

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Jakuba Jerzego Sobolewskiego**

pt. Wybrane zagadnienia integracji układów sub-terahercowych

Recenzja dotyczy sposobów integracji układów pracujących w zakresie fal milimetrycznych nazywanych niekiedy zakresem fal sub-terahercowych. Autor skupił się na budowie dwóch rodzajów układów, a mianowicie ich integracji w różnych procesach technologicznych oraz w jednym procesie technologicznym. Na wstępie chciałbym podkreślić że rozprawa obejmuje integrację układów pracujących w zakresie częstotliwości powyżej 100 GHz, gdyż, tutaj metody analityczne stosowane powszechnie w zakresie mikrofal nie zapewniają obliczeń poprawnych parametrów układów i do dzisiaj są przedmiotem licznych wystąpień na konferencjach międzynarodowych i dyskusjach panelowych. W pierwszym przypadku doktorant przeprowadził analizę ograniczeń metod integracji elementów w szczególności połączeń zrealizowanych metodą „wire bond” oraz procesu wytwarzania struktur ceramicznych LTCC. W drugim przypadku przeprowadzona analiza dotyczyła budowy struktury zintegrowanej w jednym procesie technologicznym. W obu przypadkach doktorant przedstawił badania symulacyjne i eksperymentalne wykonanych modelowych struktur układów pracujących w zakresie fal milimetrycznych o częstotliwościach powyżej 100 GHz. Tytuł rozprawy odpowiada jej merytorycznej zawartości.

Cele rozprawy doktorant sformułował w postaci czterech punktów obejmujących opracowanie i zbadanie zintegrowanego modułu nadawczego pracującego w zakresie fal milimetrycznych oraz zbadanie wewnętrznych połączeń drutowych typu „wire bond”. Te dwa cele dotyczyły układu zrealizowanego w różnych procesach technologicznych. Następne dwa cele obejmowały opracowanie i zbadanie struktur testowych układów przełączających sygnały o częstotliwościach milimetrycznych wykonanych w jednym procesie technologicznym oraz zbadanie możliwości zastosowania elektrod sterujących wykonanych z grafenu. Cele rozprawy zostały sformułowane w sposób jasny nie budzący zastrzeżeń, które oceniam pozytywnie.

W rozprawie autor sformułował trzy tezy, które przytaczam dosłownie, aby móc ustosunkować się do nich w dalszej części recenzji.

- 1. Możliwe jest tworzenie sub-terahercowych układów integrujących komponenty wykonane w różnych procesach technologicznych wraz z układami antenowymi, a głównym ograniczeniem dla tego typu konstrukcji są wewnętrzne połączenia pomiędzy elementami składowymi, w szczególności wykonywane 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.*

Podstawowa uwaga recenzenta do sformułowanych tez rozprawy dotyczy faktu, że firmy mikrofalowe np. Pacific Monolithics (USA) czy UMS(USA), które produkują seryjnie podzespoły i systemy monolityczne na zakres fal milimetrowych stosują zarówno różne technologie jak i zintegrowane w jednym procesie technologicznym na jednym podłożu krzemowym Si, arsenku galu GaAs, a od kilku lat azotku galu GaN znają dobrze problem połączeń „wire bond”. Należy w pierwszych dwóch tezach wyraźnie zaznaczyć, że problem ten dotyczy układów pracujących na częstotliwościach większych niż 100 GHz, gdyż na niższych częstotliwościach został on technologicznie rozwiązany. Poza tym tezy rozprawy zostały jasno sformułowane przez autora.

Rozprawa składa się z trzech rozdziałów i posumowania. Łącznie liczy 201 stron wraz z bogatą bibliografią która zawiera 235 pozycji. Układ rozprawy jest poprawny i zawiera wyniki prac naukowych autora bezpośrednio związane z tytułami poszczególnych rozdziałów. Dorobek naukowy doktoranta stanowi 8 publikacji, w których jest współautorem. W tym sześć z nich stanowią wystąpienia na konferencjach międzynarodowych, dwie opublikowane w czasopiśmie międzynarodowych. Doktorant jest również współautorem jednego patentu.

