

dr hab. inż. Krzysztof Nyka, prof. PG

22.09.2022

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki,
Politechnika Gdańska,
Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA
RADY NAUKOWEJ DYSCIPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: **Wybrane zagadnienia integracji układów sub-terahercowych.**

Autor rozprawy: **mgr inż. Jakub Jerzy Sobolewski**

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Zagadnienie naukowe, jakim doktorant zajmuje się w pracy, poprawnie związane jest z tytułem rozprawy i zostało jasno sformułowane. Tematyka pracy jest bardzo aktualna, gdyż wpisuje się w trend zajmowania coraz wyższych zakresów częstotliwości w celu zwiększania przepływności systemów komunikacji bezprzewodowej, co znajduje swoje potwierdzenie w przewidywanych planach częstotliwości przyszłych systemów 6G. Zakres sub-terahercowy (sub-THz) jest również atrakcyjny w zastosowaniach niekomunikacyjnych, takich jak obrazowanie oparte na radiolokacji, radiometria wysokiej rozdzielczości do diagnostyki medycznej, monitorowanie atmosfery, czy w systemach bezpieczeństwa. Autor poprawnie wyróżnił w pracy dwa oddzielne aspekty integracji układów – w skali makro (łączenie komponentów o zróżnicowanych technologiach) i w skali mikro (zintegrowane układy monolityczne). Obie te kategorie integracji są istotne i rodzą poważne problemy, które uzasadniają wnikliwe badania i zasługują na poświęcenie im rozprawy doktorskiej. Ciągłe dążenie do poszerzania zakresu integracji w układach monolitycznych i łączenia coraz większej liczby podsystemów (rozwiązania system-in-chip, SiP) wynika z potrzeby obniżania kosztów jednostkowych układów i urządzeń. Z drugiej strony integracja systemów w skali mikro napotka na bariery związane z tym, że optymalizacja poszczególnych składników systemu wymaga różnicowania technologii, co wymusza integrację w skali makro.

Integracja układów sub-THz niesie ze sobą wiele problemów, które nie istnieją lub mają małe znaczenie w zakresach niższych częstotliwości. Doktorant w swojej rozprawie ograniczył się do pewnego wyboru tych zagadnień, co jest zrozumiałe z uwagi na ograniczoną objętość rozprawy. O właściwym wyborze tych zagadnień świadczą następujące fakty: są specyficzne dla sub-THz, mają istotne znaczenie przy projektowaniu układów i systemów, pozwoliły doktorantowi na zaproponowanie oryginalnych rozwiązań.

Na podstawie wstępnych badań, doktorant sformułował następujące tezy, które są poprawnie skorelowane z tematyką i zakresem pracy.

- 1) Możliwe jest tworzenie sub-terahercowych układów integrujących komponenty wykonane w różnych procesach technologicznych wraz z układami antenowym, a głównym ograniczeniem dla

tego typu konstrukcji są wewnętrzne połączenia pomiędzy elementami składowymi, w szczególności wykonane techniką wire bonding.

- 2) Możliwe jest stworzenie sub-terahercowych układów zintegrowanych w jednym procesie technologicznym zawierających elementy aktywne i bierne.
- 3) Możliwe jest zastosowanie jako elementu sterującego w układach zintegrowanych elektrod wykonanych z grafenu, co może skutkować uproszczeniem procesu technologicznego oraz poprawą niektórych parametrów.

Rozprawa ma w zdecydowanej większości charakter doświadczalny, co bezpośrednio wynika z przyjętego zagadnienia naukowego, jednak tam gdzie to było konieczne, została uzupełniona analizą teoretyczną oraz obszernymi badaniami symulacyjnymi.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizy źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosował w przemyśle?

