

Warszawa 30.08.2017

ppłk dr hab. inż. Norbert Pałka
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Cezarego Kołacińskiego

pt. „**Wielokanałowe, scalone systemy odczytowe dla detektorów THz opartych o tranzystory polowe, pobudzanych niemodulowaną wiązką promieniowania**”

przygotowanej pod opieką naukową promotora dr hab. inż. Jacka Marczewskiego, prof. ITE

1. Uwagi wstępne

Podstawą opracowanej recenzji jest pismo pani prof. dr hab. inż. Anny Piotrowskiej, Dyrektora Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie, z dnia 17 lipca 2017 (1DP/W/0471/17).

Nadesłana do recenzji rozprawa doktorska składa się w zasadniczej części z wprowadzenia, pięciu rozdziałów oraz podsumowania wraz z omówieniem uzyskanych wyników, co zostało zawarte na 150 stronach. W dalszej części pracy znajduje się bibliografia obejmująca 192 pozycje odnoszące się w większości do anglojęzycznych artykułów i doniesień konferencyjnych oraz dwa załączniki. Całość rozprawy składająca się z części merytorycznej oraz uzupełniającej jest zawarta na 180 stronach.

Podstawą recenzji są ustawowe wymagania¹ stawiane rozprawie doktorskiej, która „(...) powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub **oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne** (...), oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej (...)”. Ponadto, „Rozprawę doktorską może stanowić **praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna** (...)”.

2. Znaczenie podjętej tematyki

Od około 30 lat obserwujemy znaczny wzrost zainteresowania promieniowaniem terahercowym z zakresu około 0,1-10 THz. Ten trend jest związany z szeregiem ciekawych własności i unikalnych zastosowań m.in. w bezpieczeństwie, badaniach nieniszczących materiałów, obrazowaniu, badaniach podstawowych (np. spektroskopia), astronomii czy telekomunikacji szerokopasmowej. Rozwój techniki terahercowej wymagał i nadal wymaga

¹ Art. 13. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz. U. nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami.

znacznego postępu w opracowywaniu tanich i prostych w użyciu źródeł i detektorów promieniowania.

Spośród wielu typów detektorów promieniowania THz, które budzą zainteresowanie środowiska, na szczególną uwagę zasługuje tranzystor polowy (FET). Posiada on szereg zalet: wysoką czułość i szybkość, pracuje w temperaturze pokojowej oraz co bardzo ważne jest tani w masowej produkcji (dojrzała technologia krzemowa) i umożliwia opracowanie matryc detektorów. Ten typ detektorów jest badany w Europie w kilkunastu grupach m.in. W. Knapa z Uniwersytetu Montpellier, H. Roskosa z Uniwersytetu Goethego z Frankfurtu, U. Pfeiffera z Uniwersytetu w Wuppertalu a w Polsce w zespole J. Łusakowskiego z UW i J. Marczewskiego z ITE, w którym właśnie pracuje C. Kołaciński.

Jednakże sam detektor FET to element (chip) o niewielkich rozmiarach, którego odpowiedź napięciowa najczęściej nie przekracza mV. Zważywszy, że powszechnie dostępne źródła promieniowania terahercowego nie przekraczają dziesiątek mW, w praktyce rejestracja promieniowania odbywa się przy pomocy techniki detekcji fazoczułej z zastosowaniem wzmacniacza fazoczułego (*lock-in*), co pozwala mierzyć słabe sygnały w obecności dużych szumów. Niestety, technika ta wymaga modulacji (elektrycznej lub mechanicznej) źródła promieniowania oraz sprzężenia źródło-detektor, co zwiększa komplikację układu oraz ogranicza częstotliwość modulacji sygnału użytecznego. Ponadto, wzmacniacze fazoczułe są najczęściej duże i dość drogie. Wszystko to powoduje, że praktycznie trudno jest zrealizować tani i praktyczny układ składający się z wielu kanałów.

Naturalnie pojawiła się więc zrealizowana przez Doktoranta koncepcja opracowania dedykowanego układu odczytowego zintegrowanego z detektorem FET, który zastąpiłby kłopotliwą technikę detekcji fazoczułej i który zapewniłby duże wzmocnienie oraz wysoki stosunek sygnał/szum bez potrzeby modulacji źródła i który także posiadałby możliwość pracy wielokanałowej z matrycą detektorów.

Przedstawione w rozprawie układy odczytowe zostały opracowywane dla potrzeb trzech projektów: badawczo-rozwojowego i Programu Badań Stosowanych finansowanych z NCBiR oraz projektu wewnętrznego ITE. Jak wiadomo, ww. projekty NCBiR dotyczą opracowania rozwiązań, które odpowiadają na najnowsze oczekiwania i problemy.

