

dr hab. inż. Daniel Tomaszewski  
SBŁ - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki  
Al. Lotników 32/46  
02-668 Warszawa  
e-mail: daniel.tomaszewski@imif.lukasiewicz.gov.pl

30 września 2022 r.

**Kwestionariusz - Recenzja Rozprawy Doktorskiej  
dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
Politechniki Warszawskiej**

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

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

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, Prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego. Wykonanie recenzji powierzyła mi Rada Naukowa Dyscypliny uchwałą z dn. 21.06.2022 r.

Przedstawiona recenzja zawiera ocenę rozprawy wg warunków określonych w art. 187 ust. 1-2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

**1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrzone w pracy (cel, teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

W rozprawie Autor podjął ważny z praktycznego punktu widzenia problem integracji elementów elektronicznych celem wytworzenia układów działających w subterahercowym (sub-THz) pasmie częstotliwości. Ten zakres widma promieniowania EM (długość fali rzędu mm) jest interesujący z powodu możliwości zastosowania w szerokopasmowych systemach łączności bezprzewodowej, radiolokacji, astronomii, technikach obrazowania i spektroskopii. W związku z tym tematyka układów sub-THz jest przedmiotem wielu prac badawczych. Prace te mają na celu m.in. opracowanie wydajnych zminiaturyzowanych źródeł i odbiorników/detektorów promieniowania sub-THz, opracowanie opisu działania przyrządów elektronicznych (biernych i aktywnych), uwzględniającego rozproszony charakter zjawisk odpowiadających z przepływ sygnałów elektrycznych, budowę funkcjonalnych urządzeń elektronicznych oraz opracowanie konstrukcji układów pomiarowych, technik pomiarów i metod interpretacji ich wyników. Przynajmniej częściowo problemy te są rozwiązane zarówno w mikrofalowym jak i optycznym zakresie częstotliwości. Sub-THz część widma promieniowania EM jest określana zatem terminem "THz gap".

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Sobolewskiego składa się z 4 rozdziałów. Rozdział 1. uzasadnia podjęcie prac uwieńczonych rozprawą, określa zakres badań oraz formułuje tezy i cele rozprawy. Inspiracją do pracy było zauważenie na podstawie pogłębionych studiów literaturowych oraz doświadczeń Zespołu, w którym Doktorant prowadził badania, luk i trudności w zakresie metod integracji elementów elektronicznych czynnych i biernych oraz anten w jednym miniaturywanym obudowanym układzie sub-THz. Dzięki technologiom mikroelektronicznym elementy czynne i bierne mogą być łatwo zminiaturyzowane. Natomiast rozmiary anten są określone długością fali promieniowania (rzędu mm). Dysproporcja rozmiarów nie sprzyja integracji elementów układu. Inną przyczyną jest konieczność uwzględnienia w pracy układu terahercowego wzajemnego oddziaływania pola i elementów układu (np. połączenia drutowe układu mikroelektronicznego z wyprowadzeniami na obudowie mogą działać jak pasożytnicze anteny). Po określeniu zakresu prac (rozd. 1.2.) Autor formułuje w rozdz. 1.3. trzy tezy rozprawy.

Wyrażają one możliwość integracji przyrządów (i) wykonanych w różnych procesach, (ii) przyrządów wytworzonych w jednym procesie oraz (iii) wykorzystania elektrod grafenowych w przyrządach mikroelektronicznych dla układów sub-THz. Dla wykazania prawdziwości tez Autor postawił sobie następujące cele: (i) opracowanie i zbadanie modułu nadawczego zakres sub-THz w skali makro, (ii) zbadanie właściwości połączeń drutowych w pasmie sub-THz, opracowanie, (iii) zbadanie zintegrowanych monolitycznie struktur testowych (przełączników sygnałów w.cz.) oraz zbadanie możliwości zastosowania elektrod grafenowych w elementach dla układów sub-THz. Rozdziały drugi i trzeci przedstawiają drogi dojścia do w.w. celów. **W stosunku do konstrukcji rozdz. 1.1. mam uwagę, że jego druga część zawiera opis prac a nie motywacji.**