Praca zawiera bardzo obszerny i wnikliwy przegląd stanu wiedzy, odwołujący się do 235 pozycji literatury, który został podzielony i umieszczony w kilku rozdziałach. We wstępie przedstawiono przegląd uzasadniający podjęcie tematu rozprawy, a szczegółową analizę stanu wiedzy umieszczono w rozdziałach 2.1, 3.1 oraz 3.2. Takie rozproszenie przeglądu literatury wynika z bardzo dużej sumarycznej jego objętości (34 strony). Jest też uzasadnione tym, że dotyczy wielu osobnych zagadnień szczegółowych, dla których prezentacja stanu wiedzy powinna być osadzona w odpowiadającym im podrozdziałom pracy. Szczególnie wnikliwy i obszerny jest przegląd stanu techniki dotyczącego układów przełączających do zastosowań w zakresie sub-THz w rozdziale 3.2 – 20 stron i 75 pozycji literatury. Autor wykazał się tu bardzo szeroką i dogłębną wiedzą.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Aby udowodnić postawione w rozprawie tezy, doktorant sformułował następujące cele pracy:

- opracowanie i zbadanie zintegrowanego w skali makro modułu nadawczego na zakres fal milimetrych,
- zbadanie właściwości połączeń drutowych typu „wire bond” w obwodach na pasmo fal milimetrych,
- opracowanie i zbadanie struktur testowych zintegrowanych w skali mikro na przykładzie układów przełączających wygnały w.cz. w zakresie fal milimetrych o różnych topologiach,
- zbadanie możliwości zastosowania w strukturach zintegrowanych elektrod sterujących wykonanych z grafenu.

Powyższe cele zostały poprawie wybrane, choć dość niefortunnie użyto w ich sformułowaniu pojęcia fal milimetrych, które zajmując nominalnie zakres 30-300 GHz zawierają pasma sub-THz (znajdujące się powyżej 90 GHz), jednak nie są z nimi tożsame. Wszystkie zadania badawcze w pracy sięgały pasm sub-THz nawet jeśli obejmowały też niższe zakresy fal milimetrych, co miało miejsce w analizie monolitycznych przełączników. Postawione cele zostały osiągnięte, a tym samym pozwoliły rozwiązać postawione zagadnienie badawcze. Metoda zastosowana do ich rozwiązania została poprawnie wybrana i opierała się na wstępnej analizie teoretycznej zjawisk fizycznych, obwodowych i pełnofalowych symulacjach komputerowych analizowanych struktur testowych oraz ich realizacji i pomiarach.

Komponent weryfikacji eksperymentalny dominował w pracy, co istotnie podnosi wartość praktyczną uzyskanych wyników. Należy podkreślić, że pomiary w zakresie sub-THz wymagają bardzo zaawansowanej aparatury oraz dużego doświadczenia w jej obsłudze, umiejętności poprawnej konfiguracji stanowisk pomiarowych i właściwej interpretacji wyników. Autor w tym zakresie wykazał się bardzo wysokimi kompetencjami.

Bardzo obszerny przegląd stanu wiedzy oraz wnikliwa jego analiza stanowią ważną przesłankę przemawiającą za tym, że autor wybrał właściwe rozwiązania do osiągnięcia postawionych celów rozprawy. Autor przyjął poprawne założenie o dominującym wpływie połączeń drutowych na straty w układzie zintegrowanym nadajnika, skutkiem czego było przeprowadzenie dodatkowej analiza połączeń drutowych. Autor poprawnie odniósł się do wyników prób kompensacji połączeń drutowych poprzez odpowiedni dobór ich długości, stwierdzając, że technika ta ma ograniczenia związane ze zwiększonym promieniowaniem przy długościach porównywalnych do długości fali. Konieczność integracji w skali mikro (w jednym układzie monolitycznym) autor poprawnie wywiódł z tego, że rozwiązania hybrydowe typu system-in-package (SiP) wymagają połączeń między poszczególnymi komponentami modułu, które są odpowiedzialne za degradację wynikowych parametrów systemu. Autor słusznie zaznaczył przy tym, że rozwiązania hybrydowe są nadal konieczne z powodu potrzeby różnicowania technologii optymalnych dla poszczególnych składników systemu, np. anteny w modułach antenna-in-package (AiP).

Na szczególną uwagę i wysoką ocenę zasługuje bardzo wnikliwa analiza związana z opracowaniem, wykonaniem i badaniem układu przełączającego w technologii GaN HEMT z bramką grafenową, który wypełnił w całości podjęte w pracy zagadnienia integracji w skali mikro.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literatury światowej?