Zważywszy na powyższe, w mojej ocenie **tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Cezarego Kołacińskiego jest właściwa, aktualna i ważna** zarówno dla rozwoju detektorów FET jak i techniki terahercowej.

3. Cel rozprawy i hipotezy badawcze

Głównym celem rozprawy, który został przedstawiony przez Doktoranta we wprowadzeniu, jest „(...) *zaprojektowanie, wytworzenie oraz charakteryzacja scalonego układu odczytowego, dedykowanego do współpracy z wyskokorezystywnymi detektorami promieniowania THz, opartymi o tranzystory FET.*

Natomiast doprecyzowanie celu głównego poprzez trzy cele cząstkowe nakłada na opracowywany układ odczytowy szereg wymagań. Mianowicie, układ powinien:

- a. „(...) *zapewniać odczyt słabych, wolnozmiennych sygnałów napięciowych,*
- b. *umożliwiać pomiary w systemach korzystających z terahercowych źródeł niemodulowanych,*

P₄

- c. *posiadać skalowalną architekturę, którą w prosty sposób będzie można rozszerzyć o dodatkowe kanały przetwarzania sygnału.*"

Szczegółowa analiza rozprawy mgr inż. Cezarego Kołacińskiego upoważnia do stwierdzenia, że **cel główny został sformułowany poprawnie** i jasno określa kierunek badań i zakres pracy. Powyższe cele szczegółowe mają na celu dookreślenie celu głównego poprzez precyzyjne wskazanie parametrów i funkcjonalności opracowywanego układu odczytowego. Doktorant krok po kroku projektując coraz to nowe układy konsekwentnie dążył do realizacji ww. celów, co w mojej opinii osiągnął.

Oprócz celu głównego związanego ze wzmocnieniem sygnałów z detektorów FET, Doktorant postawił sobie jeszcze cel dodatkowy, a było to „(...) *osiągnięcie uniwersalności zaproponowanego rozwiązania – tak, aby możliwe ono było do zaadaptowania w innych systemach (niekoniecznie związanych z dziedzinami spektrometrii czy systemach obrazowania THz), których zadaniem są pomiary i przetworzenie bardzo małych, wolnozmiennych sygnałów napięciowych.*” Realizacja tego celu pokazana na kilku przykładach została przedstawiona w rozdziale 6.

Doktorant postawił jedną tezę, a mianowicie, że istnieje „(...) *możliwość zastąpienia kłopotliwej i obciążonej licznymi wadami techniki detekcji fazoczułej przez wyspecjalizowany układ scalony.*” Uważam, że z punktu widzenia zrealizowanego problemu badawczo-technicznego i celów rozprawy, **hipoteza ta jest sformułowana prawidłowo** i stawia ona przed badaczem-konstrukтором bardzo konkretną i wysoką umiejscowioną poprzeczkę.

4. Struktura rozprawy

W mojej ocenie, **struktura pracy jest poprawna i zgodna z celem pracy**. Praca składa się z szerokiego wprowadzenia (rozdział 1), pięciu rozdziałów (o numerach 2-6), podsumowania i omówienia uzyskanych wyników (rozdział 7) oraz bibliografii i dwóch załączników.

Rozdział 1 „Wprowadzenie” zawiera na początku ogólny zarys promieniowania terahercowego obejmujący określenie podstawowych parametrów i właściwości tego promieniowania oraz jego podstawowe aplikacje. Następnie scharakteryzowano technikę detekcji fazoczułej wypuklając jej zalety ale także i wady, które stanowią tło do prezentacji motywacji, celu pracy, jej tezy oraz powiązania z realizowanymi projektami. Dalszy ciąg rozdziału to opis aktualnego stanu wiedzy bazujący na literaturze anglojęzycznej, który pokrótce prezentuje źródła i detektory promieniowania THz, w szczególności detektory typu FET, których dotyczy Rozprawa. Rozdział kończy się przeglądem literaturowym układów odczytowych. Taka struktura rozdziału ułatwia percepcję tekstu a zakres przeglądu świadczy o szerokiej wiedzy Doktoranta w zakresie promieniowania THz.

Drugi rozdział dotyczy ogólnych założeń i wymagań przyjętych przy projektowaniu układów odczytowych o numerach 0-4. Autor wychodzi od scharakteryzowania parametrów elektrycznych detektora FET, które są podstawą określenia cech projektowanych układów odczytowych. Spośród dostępnych rozwiązań układowych Doktorant wybrał do dalszych prac i opisał architekturę wzmacniacza z przetwarzaniem. Następnie scharakteryzowany jest proces technologiczny wybrany do wykonania układów odczytowych oraz przedstawione są techniki projektowe stosowane przy opracowywaniu topografii układów scalonych. Na koniec określono także sposób badania zaprojektowanych struktur.

