

Prof. dr hab. inż. Piotr Jasiński
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji
i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Kwoki
pt. „Elektryczne metody pomiarów wychyleń układów MEMS i NEMS”

Pismem RDN AEETK/1111/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 21.07.2023 r. otrzymałem do recenzji rozprawę doktorską mgra inż. Krzysztofa Kwoki pt. „Elektryczne metody pomiarów wychyleń układów MEMS i NEMS”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Tomasz Piasecki, prof. PWr.

Rozprawa jest napisana po polsku i składa się z dziesięciu numerowanych rozdziałów - w sumie 89 strony wydane w formie manuskryptu. Rozdział 1 jest wprowadzeniem do tematyki rozprawy, zaś rozdziały 2 i 3 opisują odpowiednio stosowane techniki pomiarowe oraz zagadnienia związane z oscylatorem harmonicznym. Zasadnicza część rozprawy, to rozdziały 4-9, w których Doktorant opisuje własne eksperymenty z zastosowaniem różnych technik pomiarowych oraz różnych mikroelektronicznych struktur drgających. W rozdziale 4 Autor opisuje pomiary miękkich belek piezorezystywnych wyposażonych w złote zwierciadło. Pomiary obejmowały częstotliwość rezonansową, współczynniki sztywności i dobroci zmierzone metodą szumu termomechanicznego wibrometrem laserowymi oraz czułości na ugięcie belek wzbudzonych piezostosem metodą lock-in. W rozdziale 5 Autor opisuje pomiary miękkich belek piezorezystywnych wyposażonych w dwa złote zwierciadła. Jedno do detekcji ugięcia na końcu belki, zaś drugie zawieszono na przewężeniach w pewnej odległości od końca belki do pobudzenia optycznego. Belkę pobudzano siłą Lorentza przez umieszczenie belki w polu magnetycznym oraz ciśnieniem wywieranym przez promieniowanie elektromagnetyczne na zwierciadło. Pomiary obejmowały określenie częstotliwości rezonansowej,

RDN AEETK/170/2023

1

współczynników sztywności i dobroci zmierzone metodą szumu termomechanicznego wibrometrem laserowymi oraz wartości sił i momentów sił działających na strukturę podczas pobudzenia magnetoelektrycznego i optycznego w komorze mikroskopu elektronowego z użyciem wzmacniacza fazoczułego. W rozdziale 6 i 7 Autor opisuje odpowiednio zagadnienia teoretyczne i eksperyment związany z pomiarami impedancyjnymi drgających struktur MEMS pobudzanych magnetoelektrycznie. Do pomiarów wykorzystuje mikrobilki z pętlą metalizacji, dla której określa częstotliwość rezonansową mierząc szum termomechaniczny oraz pojemność zastępczego obwodu elektrycznego, a także masę mikrobilki mierząc widmo impedancyjne wokół częstotliwości rezonansowej. W rozdziale 8 i 9 Autor opisuje odpowiednio zagadnienia teoretyczne i eksperyment związany z pomiarami impedancyjnymi drgających struktur MEMS pobudzanych elektrostatycznie. W pomiarach jako elektrodę nieruchomą wykorzystuje specjalnie spreparowany światłowód. Do pomiarów jako elektrodę ruchomą wykorzystuje nanomostek dla pomiarów w powietrzu oraz belkę komercyjną z powłoką platynowo-irydową dla pomiarów w próżni. Dla tych struktur określa częstotliwość rezonansową oraz widmo impedancji wokół częstotliwości rezonansowej. W rozdziale 10 znajduje się podsumowanie rozprawy. Ponadto, rozprawa posiada spis akronimów, spisy rysunków i tabel, spis treści, streszczenie po polsku i angielsku oraz bibliografię.