Rozdział 2. jest poświęcony tematyce integracji układów sub-THz w jednej obudowie (układy klasy SiP), skonstruowanych z elementów wytworzonych w różnych procesach technologicznych. Rozpoczyna go obszerny przegląd piśmiennictwa, w którym Autor przeprowadza krytyczną dyskusję szeregu rozwiązań konstrukcyjnych takich jak *split-block* z falowodami metalowymi i metalizowanymi z tworzyw sztucznych. Głównym problemem konstrukcji *split-block* są rozmiary obudów i długość połączeń pomiędzy układami scalonymi w.cz. (u.s.) i innymi elementami umieszczonymi w obudowach, oraz połączeń ze "światem zewnętrznym", przez które sygnały w.cz. są doprowadzane do i odbierane z układów sub-THz. Problemem jest także integracja anten. Lepszą funkcjonalnie integrację u.s. z antenami zapewniają technologie LTCC umożliwiające wytwarzanie anten na pasmo milimetrowe oraz wytworzenie struktur przestrzennych z wbudowanymi falowodami. Doktorant poświęca wiele uwagi tym rozwiązaniom. Omawia sposoby eliminacji ich wad. Przykładowo, cechą folii ceramicznych stosowanych w technologiach LTCC jest zdolność do propagacji fal powierzchniowych wzbudzanych przez promieniujące anteny. Dla zapobieżenia tym stratom opracowano techniki integracji folii ceramicznych z foliami o niskiej przenikalności dielektrycznej. Autor omawia dalej kwestie związane m.in. z obudowami układów sub-THz wykonanymi z żywic, połączeniami kulkowymi układów w.cz. z płytkami PCB (podobieństwo do technologii *flip-chip* łączenia struktur półprzewodnikowych). Techniki te pozwalają na dalsze zmniejszenie strat oraz skrócenie połączeń.

Konstrukcyjno-eksperymentalna część pracy rozpoczyna się od pomiarów przenikalności dielektrycznej ( $\epsilon_r$ ) i stratności ( $\text{tg}\delta$ ) kilku typów podłoży LTCC. Pomiarów te, wykonane na stanowisku opracowanym w macierzystym Instytucie Politechniki Warszawskiej miały na celu weryfikację parametrów folii dostępnych na rynku. Wyniki pomiarów przenikalności dielektrycznej różnią się od specyfikacji o nie więcej niż 10%. Autor omawia dalej pomiary struktur testowych na podłożach LTCC. Były to odcinki linii paskowych wyposażone w pola kontaktowe dwóch typów: bez przelotek (ze sprzężeniem pojemnościowym) i z przelotkami. Obserwacje mikroskopowe ujawniły jednak możliwość występowania wad metalizacji przelotek. Symulacje elektromagnetyczne i pomiary struktur z polami kontaktowymi posiadającymi przelotki pokazały z kolei, że ich dopasowanie impedancyjne jest lepsze, lecz charakterystyki są wrażliwe na ew. rozcentrowanie warstw struktur LTCC. Czynniki te spowodowały, że dalsze eksperymenty prowadzono z użyciem struktur testowych z polami kontaktowymi bez przelotek. **W tym miejscu nasuwają się pytania o wytwórcę struktur LTCC oraz o oprogramowanie do symulacji EM.**

Pomiary planarnych struktur testowych LTCC Autor przeprowadził z użyciem sond GSG na zaprojektowanym przez siebie stanowisku do pomiarów w.cz. Pomiarów takie wymagają dwustopniowej kalibracji. Drugim etapem jest kalibracja sond pomiarowych z użyciem dedykowanych struktur testowych. Autor przeprowadził kalibrację sond metodą SOLT z użyciem wzorców dostarczonych przez producenta sond oraz metodą TRL z użyciem wzorców na wytworzonych w ramach pracy podłożach LTCC. Dalsze pomiary struktur testowych LTCC wykazały wyższość kalibracji sond z użyciem wzorców na takim samym podłożu LTCC. Podobny wynik uzyskał Autor w przypadku symulacji i pomiarów współczynników odbicia ( $S_{11}$ ) i transmisji ( $S_{21}$ ) mikropaskowych anten łutowych i szyków anten łutowych na podłożach LTCC. **Taki wniosek jest wartościowy, ale dość oczywisty. Technologia wytworzenia struktur testowych powinna być identyczna z technologią wytworzenia struktur funkcjonalnych.** W tej części pracy Autor drobniaczkowo analizuje wpływ niejednorodności podłoża na efektywną przenikalność