Analiza źródeł, głównie zagranicznych, została przeprowadzona dogłębnie z punktu widzenia tematu rozprawy i opiera się na wszechstronnej analizie 235. pozycji bibliograficznych. Autor wykonał ogromną pracę analityczną i sformułował wnioski będące Jego własnym dokonaniem potwierdzone zarówno symulacjami jak i badaniami eksperymentalnymi wykonanych układów pracujących w zakresie fal milimetrowych o częstotliwości powyżej 100 GHz. I tak w rozdziale 2 doktorant przedstawił stan techniki i metody integracji elementów wykonanych w oddzielnych procesach technologicznych oraz technologii najbardziej przydatnych do integracji anten pracujących w zakresie fal milimetrowych. Następnie dokonał analizy możliwości i ograniczeń dla tego typu anten na przykładzie zintegrowanego modułu nadawczego, z wykorzystaniem technologii ceramiki LTCC, przeznaczonego do pracy na częstotliwości powyżej 100 GHz. Zastosowane metody badawcze oceniam pozytywnie Autor przeprowadził również badania struktur testowych i określił niedoskonałości warstw metalicznych na parametry anteny. W badaniach układów antenowych zaproponował zastosowanie w strukturze zintegrowanej krzemowych soczewek dielektrycznych, w celu uzyskania większego zawężenia wiązki i zarazem zwiększenia zysku energetycznego. Zysk ten zwiększył się o ponad 10 dB. Wyniki badań oraz wnioski pozwoliły na zaprojektowanie i wykonanie zintegrowanego modułu nadawczego. Opracował również układy pomiarowe pozwalające sprawdzić poprawność działania zintegrowanego modułu. Badania wykazały zwiększone straty w torze sygnałowym modułu, które po przeanalizowaniu wynikały głównie z połączeń drutowych typu „wire bond”. Zmniejszenie strat było możliwe, poprzez odpowiedni dobór ich długości. Uzyskane wyniki prac pozwalają na stwierdzenie o zrealizowaniu pierwszej tezy rozprawy. Wyniki badań przedstawione przez autora są obszerne i dotyczą omawianych struktur układów. Wyniki te są zaprezentowane szczegółowo.

W rozdziale 3 opisano i przeanalizowano metody integracji układów nazywane System-On-Chip. Polegają one na łączeniu elementów układów w jednym procesie technologicznym. Przeprowadzona analiza publikacji wykazała istotne ograniczenia tego typu metod dla integracji systemów antenowych. Z jej analizy wynika, że istnieje rozwiązanie polegające na

zastosowaniu struktur hybrydowych, które łączą metody System-on-chip z metodami System-in-Package. Uzyskanie dobrych rozwiązań w tym przypadku jest związane z odpowiednim doborze elementów składowych z punktu widzenia wzajemnych połączeń w torze sygnałowym. Wykorzystanie tutaj urządzeń rekonfigurowalnych jest rozwiązaniem przyszłościowym. Ważnym podzespołem tych urządzeń są układy przełączające, które mają liczne zastosowania w tym rekonfigurowalne systemy antenowe, Z tego powodu autor zaproponował opracowanie koncepcji i projektu układu zintegrowanego w jednej strukturze półprzewodnikowej zawierające elementy czynne i bierne. Opracowane przez autora zintegrowane układy przełączające zostały zbudowane w strukturze AlGaIn/GaN z wykorzystaniem wbudowanych w koplanarną linię transmisyjną aktywnych elementów typu HEMPT. Przeprowadzone badania wykazały bardzo dobre parametry układu tzn. szybkie czasy przełączania rzędu ułamka ns oraz wysoki stosunek izolacji do strat wtrąceniowych na poziomie kilkudziesięciu dB. Ze względu na szybką degradację parametrów w funkcji częstotliwości uniemożliwiało zastosowanie tego rozwiązania w paśmie milimetrowym. Zaproponowane rozwiązanie zostało przez autora zmodyfikowane z konfiguracji o topologii szeregowej do bocznikowej. Uzyskano w ten sposób izolację przełącznika na poziomie 26 dB przy stratach wtrąceniowych poniżej 5 dB na częstotliwości 110 GHz. Osiągnięte rezultaty pozwalają na stwierdzenie o zrealizowaniu drugiej tezy rozprawy. Również w tym rozdziale wyniki badań przedstawione przez autora są obszernie i dotyczą omawianych struktur układów. Wyniki te są zaprezentowane szczegółowo nie budząc zastrzeżeń.

