych:

- [A25] **P. Kopyt**, T. Lavaud, B. Baldini, P. Wegrzyniak, W. Gwarek, "Remotely Powered Wireless Dual-Band Sensing System for Aircraft EMC Environment," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 50, Iss. 3, Aug. 2008, pp. 491-498.
- [A26] D. Gryglewski, **P. Kopyt**, W. Wojtasiak, „Blok przemiany częstotliwości odbiornika radaru śledzącego na pasmo Ku”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Sigma NOT, vol. Vol. LXXXIX, nr 10, 2013, ss. 73-76
- [A27] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, **P. Kopyt**, J. Żurkowski, „Układ przemiany częstotliwości toru nadawczego radaru impulsowego na pasmo Ku”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Sigma NOT, vol. LXXXVIII, nr 11b, 2012, ss. 14-17
- [A28] **P. Kopyt**, A. Bielski, "A Simple 5.8 GHz RFID Wireless Data Transmission System: a Comparison of Two Realizations", *Proc. of the 41st European Microwave Conference (EuMC)*, 2011, pp. 1-4.
- [A29] A. Bielski, **P. Kopyt**, "A 5.8 GHz RFID Wireless Data Transmission System Employing the QAM Modulation Scheme," *Proc. 19th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON 2012)*, May 2012, pp. 551-555.
- [A30] **P. Kopyt**, "A 5.8 GHz RFID-based Data Transmission as an Energy Efficient Solution for on-Board Monitoring," *Proc. 18th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications: (MIKON 2010)*, 2010, pp. 284-287.

W ramach prac prowadzonych w tym obszarze zaprojektowałem opisaną w [A26][A27] rodzinę falowodowych filtrów pasmo-przepustowych przeznaczonych do torów radiowych systemu radiolokacyjnego projektowanego w Instytucie Radioelektroniki i Technik Multimedialnych w ramach jednego z projektów badawczych (projekt O R00015112 finansowany przez NCBiR). Filtry zostały zaprojektowane jako sekcje falowodowe sprzężone indukcyjnymi przesłonami. Wobec braku w literaturze dokładnych zastępczych modeli obwodowych takich przesłon, które uwzględniałyby nie tylko skończoną grubość przesłony ale także skończoną średnicę frezu używanego do wykonania takiego elementu, przygotowałem numeryczny pełno-falowy model takiej przesłony, który użyłem do zebrania danych potrzebnych do wyznaczenia wartości zastępczych pojemności i indukcyjności przesłony w funkcji jej wymiarów. Zastosowanie tych danych pozwoliło na zaprojektowanie obwodowego prototypu projektowanego filtra i wyznaczenie odpowiadających mu wymiarów filtra falowodowego. Na tej podstawie znalazłem punkt startowy dla algorytmu optymalizacji, dzięki któremu uzyskano ostateczne wersje projektowanych obwodów falowodowych. Przygotowane projekty wykonałem korzystając z frezarki numerycznej (CNC) udostępnionej przez Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Przeprowadziłem także pomiary wszystkich 9 wykonanych filtrów korzystając z zaprojektowanego i wykonanego przeze mnie zestawu kalibracyjnego TRL (zwarcia falowodowe oraz falowód o określonej długości – tzw. *shim*) dla prostokątnego falowodu standardu WR-51. Samodzielne zaprojektowanie i wykonanie takiego zestawu korzystając m.in. z techniki elektro-drażenia cienkim drutem mosiężnym (niezbędnym po to, aby uniknąć zaokrąglonych narożników falowodu wydrążonego w *shim*) było konieczne, gdyż elementy dla tego standardu falowodowego nie są oferowane komercyjnie.

Innym elementem badań prowadzonych w tym obszarze było opracowanie systemu zdalnego zasilania i zbierania danych z czujnika oblodzenia skrzeli (fragmentu krawędzi natarcia) na skrzydle samolotu. System ten opracowywałem pracując w kilkusobowym zespole (byłem głównym wykonawcą) finansowanym w ramach realizowanego w Instytucie Radioelektroniki międzynarodowego projektu WISE (FP6-516470). W jego ramach przygotowano system opisany w [A25] wykorzystujący techniki RFID do wyeliminowania zasilania w części zdalnej systemu czujnikowego. System ten był zaprojektowany w taki sposób aby zapewnić odporność na narażenia typu HIRF, co potwierdzono przeprowadzając jego testy zgodnie z metodologią norm wojskowych DO-160D oraz prowadząc ostateczne testy na pokładzie niewielkiego odrzutowego pasażerskiego samolotu Falcon firmy Dassault Aviation (przemysłowego partnera w projekcie).