dielektryczną ( $\epsilon_{ef}$ ), która przekłada się na charakterystyki anten. Jest to moim zdaniem istotny punkt pracy, ponieważ od założonej wartości  $\epsilon_{ef}$  zależy projekt anteny. Autor słusznie stwierdza, że wartość ta winna być określona poprzez pomiary struktur testowych, a nie wyłącznie za pomocą pomiarów  $\epsilon_r$  podłoży LTCC w wolnej przestrzeni.

W kolejnej części pracy Autor szczegółowo rozważa topografię przejścia antena - linia mikropaskowa. Celem tych prac był dobór topografii, która daje zadowalające wartości wartości współczynników odbicia  $|S_{11}|$  i współczynników transmisji  $|S_{21}|$ . Odniesieniem była konstrukcja anteny określona metodami optymalizacji. Rozważane są m.in. kształt przejścia, zmiana szerokości linii, zmiana grubości podłoża, obecność wnęki pod linią, a także wpływ zmian konstrukcji wynikających z rozrzutów produkcyjnych. Badania prowadzone były za pomocą symulacji EM. Na ich podstawie Autor proponuje wariant przejścia (C) zapewniający najlepszą odporność na rozrzuty produkcyjne, łatwość wykonania oraz zadowalające wartości  $|S_{11}|$  i  $|S_{21}|$ . Jest to kolejny wartościowy aplikacyjnie element rozprawy. **Warto byłoby jednak podać informację o sposobie określenia optymalnej struktur. Mam także wątpliwość co do stwierdzenia, że wahania szerokości linii mikropaskowej mają niewielki wpływ na charakterystyki anteny, podczas gdy wg tabeli 3 względna zmiana szerokości linii o 2% powoduje zmianę  $|S_{11}|$  o 25%.**

W kolejnym punkcie rozprawy Doktorant rozważa projekt soczewki dla opracowywanego zintegrowanego modułu nadawczego. W tym celu Autor przeprowadził dwie pełnofalowe symulacje rozkładu pola EM w układzie soczewka w wolnej przestrzeni. Soczewka o większym promieniu krzywizny wykazała lepsze skupienie energii pola. Następnie Autor wykonał symulacje w układzie wybrana soczewka na transformatorze impedancji. Zastosowanie transformatora pozwoliło na wyraźną redukcję odbić i zwiększenie natężenia pól E i H pod transformatorem. Autor wykonał także symulacje EM dla różnych rezystywności soczewek krzemowych, które wykazały dobre właściwości soczewki dla rezystywności nie mniejszej niż 1 k $\Omega$  cm. W celu dobrania typu anteny dla układu soczewka-antena Autor porównał charakterystyki anteny łańcuchowej i szyku dwóch anten łańcuchowych. Wykazał, że drugie rozwiązanie posiada większy zysk kierunkowy. Następnym krokiem były symulacje układu soczewka na transformatorze-antena lub 2-elementowy szyk anten, dla różnych odległości soczewki od anten. Pokazały one (i) odległość, dla której zysk kierunkowy jest największy oraz (ii) znacznie mniejszą zależność zysku kierunkowego od odległości w przypadku szyku antenowego, co jest korzystne z punktu widzenia realnej konstrukcji. Na koniec Autor przeprowadził pełnofalowe symulacje opracowanego projektu z uwzględnieniem szczegółów soczewki, transformatora i jego podparcia, właściwości płaszczyzny masy. Wyzначzył charakterystyki kierunkowe, które były bardzo zbliżone do uproszczonego modelu. W ten sposób projekt anteny został ukończony. Jest to dla mnie interesująca część pracy. pokazuje metodyczne podejście do integracji. Ciekawe są dla mnie ilustracje odbić i interferencji pola EM padającego na soczewkę oraz wpływu konstrukcji układu soczewka-antena na charakterystyki całego promiennika. **Proponowałbym jedynie dodatkowo umieścić w rozdz. 2. informację o symulatorze.**