Problem naukowy rozprawy

We wstępie (rozdział 1) pracy doktorskiej Autor pisze, że celem rozprawy jest:

- określenie zależności „odpowiedzi elektrycznej struktury od jej ruchu”;
- „skonstruowanie stanowisk pomiarowych do badań MEMS i NEMS oraz przygotowanie oprogramowania niezbędnego do kontroli przebiegu pomiaru i akwizycji danych ...”;
- „opracowanie technik analizy danych pomiarowych”.

Ponadto, Autor rozprawy pisze, że „efektem końcowym realizacji powyższych celów jest zestaw narzędzi analitycznych pozwalających na prowadzenie badań wychyleń struktur MEMS i NEMS dających elektryczną odpowiedź na wychylenie”. Uważam, że Autor rozprawy niedostatecznie przemyślał, co jest celem naukowym rozprawy. W szczególności cel 2 wskazuje na budowę stanowiska do pomiaru, która raczej wiąże się z pracami inżynierskimi. Autor w swej rozprawie nie tylko przygotował narzędzia pomiarowe, ale również opracował procedury i metodykę pomiaru. Autor nie definiuje też rozprawy, a szkoda, bo one zapewne pozwoliłyby mu na uwypuklenie naukowych aspektów w rozprawie.

Konkludując, problem naukowy rozprawy jest związany z opracowaniem narzędzi do prowadzenia badań wychyleń struktur MEMS i NEMS.

Podejście Autora do osiągnięcia celów pracy

Autor podszedł do osiągnięcia celów w sposób eksperymentalny oparty na pobudzeniu wybranych struktur drgających wybranymi metodami i opracowaniu metodologii pomiarowej określenia ich wychyleń. Prace obejmowały:

- miękkie belki piezorezystywne wyposażone w złote zwierciadło wzbudzone piezostosem;
- miękkie belki piezorezystywne wyposażone w dwa złote zwierciadła wzbudzone magnetoelektrycznie oraz falą elektromagnetyczną;
- mikrobełki z pętlą metalizacji wzbudzone magnetoelektrycznie;
- układ nanomostka lub mikrobełki z światłowodem wzbudzony elektrostatycznie.

Do pomiarów użył, między innymi, wibrometru laserowego, elektrycznych metod fazoczułych oraz spektroskopii impedancyjnej określając szereg parametrów mierzonych mikrobelk.

Podsumowując, uważam, że Doktorant powziął odpowiednie kroki dla realizacji celów rozprawy.

Aktualność tematyki rozprawy

Rozprawa dotyczy opracowania narzędzi do prowadzenia badań wychyleń struktur MEMS i NEMS. Autor w rozprawie wzbudza do wychylenia szereg struktur MEMS i NEMS oraz określa ich właściwości. Metrologia takich struktur wymaga zawansowanego laboratorium oraz wiedzy zdobytej doświadczeniami wielu lat pracy naukowej. Tematyka rozprawy jest aktualna i doskonale wpisuje się w rozwój systemów MEMS oraz ich metrologii. W konsekwencji praca wpisuje się w tematykę badawczą dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEiTK).

Rozprawa na tle współczesnych doniesień literatury

W rozprawie Autor cytuje 107 pozycji literaturowych. Cytowania obejmują klasykę literatury oraz najnowsze doniesienia. Uważam, że liczba cytowań nie jest imponująca, ale

cytowania są właściwie dobrane i świadczą o dobrej wiedzy Autora z zakresu historii rozwoju metrologii i oraz współczesnej literatury z dyscypliny naukowej AEEiTK.