W pracy badawczej nad układami zintegrowanymi w jednej strukturze półprzewodnikowej doktorant zaproponował zastosowanie elektrod sterujących wykonanych z grafenu. Materiał ten o skrajnie niskiej grubości, na poziomie atomowym, wysokiej przewodności elektrycznej oraz możliwości zmian parametrów pod wpływem zmian napięcia i prosty sposób jego nakładania powinien nadawać się do zastosowań w paśmie częstotliwości milimetrowym. Przeprowadzone badania potwierdziły jego przydatność w realizacji układów zintegrowanych w jednej strukturze półprzewodnikowej. Badania wykazały, że struktury przełączników z bramką z grafenu osiągają największe poziomy izolacji w porównaniu z innymi rozwiązaniami oraz obniżają straty wtrąceniowe. Osiągnięte rezultaty pozwalają na stwierdzenie o zrealizowaniu trzeciej tezy rozprawy. Autor rozwiązał postawione cele używając właściwe metody. Przyjęte w rozprawie założenia są uzasadnione.

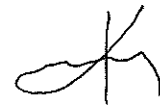
Do oryginalnego dorobku autora rozprawy zaliczam:

- Opracowanie i wykonanie zintegrowanego modułu nadawczego typu System-in-Package integrującego elementy wykonane w różnych procesach technologicznych pracującego na częstotliwości powyżej 100 GHz,
- opracowanie i zbadanie udoskonalonych połączeń typu „bond wire” pracujących na częstotliwościach powyżej 100 GHz,
- opracowanie nowego rodzaju konstrukcji zintegrowanego w jednej strukturze półprzewodnikowej układu przełączającego wykorzystującego elementy aktywne typu HEMPT wbudowane w linię transmisyjną,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych nad zastosowaniem w układach zintegrowanych w jednej strukturze półprzewodnikowej elektrod sterujących wykonanych z grafenu.

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera wiele wyników, które mogą być bezpośrednio zastosowane w praktyce specjalistów zajmujących się analizą, badaniami i projektowaniem

urządzeń pracujących w zakresie fal milimetrowych, w szczególności na częstotliwościach powyżej 100 GHz. To pasmo do dzisiaj jest mało opanowane zarówno analitycznie jak i projektowo. Rozprawa zawiera wiele wskazówek odnośnie analizy, projektowania i pomiarów w tym zakresie częstotliwości. Z tego punktu widzenia oceniam ją wysoko. Stanowi ona istotny wkład autora do metod integracji układów w pasmach fal milimetrowych. Prezentowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wiele oryginalnych badań i analiz w zawartych w rozprawie składa się na tę ocenę. Przedstawione wyniki są przedstawione w sposób jasny nie budzący zastrzeżeń. Z całą pewnością mogę stwierdzić że rozprawa prezentuje zarówno ogólną wiedzę teoretyczną jak i szczegółową w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Autor rozprawy w moim przekonaniu posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Jerzego Sobolewskiego spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące przepisy z wyraźnym nadmiarem i jako taka kwalifikuje się do publicznej obrony. Zaliczam rozprawę do kategorii „e. wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie”



podpis