Końcowy fragment rozdziału 2. przedstawia prace w zakresie konstrukcji kompletnego nadajnika sygnału wyjściowego o projektowanej częstotliwości 110 GHz. Układ scalony został opracowany we współpracy z trzema firmami. Wykonany został w IHP w 130 nm technologii SiGe BiCMOS. Autor opisuje schemat blokowy układu, a następnie stanowisko do pomiarów w.cz. oraz metodykę i wyniki pomiaru mocy wyjściowej u.s. w funkcji częstotliwości. Maksimum uzyskanej mocy zostało uzyskane dla częstotliwości 108.5 GHz bliskiej częstotliwości projektowanej. Pomiary kilku struktur dały powtarzalne wyniki. Następnie Autor opisuje szczegółowo konstrukcję zintegrowanego modułu nadawczego. Został on zainstalowany w zautomatyzowanym stanowisku sterowanym aplikacją MATLAB, wyposażonym w pomiarową głowicę falowodową. Dla częstotliwości 108.5 GHz Autor przeprowadził pomiary zastępczej mocy EIRP nadajnika w funkcji odległości soczewki od anteny i określił odległość optymalną 3.84 mm, nieco mniejszą od odległości wcześniej określonej npdst. symulacji układu soczewka-antena. Następne pomiary wykazały lepsze ukierunkowanie promieniowania emitowanego przez antenę z soczewką niż bez niej. Wykazały one jednak wysoki poziom strat w układzie antenowym. Dalsze rozważania były poświęcone zidentyfikowaniu źródła strat. W tym celu Autor opracował trójwymiarowy model

zawierający fragment u.s. z linią mikropaskową doprowadzającą sygnał wyjściowy do pola montażowego oraz połączenia drutowe pól montażowych w u.s. z polami masy i linią zasilającą antenę. Za pomocą symulacji pełnofalowej wyznaczył rozkład pola emitowanego przez linię mikropaskową, połączenia drutowe i linię zasilającą antenę. Wyznaczył też zależność współczynnika transmisji od częstotliwości. Obliczenia wskazały, że linie przewodzące są głównym źródłem strat w układzie antenowym. Dla potwierdzenia Autor wykonał serię pomiarów parametrów macierzy rozproszenia połączeń drutowych par pól kontaktowych. Wykazały one wyraźną zależność położenia pasma przepustowego od długości połączeń, a zatem możliwość ograniczania strat w połączeniach. Ten interesujący rozdział unaocznia skalę trudności w projektowaniu urządzeń w.cz. zbudowanych z elementów wytworzonych w osobnych procesach ("quasi-dyskretnych"), w ich pomiarach i interpretacji wyników. Dla mnie osobiście bardzo interesujące są wyniki symulacji emisji pola EM przez linie przewodzące. Mogą być przydatne w pracach nad detektorami promieniowania sub-THz z wykorzystaniem tranzystorów z efektem połowym.

W podsumowaniu, w części pracy dotyczącej integracji układów sub-THz z elementów wytworzonych w różnych procesach Autor pokazuje drogę systematycznego rozwiązania *krok po kroku* złożonych zadań mających na celu opracowanie, testowanie i integrację podzespołów oraz ich połączenie w moduł nadawczy SiP. To, że opracowane urządzenie nie wykazuje oczekiwanego zysku kierunkowego nie umniejsza w.w. osiągnięcia. Co więcej, Autor zidentyfikował przyczynę i wskazał na możliwość korekt projektu. **Uważam, że cele pracy (i), (ii) zostały osiągnięte, a zatem teza (i) została wykazana.**

W rozdziale 3. rozprawy Autor opisuje prace w zakresie integracji mikroelektronicznych układów na pasmo milimetrowe (układy klasy SoC). Umożliwia ona implementację wielu funkcji układów sub-THz w układzie scalonym, a zatem istotną redukcję długości połączeń w porównaniu z układami typu SiP. Ze względu na długość fali możliwa jest także integracja anten. Z drugiej strony podłoża półprzewodnikowe posiadają wysokie wartości przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$ . Powoduje to emisję większej części promieniowania do podłoża i silną absorpcję promieniowania przy standardowych poziomach domieszkowania materiału półprzewodnikowego. Autor omawia krótko metody redukcji energii promieniowania sub-THz rozpraszanego w niekontrolowany sposób. Dalej, zwraca uwagę na dynamiczny rozwój rekonfigurowalnych układów w.cz. wymagających szybkiego przełączania sygnałów o częstotliwościach sub-THz. Integracja takich układów na poziomie mikro jest niezbędna dla dalszego rozwoju technik wysokich częstotliwości. Dalsza część pracy jest poświęcona temu zagadnieniu.