Wady, słabe strony rozprawy oraz inne uwagi

Praca liczy 97 stron i nie ustrzegła się od błędów, głównie o charakterze literówkowym. Rysunki są czytelne i właściwie cytowane w rozprawie. Praca zawiera szereg wzorów, które w części są wyprowadzane, a w części pojawiają się bez podania ich źródła (np. 5.2). W pracy nie znalazłem błędów merytorycznych, jednak mam kilka uwag, które mają głównie charakter polemiczno-uściślający:

- Głównym mankamentem pracy jest brak konkluzji w kolejnych rozdziałach związanych z pomiarami struktur. Np. rozdział 5 kończy się wyznaczeniem parametrów wartości sił i momentów sił dla dwóch metod pobudzenia struktury. W żadnym innym rozdziale te parametry nie zostały policzone i w żaden sposób odniesione do literatury. Czy te parametry nie będą zależą od amplitudy sygnału pobudzającego? Jakimi były parametry sygnałów pobudzających w tym wypadku? Czy nie można było w tym wypadku wyznaczyć parametrów czułościowych tak jak w rozdziale 4? Jak należy rozumieć nazwę rozdziału 5 „Ciężkie fotony”?
- W pracy różne metody pobudzania są stosowane do różnych struktur MEMS/NEMS. Czy jest możliwe wykonanie wszystkich rodzajów pobudzeń dla jednej struktury i jak ona musiałaby wyglądać?
- Czy mikrobeltka i piezostop w pomiarach ze strony 33 były w kontakcie ze sobą i jak ten kontakt był kontrolowany?
- Skoro częstotliwość rezonansowa piezostopu wynosiła 20 kHz (strona 33), to jakie są podstawy przyjęcia, że pozorny wierzchołek na częstotliwości $\sim 4,7$ kHz (rys. 4.8) jest związany z piezostopem (strona 37)?
- Czy koncentrację boru przedstawioną na rysunku 5.2 należy odczytywać jako 20 atomów/cm³?
- Czy można prosić o uargumentowanie tezy ze strony 45, że różne współczynniki sprężystości belki uzyskane dla różnych zwierciadeł są związane z położeniem zwierciadeł na belce?
- Na rysunku 9.9 Autor przedstawia wyniki pomiarów impedancji jako widma elektrycznej pojemności zespolonej. Ten fakt jest związany z wyprowadzonym wzorem 8.15 i 8.23. Jednak Autor nie analizuje wartości z elektrycznego schematu zastępczego (rys. 8.3),

choć wykonał dopasowanie wyników impedancji do wzoru 8.15 i 8.23. Czy można prosić o komentarz dotyczący wartości elementów schematu zastępczego (rys. 8.3). Dla pomiarów w próżni (rys. 9.11) również brakuje takiego odniesienia. Czy pomiary konduktancji (rys. 9.12) mają bezpośrednie przełożenie na pojemność elektryczną schematu zastępczego (rys. 8.3)?

Oryginalny dorobek Autora

Do oryginalnego dorobku Autora zaliczam opracowanie zestawu procedur pomiaru właściwości parametrów struktur drgających MEMS/NEMS metodami elektrycznymi, a w szczególności wykorzystanie do tych pomiarów spektroskopii impedancyjnej.

Nieodzownym wymaganiem stawianym przed kandydatem do stopnia doktora jest publikacja wyników prac w literaturze naukowej. Zgodnie z bazą bibliograficzną Scopus Doktorant jest współautorem 8 publikacji JCR, z czego w 2 jest Autorem wiodącym:

- Kwoka, K., Orłowska, K., Majstrzyk, W., Sierakowski, A., Janus, P., Tomaszewski, D., Grabiec, P., Piasecki, T., Gotszalk, T. (2020). Soft piezoresistive cantilevers for adhesion force measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 301, 111747 – wyniki z publikacji są przedstawione w rozdziale 4 rozprawy.
- Kwoka, K., Piasecki, T., Orłowska, K., Grabarczyk, P., Sierakowski, A., Gotszalk, T., Gacka, E., Piejko, A., Gajewski, K. (2023). Impedance spectroscopy of electrostatically driven MEMS resonators. *Measurement*, 215, 112845 – wyniki z publikacji są przedstawione w rozdziale 8 i 9 rozprawy.

Należy uznać, że powyższe publikacje potwierdzają umiejętność wzięcia na siebie roli współautora wiodącego.

Podsumowanie

Uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Gdańsk, 22.09.2023 r.


Piotr Jasiński