Rozwiązania RFID zaprojektowane początkowo na potrzeby projektu WISE rozwijałem potem w ramach kilku prac dyplomowych (inżynierskich i magisterskich ostatecznie obronionych w latach 2010-2012) realizowanych pod moją opieką. Do najistotniejszych rozwiązań należą układy RFID opisane w [A28][A29][A30] mające na celu sprawdzenie możliwości zastosowania techniki RFID do zdalnego zasilania i komunikacji z czujnikami umieszczonymi na pokładzie niewielkich satelitów oraz weryfikujące możliwość zrealizowania demodulatora dla systemu RFID jako wirtualnego komponentu FPGA zamiast sprzętowej analogowej pętli fazowej wykorzystywanej w pierwszym rozwiązaniu zaprojektowanym w ramach projektu WISE.

c) Modelowanie złożonych systemów grzania mikrofalowego

- [A31] **P. Kopyt**, M. Celuch, "Coupled Electromagnetic-Thermodynamic Simulations of Microwave Heating Problems Using the FDTD Algorithm," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2007; Vol. 41, Iss. 4, pp. 18-29.
- [A32] S. M. Allan, M. L. Fall, E. M. Kiley, **P. Kopyt**, H. S. Shulman, V. V. Yakovlev, "Modeling of Hybrid (Heat Radiation and Microwave) High Temperature Processing of Limestone," *Proc. of the 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2012, ss. 7-11.
- [A33] **P. Kopyt**, "A model of microwave heating effect accounting for cavity radiative heat exchange," *Proc. of the 41st European Microwave Conference (EuMC)*, 2011, pp. 996-999.
- [A34] **P. Kopyt**, W. Gwarek, "Comparison of Selected Thermally Isolating Materials Used in Microwave Sintering in a High-Q Cavity," *Proc. of the 6th International Conference on Microwave Materials and their Applications (MMA 2010)*, 2010, pp. 121-124.
- [A35] **P. Kopyt**, W. Gwarek, "High-Q Applicators for Microwave Processes in Material Science," *Proc. of the 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2010, pp. 1048-1051.
- [A36] **P. Kopyt**, "A one-dimensional semi-analytical model of the microwave heating effect in verification of numerical hybrid modeling software," *Proc. of the International Conference on Computer as a Tool (EUROCON 2007)*, 2007, pp. 65-72.

Jednym z obszarów moich badań prowadzonych po uzyskaniu tytułu doktora było również kontynuowanie prac nad rozwijaniem sprzężonych numerycznych modeli zjawisk grzania mikrofalowego, które zapoczątkowałem w swoim doktoracie. Bezpośrednią kontynuacją tych prac były wyniki opublikowane w [A36], gdzie opisałem pół-analityczny model grzania mikrofalowego przydatny do weryfikowania poprawności działania numerycznych narzędzi obliczeniowych. Kolejnymi etapami badań było modelowanie oraz weryfikacja eksperymentalna zjawisk grzania mikrofalowego zachodzących w próbkach umieszczonych w rezonatorach o dużej dobroci co opisałem w publikacjach [A34] i [A35]. W ramach niewielkiego programu badawczego finansowanego ze środków Politechniki Warszawskiej (Uczelniany Program Badawczy 2009, projekt pt.: „Mikrofalowa synteza z mieszanin proszków o różnej zdolności do absorpcji fal elektromagnetycznych”) przeprowadziłem eksperymenty ze zgrzewaniem w takich warunkach mieszanin syntetycznego diamentu i grafitu uzyskując temperatury dochodzące do 900 °C w krótkim czasie przy zastosowaniu jedynie 50-watowego źródła mocy mikrofalowej, co byłoby niemożliwe przy zastosowaniu wnęki o rozmiarach typowych dla klasycznych laboratoryjnych pieców mikrofalowych. W ramach tego programu rozpoczęto także prace nad opracowaniem numerycznych modeli obliczeniowych zaimplementowanych przy użyciu komercyjnego symulatora elektromagnetycznego (QuickWave 3D) oraz sprzężonego z nim komercyjnego narzędzia do obliczeń przepływowych (ANSYS-Fluent) i umożliwiających uwzględnianie w obliczeniach nie tylko wolumetrycznej generacji ciepła w nagrzewanej próbce oraz przepływu ciepła w jej wnętrzu co opisano już w [A31], ale także wymiany masy w pobliżu ścianek zewnętrznych próbki i konwekcyjnej wymiany ciepła między próbką i jej otoczeniem. Prace te posłużyły następnie do przygotowania zaawansowanego modelu pozwalającego na modelowanie hybrydowych procesów technologicznych, w których grzanie mikrofalowe jest wspomagane dodatkowo grzałkami oporowymi dostarczającymi ciepło drogą radiacyjnej wymiany ciepła. W [A33] przedstawiono wyniki uzyskane za pomocą modelu zbudowanego z narzędzi QuickWave 3D oraz ANSYS-Fluent sprzężonych ze sobą na poziomie systemu operacyjnego poprzez odpowiednie pliki robocze oraz dedykowane skrypty dostosowujące narzędzie ANSYS-Fluent do współpracy z oprogramowaniem QuickWave 3D. Przygotowano również 2-etapową procedurę