Autor omawia realizację układów przełączających z wykorzystaniem tranzystorów MOS, SiGe HBT, DHBT na bazie InP, GaN HEMT i in., diod PIN, struktur MEMS, materiałów PCM, materiałów dwuwymiarowych (np. grafenu). **Rozdział ten zawiera wiele szczegółowych danych o grupie przyrządów spoza zakresu pracy. Wydaje mi się, że rozdział zyskałby na przejrzystości, gdyby Autor tylko wymienił je z odesłaniem do literatury lub zestawił dane w zwarty sposób, np. w formie tabeli. Ponadto chciałbym zwrócić uwagę, że podłoża SOI z warstwą szafiru (SOS) są obecnie na pełnym marginesie. Tranzystory SiGe HBT nie są wykonywane na podłożach SiGe, lecz są wytwarzane na podłożach Si i tylko obszar bazy w tych tranzystorach jest tworzony metodą epitaksji SiGe.**

Zasadnicza część rozdziału 3. dotycząca opracowania i badania układu przełączającego w.cz. zintegrowanego jako struktura AlGaIn/GaN z bramką grafenową rozpoczyna się omówieniem właściwości struktury AlGaIn/GaN i mechanizmu indukowania warstwy 2DEG. **Chciałbym dodać, że polaryzacja na granicy AlGaIn/GaN nie jest wystarczająca do utworzenia 2DEG. Istotna jest jeszcze skokowa zmiana położenia dna pasma przewodnictwa, która powoduje "ścieśnienie" elektronów indukowanych polaryzacją i utworzenie 2DEG na granicy AlGaIn/GaN.** Następnie Autor opisuje konstrukcję monolitycznego układu przełączającego z tranzystorem AlGaIn/GaN na podłożu SiC z bramką grafenową połączonym szeregowo z koplanarną linią transmisyjną. Struktury tranzystorów zostały wykonane w laboratorium UNIPRESS. Pierwszym etapem badań były pomiary typoszeregów testowych tranzystorów za pomocą sond GSG stawianych na wyprowadzeniach źródeł i drenów. Sondy wykorzystano także do polaryzacji źródeł i drenów napięciem stałym względem masy układu. Bramki

tranzystorów były połączone z masą układu. Pomiar współczynnika transmisji wykonano w dwóch zakresach częstotliwości. Wyniki są przedstawione na rys. 3.24, 3.25. Widoczna jest wyraźna zależność od polaryzacji DC. Wykresy są symetryczne względem linii  $V_{DC, ch1} = V_{DC, ch2}$ . Jest to zgodne z oczekiwaniem, ponieważ tranzystory są symetryczne. Widoczna jest także prawidłowa zależność od rozmiarów tranzystorów. Kierunek zmian współczynnika transmisji ze zmianami rozmiarów jest zgodny z oczekiwanymi zmianami charakterystyk stałoprądowych. Nieco zastanawiająca jest różnica pomiędzy charakterystykami tranzystorów E4, H4, gdyż oczekiwane konduktancje kanału proporcjonalne do  $W/L_G$  nie powinny różnić się istotnie. Interesujące byłoby zatem zestawienie zmierzonych wartości współczynnika transmisji z charakterystykami stałoprądowymi. Z drugiej strony, zgodnie ze stwierdzeniem Autora bardziej istotne dla ch-k w.cz. mogą być straty związane ze zmianami przewodności bramki.