Pch

Opisowi struktury #0, która była przedmiotem pracy magisterskiej Doktoranta, poświęcony jest rozdział 3 zawierający tylko 5 stron. Autor dość pobieżnie opisał ten układ, przedstawił wyniki pomiarów oraz scharakteryzował najistotniejsze rezultaty, które miały wpływ na dalsze prace. Uważam, że ten rozdział jest napisany nieco zbyt skrótowo, a dodatkowych kilka stron pozwoliłoby dokładniej poznać punkt startu Doktoranta.

Rozdział 4 to podstawa Rozprawy i zawiera prawie pięćdziesięciostronicowy opis struktury #1. Autor rozpoczyna od przedstawienia architektury ulepszonego układu wraz z jego analizą matematyczną i symulacjami, które potwierdzają poprawność zastosowanych technik w celu minimalizacji szumów wejściowych. Następne ponad 20 stron pracy stanowi bardzo szczegółowy opis poszczególnych bloków funkcjonalnych urządzenia wraz z ich opisem matematycznym. W kolejnych krokach Autor przeprowadził symulacje oraz pomiary elektryczne i na stanowisku terahercowym, które potwierdziły spełnienie wymagań przez zaprojektowaną strukturę jednokanałową. Ostatecznie Autor opracował układ ośmiokanałowego demonstratora, dla którego wyniki eksperymentalne potwierdziły słuszność przyjętej architektury Struktury #1.

Rozdział 5 Rozprawy poświęcony jest opisowi Struktury #2, w której Doktorant powielił osiem razy Strukturę #1 tak, by możliwy był odczyt z liniiki 8 detektorów FET oraz poprawiono parametry szumowe i dostosowano zakres regulacji wzmocnienia. Autor przedstawił opis bloków funkcjonalnych, układ odczytowy a także zaprojektowaną topografię struktury oraz wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, które potwierdzają osiągnięcie zamierzonych celów.

W kolejnym rozdziale Rozprawy Autor wykazał eksperymentalnie, że opracowany układ odczytowy, oprócz detektorów FET, może znaleźć zastosowanie także w innych dziedzinach, np. w pomiarze słabych sygnałów bioelektrycznych (potencjału bioelektrycznego, EEG), co wskazuje na interdyscyplinarność i uniwersalność opracowanego układu a także na dociekliwość naukową Doktoranta.

W rozdziale 7 Doktorant dokonał podsumowania i omówienia uzyskanych wyników. Zostały porównane parametry opracowanego układu z innymi układami dostępnymi na rynku oraz zarysowano kierunek dalszego rozwoju. Pierwszy z załączników opisuje Strukturę #3, która jest zoptymalizowanym rozwinięciem Struktury #2 m.in. o możliwość współpracy ze wzmacniaczem fazoczułym. Również dla tej struktury Autor zaprezentował projekt, wyniki symulacji i badań. Załącznik nr 2 pokazuje rozważania dotyczące przetwarzania alternatywnej (prądowej) odpowiedzi detektora THz.

5. Ocena rozprawy

Uważam, że przyjęta przez Doktoranta **koncepcja badań i prac projektowych jest odpowiednia do realizacji sformułowanych celów i hipotezy Pracy**. Autor jasno przedstawił motywację badań a po analizie literatury, określeniu możliwości i ograniczeń procesu technologicznego oraz krytycznych wnioskach wyciągniętych z badań Struktury #0 przeszedł do analizy i zaprojektowania Struktury #1. Każdy z bloków funkcjonalnych tej struktury został opisany z dużą wnikliwością świadcząca o praktycznej znajomości tematyki. Przedstawione symulacje teoretycznie potwierdziły poprawność projektu i „dały zielone światło” do realizacji Struktury #1. Za właściwe uważam również metodykę pomiaru – najpierw pomiary elektryczne a potem na stanowisku terahercowym. Za wyznacznik jakości całego

„procesu” uważam dużą zbieżność symulacji i wyników pomiarowych (Tab. 4 vs. Tab. 9). Uzasadniony jest także krok pośredni a mianowicie budowa ośmiokanałowego demonstratora bazującego na ośmiu Strukturach #1, która dowiodła skuteczności działania dla liniiki detektorów.