przewodzenia sprzężonych obliczeń tego typu. Dodatkowo w narzędziu ANSYS-Fluent wykorzystano procedury obliczania wzajemnej widoczności poszczególnych obszarów grzałek, wnętrza pieca i próbki, co jest konieczne w obliczeniach radiacyjnej wymiany ciepła. Przygotowany w ten sposób sprzężony system symulacyjny wykorzystano następnie we współpracy z Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, USA, gdzie realizowano projekt przemysłowy dotyczący numerycznego modelowania procesu przetwarzania wapienia w hybrydowych piecach mikrofalowo-konwencjonalnych inspirowany potrzebami partnera przemysłowego w tym projekcie – firmy Ceralink Inc. Ohio, USA. Wyniki przeprowadzonych w ramach projektu obliczeń przedstawiono w A32]. Opracowane procedury pozwoliły na precyzyjne przewidywanie ewolucji temperatury wybranych obszarów przetwarzanej próbki podczas nagrzewania jej mikrofalowo oraz za pomocą grzałek z drutu oporowego.

d) Elektromagnetyczne modelowanie efektów nieliniowych we włóknach światłowodowych

[A37] T. Karpisz, B. Salski, R. Buczynski, **P. Kopyt**, A. Pacewicz, “Computationally-efficient FDTD Modeling of Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fibers,” *Optical and Quantum Electronics*, 48:175, Mar. 2016.

[A38] B. Salski, **P. Kopyt**, A. Pacewicz, “On bridging the terahertz gap using four-wave mixing in photonic crystal fibers,” *Proc. 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2016, pp. 1-5

Kolejnym obszarem badań było modelowanie efektów nieliniowych w mikrostrukturalnych włóknach światłowodowych, których konstrukcja umożliwia bardzo precyzyjne kształtowanie ich własności dyspersyjnych. Dzięki temu są one często wykorzystywane jako ośrodki pozwalające na badanie różnorodnych fenomenów nieliniowych takich jak generacja superkontinuum lub wielofalowego mieszania. Jako członek zespołu badawczego pomagałem w przygotowaniu opartych na metodzie FDTD modeli pozwalających na efektywniejsze modelowanie takich zjawisk. Wyniki tych prac zostały opisane w publikacji [A37] poświęconej zjawisku superkontinuum oraz w [A38], gdzie skupiliśmy się na efekcie 4-falowego mieszania i jego potencjalnych zastosowaniach do generowania sygnałów o wybranym widmie.

e) Modelowanie i pomiary tranzystorów typu AlGaIn/GaN HEMT

[A39] B. Salski, J. Krupka, **P. Kopyt**, “Measurement of sheet resistance of GaN-films on a dielectric substrate,” *The European Physical Journal Plus*, vol. 129, nr 184, 2014, ss. 1-9.

[A40] **P. Kopyt**, W. Wojtasiak, D. Gryglewski, W. Gwarek, “Termiczny model tranzystora HEMT na podłożu GaN/SiC”, *Elektronika - konstrukcje, technologie, zastosowania*, SIGMA NOT, nr 9, 2013, ss. 22-25.