Następnie Autor wyznaczył charakterystyki współczynnika odbicia  $|S_{11}|$  i  $|S_{21}|$  od częstotliwości w stanie przewodzenia i nieprzewodzenia dla typoszeregów tranzystorów o stałej długości i zmiennej szerokości bramki oraz o stałej szerokości i zmiennej długości bramki. Autor prezentuje w rozprawie dyskusję wyników. Podkreśla rolę obszarów kanału niekontrolowanych polem bramki, a zatem pozostających w stanie włączenia. **Uważam, że w pierwszym wypadku w zakresie niskich częstotliwości ujawnia się dominująca rola przewodności kanału i sprzężenie sygnału w.cz. z 2DEG jest lepsze niż w przypadku wysokich częstotliwości. Stąd wynika obserwowana na rys. 3.28 zależność współczynników transmisji i odbicia od stosunku  $W/L_G$ . Natomiast w zakresie wysokich częstotliwości ujawnia się dominująca rola przewodzenia przez bramkę. Widać to na podstawie wzrostu współczynnika transmisji w zakresie nieprzewodzenia do wartości w zakresie przewodzenia. O roli obszarów kanału niekontrolowanych polem bramki świadczy porównanie charakterystyk na rys. 3.28 i 3.29. Bez szeregowo włączonych obszarów przewodzących w.w. efekty są bardziej wyraźne. Na pewne zmniejszenie współczynnika transmisji w tym wypadku może wpływać znacznie większa pojemność bramka-kanał w stanie przewodzenia i bramka-źródło, tzw. *fringing capacitance* w stanie włączenia.** Dodatkowo Autor opisuje pomiary czasów przełączania badanych struktur. Zdaniem Autora dały one zadowalające wartości z punktu możliwości przełączania sygnałów w.cz. Z drugiej strony czasy te odpowiadają częstotliwościom rzędu  $10^6$ - $10^7$  Hz. A więc czy takie stwierdzenie jest uprawnione? Dalej Autor proponuje małosygnałowy model zastępczy składający się z elementów biernych. Przedstawia parametry tego modelu określone na podstawie danych materiałowych, jak rozumem także danych konstrukcyjnych i pomiarów, głównie stałoprądowych. Nasuwa się tu pytanie, jak zostały określone parametry  $C_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ? Autor interpretuje jeszcze raz wyniki pomiarów parametrów S na podstawie charakterystyk modelu małosygnałowego. Wykazuje dobrą zgodność zmierzonych charakterystyk parametrów  $S_{mn}$  z wyznaczonymi npdst. modelu małosygnałowego. Wreszcie Doktorant określa główne problemy dotyczące badanych struktur: sprzężenia pojemnościowe, rezystancja kanału i defekty warstwy grafenu. Dwa pierwsze parametry mogą być korygowane przez odpowiedni projekt (np. skrócenie bramki). Defekty są kwestią stopnia dojrzałości procesy technologicznego.

Następnie Autor opisuje projekt struktur testowych układów przełączających AlGaIn/GaN o topologii bocznikowej. Wstępem do tego opracowania były symulacje EM kilku wariantów struktur. Na ich podstawie wyznaczył współczynniki odbicia i transmisji i skonstruował proste modele zastępcze dla dwóch struktur w stanie włączenia i wyłączenia. Na podstawie tych wyników Autor zmodyfikował strukturę testową, w której znalazły się elementy z bramkami metalowymi i grafenowymi. Uwzględnił przełączniki jedno- i dwustopniowe z bramką o kontakcie lateralnym i wertykalnym. W tych rozwiązaniach sygnał w.cz. i polaryzacja przełącznika były doprowadzane wspólnym torem. Ponadto zostały uwzględnione dwie struktury z bramką o kontakcie wertykalnym i osobnymi torami dla sygnału w.cz. i polaryzacji. Autor przeprowadził pomiary współczynników transmisji i odbicia wytworzonych struktur. W pracy przedstawia obszernie wyniki pomiarowe i ich dyskusję.