W kolejnym kroku dla Struktury #2 Autor skutecznie powtórzył powyższy schemat analiza-projekt-symulacje-pomiary (elektryczne i na stanowisku THz). Powyższe zabiegi zakończyły się sukcesem, czyli opracowaniem układu odczytowego spełniającego cele badawcze. Tym samym **Autor dowiódł również tezy doktoratu**, gdyż odczytywane sygnały były na poziomie właściwym do ich dalszej analizy bez stosowania kłopotliwej techniki detekcji fazoczułej. Na uwagę zasługują również dalsze prace dotyczące zarówno zastosowań alternatywnych, Struktury #3 jak i przetwarzania prądowego.

Wyniki prac związanych z Rozprawą zostały opublikowane w jednym artykule z listy A MNISW o IF=1,694, trzech artykułach z listy B MNiSW i siedmiu materiałach z konferencji międzynarodowych. W tych publikacjach Doktorant jest przeważnie pierwszym autorem. W mojej ocenie dokonania publikacyjne są ponadprzeciętne i świadczą o zainteresowaniu środowiska tą tematyką.

Pozytywnie oceniam fakt, iż Autor jasno rozgranicza swoją pracę od elementów wykonanych przez współpracowników w ramach prowadzonych wspólnie projektów.

6. Uwagi krytyczne

- a. Problem przedziału widmowego promieniowania THz jest różnie definiowany. Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny ogranicza ten przedział do zakresu 0,3-3 THz. W literaturze spotykane są też tradycyjnie nieco „szersze” definicje nawet 0,1-10 THz, czyli 3mm-30 μm . Jednakże recenzent nie może się zgodzić ze stwierdzeniem ze strony 4, że promieniowanie THz to „(...) zakres fal znajdujący się pomiędzy światłem widzialnym a promieniowaniem mikrofalowym”.
- b. Źródło promieniowania globar (str. 26) stosowane jest dla tzw. „dalekich” THz (powyżej 3 THz). Poniżej całkiem nieźle sprawdza się lampa rtęciowa. Jednakże jest ona bardziej skomplikowanym elementem nieco rzadziej używanym i stąd prawdopodobnie nie wszystkie książki o niej wspominają.
- c. Nie jest dla mnie jasne jak były zrealizowane symulacje metodą *post-layout*.
- d. Szkoda, że Autor nie pokazał powiększenia topografii opracowanych struktur (np. Rys 58).
- e. Tab. 4 - brak omówienia wyników symulacji. Należy się domyślać, że te wyniki są satysfakcjonujące.
- f. Znacznym ułatwieniem dla czytelnika byłoby zestawienie w jednej tabeli wyników z symulacji (Tab. 4) i pomiarów (Tab. 9).
- g. Pewien niedosyt budzi strona graficzna zaprezentowanych rysunków, np. umieszczanie białych wykresów o cienkiej linii na czarnym tle (np. Rys. 60), korzystanie ze zrzutów ekranu np. z oscyloskopu (Rys. 51), zbyt duże i zbyt małe litery w podpisach (Rys. 60), podpisy po angielsku.
- h. Wg mnie Praca zyskałaby na czytelności, jeśli Autor dodałby schemat układu pomiarowego dla pomiarów ze źródłem THz a zdjęcia zaopatrzył w podpisy elementów, np. Rys. 49.
- i. Autor stosuje raz przecinek a raz kropkę w ułamkach dziesiętnych, np. w tabeli 3 i w innych miejscach.

PŁ

- j. Przyjęcie pewnych założeń odnośnie zrozumiałości tekstu bądź powoływania się na niezdefiniowane pojęcia lub wielkości, które dla Autora są oczywiste, np. we wzorze 9 (str. 63) należy się domyślić, że U_{GS1} i U_{GS2} odnoszą się do napięcia bramka źródło. We wzorze 8 (str. 60) trzeba poszukać w pracy, co oznaczają zmienne.
- k. Drobne błędy edycyjne, np. str. 62 – nazwę tego samego filtra opisuje się jako G_m-C i $G_m - C$, ostatni wzór na str. 63 nie ma numeru czy str. 94 „układu”.

Jednakże podkreślam, że wymienione uwagi krytyczne nie umniejszają mojej wysokiej oceny Rozprawy.

7. Konkluzja końcowa

Rozprawa doktorska mgr inż. Cezarego Kołacińskiego pt. „Wielokanałowe, scalone systemy odczytowe dla detektorów THz opartych o tranzystory polowe, pobudzanych niemodulowaną wiązką promieniowania” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowo-konstrukcyjne i potwierdza wysoką ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w naukach technicznych w dyscyplinie elektronika. Praca dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i w mojej ocenie spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim w stopniu bardzo dobrym.

**W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie pana Cezarego
Kołacińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Narbert Petha