[A41] M. Zając, R. Kucharski, P. Kruszewski, P. Prystawko, M. Leszczyński, M. Ekielski, M. Juchniewicz, E. Kamińska, A. Piotrowska, A. Taube, W. Wojtasiak, **P. Kopyt**, J. Krupka, “Progress on highly resistive GaN substrates grown by ammonothermal method,” *Proc. of the 7th Wide Band Gap Semiconductor & Components Workshop*, Frascati, Italy, Sept. 2014.

[A42] R. Doradziński, M. Zając, M. Iwińska, R. Kucharski, R. Dwiliński, L. Sierzputowski, P. Kruszewski, P. Prystawko, M. Leszczyński, E. Litwin-Staszewska, R. Piotrkowski, J. Krupka, M. Juchniewicz, E. Kamińska, A. Piotrowska, A. Taube, W. Wojtasiak, **P. Kopyt**, “Highly resistive AMMONO-GaN substrates for microwave transistors,” *Proc. of the 10th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-10)*, Aug. 2013, Washington DC, USA.

[A43] A. Taube, J. Kaczmarek, **P. Kopyt**, W. Wojtasiak, M. Sochacki, P. Prystawko, W. Gwarek, Z. Żytkiewicz, E. Kamińska, A. Piotrowska, “Modeling and characterization of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors,” *Proc. of the Fall Meeting of the European-Materials-Research-Society (E-MRS)*, Warsaw, Poland, Sept. 2013.

[A44] R. Doradziński, M. Zając, M. Iwińska, R. Kucharski, R. Dwiliński, L. Sierzputowski, P. Kruszewski, P. Prystawko, M. Leszczyński, E. Litwin-Staszewska, R. Piotrkowski, J. Krupka, M. Juchniewicz, E. Kamińska, A. Piotrowska, A. Taube, W. Wojtasiak, **P. Kopyt**, “Progress on purity of conductive and highly resistive GaN substrates grown by ammonothermal method,”

Proc. of the 8th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-VIII), Kloster Seen, Bayern, Niemcy, Oct. 2013.

- [A45] R. Dwiliński, M. Iwińska, R. Doradziński, L. Sierzputowski, R. Kucharski, M. Zając, P. Kruszewski, P. Prystawko, M. Leszczyński, E. Litwin-Staszewska, R. Piotrkowski, J. Krupka, M. Juchniewicz, E. Kamińska, A. Piotrowska, A. Taube, W. Wojtasiak, **P. Kopyt**, “Highly resistive GaN substrates for high frequency electronics,” *Proc. of the European Microwave Week (EMC-2013)*, Nürnberg, Niemcy, Oct. 2013.
- [A46] **P. Kopyt**, D. Gryglewski, W. Wojtasiak, W. Gwarek, „Powtarzalność elektrycznej charakterystyki oprawki zawierającej połączenia drutowe”, *Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania*, SIGMA NOT, nr 9, 2012, ss. 52-55. **wkład: 85%, MNiSW: 8**
- [A47] **P. Kopyt**, D. Gryglewski, W. Wojtasiak, W. Gwarek, “Electrical Characterization of a Wirebonded TO-39 Package for IR Radiation Detectors”, *Proc. 19th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON 2012)*, 2012, pp. 213-216. **wkład: 85%**

Pracowałem także nad metodami charakterystyki i modelowania tranzystorów HEMT typu GaN/AlGaN na monolitycznym podłożu GaN opracowywanych w ramach kilku projektów badawczych realizowanych w Politechnice Warszawskiej (m.in. projektu POIG.01.03.01-00-159/08-00 „InTechFun” oraz projektu PBS1/A3/9/2012 „Pol-HEMT”). W ramach tych projektów brałem udział w charakteryzowaniu w paśmie mikrofalowym kolejnych próbek tranzystorów opracowywanych na różnych podłożach (Si, SiC lub GaN) przez Instytut Technologii Elektronowej (ITE) – partnera w projektach badawczych. Moja praca polegała na przeprowadzeniu ostrzowej charakterystyki wszystkich wytworzonych tranzystorów i próbie wyznaczenia parametrów obwodowego modelu zastępczego tych struktur. W pracach tych korzystałem ze stacji do pomiarów ostrzowych oraz zestawów sond typu G-S-G pracujących w paśmie do 50 GHz. Działania te miały prowadzić do monitorowania postępów prowadzonych prac technologicznych. W efekcie zmierzyłem ponad 200 sztuk tranzystorów i opracowałem zestaw automatycznych procedur dopasowywania modeli obwodowych do wyników pomiarów. Wyniki przeprowadzonych pomiarów były wykorzystywane w publikacjach [A41]-[A45] a zapoczątkowane przeze mnie prace mogły być kontynuowane już bez mojego udziału przez pozostałych członków zespołu badawczego.