W konkluzji rozdziału 3. rozprawy Autor stwierdza, że zaproponowane struktury przełączników na podłożu AlGaIn/GaN z bramką grafenową są realizacją monolitycznej integracji układu działającego w zakresie częstotliwości do 2 GHz. Nie jest to częstotliwość sub-THz. Powodem jest topologia szeregowo

przełącznika wykazująca duże pojemności pasożytnicze. Zaproponowana topologia bocznikowa pozwala na wyraźne poszerzenia pasma częstotliwości. Autor stwierdza, że możliwe jest zastosowanie w przełącznikach AlGaIn/GaN bramki o kontakcie zarówno lateralnym jak i wertykalnym. Możliwe jest także zastosowanie konfiguracji zarówno ze wspólnym torem w.cz. i DC jak i z torami odseparowanymi. Wreszcie Autor stwierdza, że możliwe i korzystne jest zastosowanie w przełącznikach bramki grafenowej. W tym celu jednak wskazana jest poprawa jakości procesu nakładania warstw grafenu.

Reasumując, uważam, że cele (iii) i (iv) pracy zostały osiągnięte mimo, że zakresy częstotliwości pracy proponowanych struktur nie leżą w pasmie sub-THz. Doktorant jest tego świadomy i wskazuje drogę dalszych działań. Uważam zatem tezy (ii) i (iii) z wykazane. Zatem uważam pracę za wykonaną z sukcesem.

Przedstawiona praca ma charakter zdecydowanie techniczny i doświadczalny z istotnym wkładem symulacji EM. Doktorant metodycznie i z sukcesem rozwiązał wszystkie zadania konstrukcyjno-projektowe, symulacyjne i pomiarowe. Kolejne etapy były wykonywane z wykorzystaniem wyników i wniosków z etapów poprzednich. Metodyczność badań jest bardzo pozytywnym aspektem pracy.

Uważam, że Autor zaprezentował w rozprawie kilka oryginalnych rozwiązań:

- Zaproponował systematyczną metodykę konstrukcji urządzeń do pracy w pasmie w.cz. wykorzystującą zaawansowane symulacje EM, struktury testowe; są to zagadnienia bardzo trudne, gdyż w polu EM w.cz. przyrządy zarówno dyskretne jak i zintegrowane zachowują się jak elementy o stałych rozproszonych i zawodzi wiele technik projektowania znanych z dziedziny DC, m.cz., mikrofal;
- Opracował ciekawe struktury testowe do pomiarów anten, tranzystorów w dziedzinie w.cz.;
- Opracował kilka systemów pomiarowych w dziedzinie w.cz, w tym złożony system do pomiarów emisji promieniowania z użyciem zintegrowanego w skali makro nadajnika w.cz.;
- Wziął także udział w zaprojektowaniu tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT, których wytworzone zostały układy zintegrowane w.cz.

Z uwagi na w.w. osiągnięcia i charakter pracy ma ona z pewnością duże znaczenie praktyczne.

Przedstawiona rozprawa zawiera obszerną bibliografię, liczącą 235 pozycji. Mgr inż. Jakub Sobolewski jest współautorem sześciu publikacji oraz jednego zgłoszenia patentowego. Jedna z publikacji została zamieszczona w wydawnictwie IEEE. Analiza i dyskusja piśmiennictwa jest właściwa. Autor opisuje w rozprawie poszczególne etapy precyzyjnie, czasem zbyt drobiazgowo. Mimo, że zauważyłem kilka błędów edytorskich, uważam, że rozprawa została przygotowana starannie. Bardzo pożytecznym elementem rozprawy jest wykaz skrótów.

Nie zauważam w zasadzie słabych stron przedstawionej rozprawy. Wszystkie uwagi przedstawiłem przy omawianiu zawartości rozprawy.

**Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

**Podsumowanie**

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr. inż. Jakuba Sobolewskiego p.t.: "Wybrane zagadnienia integracji układów sub-terahercowych" spełnia wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o

przedstawione opracowanie projektowe, konstrukcyjne i technologiczne, wykazuje dobrą wiedzę teoretyczną a zwłaszcza umiejętności praktyczne kandydata w dziedzinie projektowania i miernictwa układów elektronicznych w.cz. oraz ilustruje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedstawione osiągnięcia rozprawy lokują ją w pełni w dyscyplinie **Elektronika**, a tym bardziej w dyscyplinie **Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika** (wg nowej klasyfikacji). Rozprawa uzasadnia wniosek Doktoranta o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr.inż. Jakuba Sobolewskiego do publicznej obrony rozprawy przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

*Daniel Tomaszewski*  
podpis