Oryginalność rozprawy dotyczy przede wszystkim tych zagadnień i wyników badań, które zostały opublikowane przez autora w liczących się czasopismach lub przedstawione na konferencjach, gdzie referaty przechodzą wnikliwą recenzję. W zakresie tematyki rozprawy doktorant jest współautorem 8 publikacji, z czego 4 są artykułami na konferencjach międzynarodowych (2 na konferencji MIKON oraz 2 na konferencji EuCAP), 3 stanowią artykuły w czasopismach indeksowanych w bazie Web of Science (posiadają impact factor), a jeden to artykuł w Przeglądzie Telekomunikacyjnym. W 7 z tych artykułów doktorant zajmuje czołowe miejsca na liści współautorów, co świadczy o jego istotnym samodzielnym wkładzie – 4 razy pierwszy autor oraz 3 razy autor drugi na 7-8 współautorów lub trzeci na 11 współautorów. Należy pamiętać, że badania prowadzące do rozprawy doktorskiej z zasady prowadzone są pod kierunkiem promotora, nie rzadko też promotora pomocniczego, którzy w naturalny sposób wnoszą swój współautorski wkład do osiągnięć prezentowanych w rozprawie. Powyższe osiągnięcia publikacyjne, mimo iż nie są szczególnie imponujące co do ilości, świadczą o tym, że w rozprawie przedstawiono wystarczająco oryginalny i samodzielny dorobek autora.

Do oryginalnych osiągnięć potwierdzonych publikacjami recenzowanymi należy zaliczyć:

- badania możliwości ograniczania skurczu podłoży w strukturach LTCC,
- badanie struktur LTCC pod kątem wpływu przesunięć przelotek metalizowanych w pomiarach za pomocą ostrzowych sond koplanarnych oraz zaproponowanie wyeliminowania tych efektów poprzez odpowiednio zaprojektowane pola kontaktowych bez przelotek,

- opracowanie zoptymalizowanego przejścia linii mikropaskowej do integracji w skali makro struktur o różnej grubości podłoża,
- opracowanie nadajnika MMIC na pasmo 110 GHz, który stanowił bazę do rozbudowy systemu nadawczego w postaci przykładowego modułu zintegrowanego w skali makro,
- opracowanie obszernego przeglądu wiedzy w zakresie układów sub-terahercowych przełączających (publikacja w IEEE Access),
- opracowanie zintegrowanego przełącznika w technologii GaN HEMT z bramką grafenową.

Do istotnych i oryginalnych osiągnięć należy zaliczyć również zgłoszenie patentowe dotyczące systemu pomiarowego i sposobu pomiaru charakterystyk czasowych przełączanych przyrządów w.cz.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa ma logiczną strukturę i jest starannie zredagowana, mimo drobnych uchybień opisanych w dalszej części recenzji. Autor pisze językiem zwięzłym i bardzo jasno prezentuje sam problem badawczy, poszczególne cele i zadania oraz sposób ich rozwiązywania i wyniki. Prezentowane tezy oraz wyniki poparte są licznymi dobrze przygotowanymi wykresami charakterystyk, starannymi rysunkami projektowanych struktur oraz ich fotografiami.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Biorąc pod uwagę aktualność tematu rozprawy, znaczny poziom trudności zagadnień dotyczących zintegrowanej elektroniki w zakresie sub-THz oraz zawarte w pracy liczne oryginalne rozwiązania o dużym znaczeniu praktycznym i naukowym poparte weryfikacją eksperymentalną, należy wysoko ocenić przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych.

6. Słabe strony rozprawy

Mimo wysokiej ogólnej oceny pracy, niektóre jej elementy budzą pewne zastrzeżenia lub wywołują niedosyt, co rozwinięto poniżej.