Brałem także udział w opracowaniu metody pomiaru rezystywności podłoża GaN za pomocą rezonatora pomiarowego pracującego w paśmie mikrofalowym i opracowywaniu mapy przewodności waferów wykorzystywanych następnie w procesach wytwarzania warstw epitaksjalnych niezbędnych do uzyskania przyrządów typu HEMT. Znajomość rezystywności podłoża jest kluczowa w produkcji przyrządów przeznaczonych do pracy w paśmie mikrofalowym. Wyniki tych badań przedstawiono w [A39].

Jednym z zastosowań badanych tranzystorów są wzmacniacze mocy pracujące w paśmie mikrofalowym. Z tego powodu istotne stają się aspekty termiczne przygotowywanych konstrukcji i umiejętność przewidywania rezystancji cieplnej struktury. Z tego powodu korzystając z oprogramowania ANSYS-Fluent używanego w moich badaniach dotyczących grzania mikrofalowego przygotowałem model termiczny wybranych przyrządów typu HEMT opracowywanych przez ITE oraz oferowanych komercyjnie. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiłem w [A40]. Na uwagę zasługuje duża zgodność oszacowanej przeze mnie wartości rezystancji cieplnej komercyjnego tranzystora AlGaIn/GaN firmy TriQuint z danymi opublikowanymi w nocie katalogowej. Stanowi to ważną weryfikację danych uzyskiwanych przeze mnie dla tranzystorów z ITE, których w tamtym okresie nie badaliśmy termicznie metodami pomiarowymi i wyniki obliczeń były jedynymi danymi, którymi dysponowaliśmy.

f) Defektoskopia laminatów i ich modelowanie elektromagnetyczne

- [A48] **P. Kopyt**, R. Damian, M. Celuch, R. Ciobanu, “Dielectric Properties of Chiral Honeycombs – Modelling and Experiment,” *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 7, Jul. 2010, pp. 1080-1088.

[A49] B. Salski, W. Gwarek, **P. Kopyt**, P. Theodorakeas, I. Hatzioannidis, M. Kouli, A. Y. B. Chong, S. M. Tan, V. Kappatos, C. Selcuk, T. H. Gan, "Portable Automated Radio-Frequency Scanner for Non-Destructive Testing of Carbon-Fibre-Reinforced Polymer Composites," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 35, nr 25, 2016, pp. 1-8.

[A50] B. Salski, **P. Kopyt**, J. Bienias, P. Jakubczak, "RF Inductive Non-Destructive Testing of Carbon Composites," *Proc. 21st International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON-2016)*, 2016, pp. 1-4.

Ostatnim obszarem badań były kompozyty i metody ich testowania. Wyniki badań własności chiralnych mechanicznie nowych konstrukcji kompozytów przedstawiono w [A48], w prestiżowym (IF = 4.5) czasopiśmie poświęconym kompozytom. Wykazano tam za pomocą szeregu przeprowadzonych symulacji elektromagnetycznych, że pomimo chiralnych własności mechanicznych badanych struktur, nie mają one jednocześnie chiralnych własności elektromagnetycznych. Prace te przeprowadzono w ramach międzynarodowego projektu badawczego CHISMACOMB realizowanego w ramach programu FP6.

Do tematyki kompozytów powróciłem po kilku latach biorąc udział w pracach nad opracowaniem skanera pozwalającego na testowanie laminatów warstwowych zbudowanych z włókna węglowego, które są coraz częściej wykorzystywane w lekkich konstrukcjach lotniczych i pływających, a jednocześnie sprawiają trudności w testowaniu i monitorowaniu uszkodzeń. Uszkodzenia takie jak delaminacja (rozwarstwienie się laminatu) są trudne do wykrycia metodami klasycznymi (m.in. prądów wirowych) ze względu na to, że nie zaburzają one przepływu takich prądów. Opisany w [A49][A50] czujnik oraz skaner zbudowany w oparciu o ten czujnik pozwala na szybkie, precyzyjne i nie-niszczące badanie laminatów węglowych stanowi rozwiązanie tego problemu o bardzo dużym znaczeniu dla współczesnego przemysłu lotniczego i stoczniowego.

g) habilitant został wyróżniony następującymi nagrodami:

- Nagroda zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe w 2008-2009 przyznana przez Rektora Politechniki Warszawskiej.
- Wyróżnienie komunikatu pt.: "Development of Multi-Pixel NMOS-based THz Detectors and Readout System Targeted for Spectroscopy Applications" opublikowanego podczas międzynarodowej konferencji *International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES 2016)* nagrodą **Oustanding Paper Award**.

6. Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy ISI JCR, zgodnie z czasem opublikowania:

- wszystkich publikacji: 29.364
- publikacji wchodzących w skład jedno-tematycznego cyklu publikacji: 19.147

7. Liczba cytowań publikacji (wszystkie/bez autocytowań):

- według bazy *Web of Science*: 58/50
- według bazy *Scopus*: 94/69
- według bazy *Google Scholar*: 86/-

8. Indeks Hirscha opublikowanych publikacji:

- według bazy *Web of Science*: 4
- według bazy *Scopus*: 6
- według bazy *Google Scholar*: 5

Literatura:

[B1] M. I. Dyakonov, M. S. Shur, "Shallow Water Analogy for a Ballistic Field Effect Transistor," *Physical Review Letters*, vol. 71, pp. 2465, 1993.

- [B2] M. I. Dyakonov, M. S. Shur, "Detection, Mixing, and Frequency Multiplication of Terahertz Radiation by Two Dimensional Electronic Fluid," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 43, Mar. 1996, pp. 380–387.
- [B3] A. Lisauskas, U. Pfeiffer, E. Öjefors, P. H. Bolivar, D. Glaab, H. G. Roskos, "Rational design of high-responsivity detectors of terahertz radiation based on distributed self-mixing in silicon field-effect transistors," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 114511 (2009)
- [B4] J. Lu, M. S. Shur, J. L. Hesler, L. Sun, R. Weikle, "Terahertz Detector Utilizing Two-Dimensional Electronic Fluid," *IEEE Transactions on Electron Device Letters*, Vol. 19, No. 10, Oct. 1998, pp. 373-375.
- [B5] J. Marczewski, W. Knap, D. Tomaszewski, M. Zaborowski, P. Zagrajek, "Silicon Junctionless Field Effect Transistors as Room Temperature Terahertz Detectors," *Journal of Applied Physics* 118, 104502 (2015).
- [B6] S. Preu, S. Kim, R. Verma, P. G. Burke, M. S. Sherwin, "An Improved Model for Non-Resonant Terahertz Detection in Field-Effect Transistors," *Journal of Applied Physics*, 111, 024502 (2012).
- [B7] M. Sakhno, F. Sizov, A. Golenkov, "Uncooled THz/sub-THz Rectifying Detectors: FET vs. SBD," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 34, Iss. 12, Dec. 2013, pp. 798-814.
- [B8] W. Knap, M. Dyakonov, D. Coquillat, F. Teppe, N. Dyakonova, J. Lusakowski, K. Karpierz, M. Sakowicz, G. Valusis, D. Seliuta, I. Kasalynas, A. Fatimy, Y. M. Meziani, T. Otsuji, "Field Effect Transistors for Terahertz Detection: Physics and First Imaging Applications," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 30, Iss. 8, Aug. 2009, pp. 1319-1337.
- [B9] M. Sakowicz, J. Lusakowski, K. Karpierz, M. Grynberg, W. Knap, W. Gwarek, "Polarization sensitive detection of 100 GHz radiation by high mobility field-effect transistors," *Journal of Applied Physics* 104, 024519 (2008).
- [B10] D. F. Filipovic, S. S. Gearhart, G. M. Rebeiz, "Double-Slot Antennas on Extended Hemispherical and Elliptical Silicon Dielectric Lenses," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, No. 10, Oct. 1993, pp. 1738-1749.
- [B11] X. Huang, T. Leng, X. Zhang, J. Cing Chen, K. Hsin Chang, A. K. Geim, K. S. Novoselov, and Z. Hu, "Binder-free highly conductive graphene laminate for low cost printed radio frequency applications," *Applied Physics Letters*, vol. 106, 203105, May 2015.