- W rozdziale 1.2 (Zakres badań), przy umiejscowieniu prac powyżej 100 GHz brakuje jawnego odniesienia się do pasma sub-teraherców przywołanych w samym tytule rozprawy.
- Początek podrozdziału 2.2.1 (Technologia LTCC) nie dotyczy LTCC, czym bardziej pasuje do podrozdziału 2.1 (Metody integracji...) lub jako oddzielny podrozdział w ramach 2.2 (Analiza możliwości zastosowania SiP...)
- W prezentacji stanu wiedzy dotyczącej monolitycznych przełączników tranzystorowych autor wyróżnił dwa typy układów ultra-szerokopasmowych – *distributed switch* [127] i *travelling wave switch* [129]. Faktycznie, podobnie jak w przypadku wzmacniaczy tranzystorowych, są to dwie zamiennie stosowane nazwy dla tego samego typu układów.
- Do prezentacji wyników symulacji elektromagnetycznych w rozdziale 2 zastosowano dość duży krok częstotliwości wynoszący 5 GHz. Charakterystyki zawierają więc tylko 11 pkt częstotliwości, co mogło zafałszować położenie i głębokość lub wysokość rezonansów. Jest to ważne zwłaszcza w sytuacji, gdyby miało nastąpić lokalne wzmocnienie niepożądanego efektu (np. wzrost współczynnika odbicia).

- Zadanie integracji w skali makro dotyczące zakresu sub-THz ograniczone zostało do połączenia wyjścia układu MMIC z linią mikropaskowa zasilająca szereg anten łutowych oraz do dodania soczewki antenowej.
- Zasadniczym problemem w powyższym zagadnieniu integracji są połączenia drutowe (wire-bonding), którym w pracy poświęcono 7-stronicowy podrozdział, z czego tylko część zajmują samodzielnie uzyskane wyniki, gdyż zawarto w nim też przegląd stosowanych technik ograniczania strat w połączeniach drutowych, które nie zostały przez autora dokładniej zbadane. Wskazane byłoby, aby kompensacji wpływu połączeń drutowych doktorant poświęcił więcej miejsca w pracy, zwłaszcza w zakresie dogłębnej analizy większej liczby niż jednej metody kompensacji. Szczególnie interesujące byłoby zbadanie możliwości redukcji nieciągłości wprowadzanej przez połączenia drutowe poprzez takie ukształtowanie przekroju poprzecznego układu drutów, aby zachowywały się jak dopasowana linia koplarna. Brakuje też szczegółowej analizy, jaki jest udział poszczególnych komponentów strat: stratność materiałów, promieniowanie, niedopasowanie.
- W pracy wyraźnie dominuje podrozdział 3.3 poświęcony jednemu zintegrowanemu układowi przełączającemu, który praktycznie w całości wypełnia część pracy poświęconą integracji w skali mikro. Doceniając oryginalne i wartościowe osiągnięcia doktoranta w tym zakresie oraz znaczenie układów przełączających w systemach komunikacyjnych i trudności związane z ich realizacją w zakresie sub-THz, lektura tej części pracy pozostawia wrażenie dość zawężonego potraktowania zagadnień integracji w skali mikro.

Biorąc jednak pod uwagę i tak znaczna objętość rozprawy (201 stron), taka wrywkowość we wszystkich wskazanych aspektach integracji wydaje się nieunikniona, zważywszy na to, iż zakres zagadnień dotyczących integracji układów sub-THz jest bardzo rozległy i obejmuje problemy stanowiące bardzo poważne wyzwania projektowe. Należy podkreślić przy tym, że autorowi udało się stworzyć spójną i wciągającą opowieść dobrze związaną z tytułem pracy oraz proponującą wiele oryginalnych i cennych rozwiązań.

8. Ocena końcowa rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa porusza aktualny i ważny problem naukowy. Zaproponowane rozwiązania są oryginalne, poprawne i rzetelne przedstawione. Autor udowodnił postawione tezy i osiągnął zamierzone cele. Doktorant zaprezentował obszerną wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie projektowania, realizacji i pomiarów aktywnych i pasywnych układów w.cz. w różnych technologiach (LTCC, MMIC) w bardzo wymagającym zakresie sub-THz. Doświadczalny charakter pracy i staranne rozwiązanie problemu badawczego składają się na jej dużą przydatność dla nauk technicznych. Praca obejmuje bardzo szeroki zakres zagadnień, w którym oba główne komponenty – integracja w skali makro i mikro – mogłyby stanowić temat niezależnych rozpraw doktorskich, przez co jest swoiście nadmiarowa. Reasumując, przedłożona do recenzji rozprawa mgr. inż. Jakuba Jerzego Sobolewskiego spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim z wyraźnym nadmiarem i wnioskuje o jej dopuszczenie do dalszego procedowania, w tym publicznej obrony.



