

Prof. dr hab. inż. Katarzyna ZAKRZEWSKA
Instytut Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 09.09.2026 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DISCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE
KOSMICZNE
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA**

Tytuł rozprawy:

Miniaturowe źródło promieniowania rentgenowskiego MEMS

Autor rozprawy:

mgr inż. Paweł Urbański

Promotor:

prof. dr hab. inż. Tomasz Grzebyk

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Urbańskiego pod tytułem „*Miniaturowe źródło promieniowania rentgenowskiego MEMS*” poświęcona jest bardzo istotnemu zagadnieniu konstrukcji w pełni zintegrowanego, źródła promieniowania X, którego rozmiary są kompatybilne z mikro-elektromechanicznymi systemami MEMS. Konieczność miniaturyzacji urządzenia została bardzo szczegółowo wyjaśniona w rozdziale pierwszym stanowiącym wstęp do pracy i nie budzi żadnych wątpliwości. Podobnie, kolejne rozdziały drugi, trzeci i czwarty stanowią wprowadzenie do właściwej części pracy i pozwalają osadzić problematykę rozprawy w aktualnej literaturze. Na podstawie zawartych w tych rozdziałach (1-4) informacji i po dokonaniu własnego przeszkupania źródeł, można stwierdzić, że praca grupy, w której prowadzi działalność mgr inż. Paweł Urbański jest nowatorska a zaprojektowane i wykonane urządzenie jest pierwszym tego typu źródłem promieniowania rentgenowskiego. Innowacyjność proponowanego rozwiązania jest zatem jednoznacznie określona. W mojej opinii praca ta jednak stanowi zwieńczenie wcześniejszych wysiłków naukowych grupy, w której obecnie działa Doktorant. Rozwiązaniem problemu miniaturyzacji źródła promieniowania rentgenowskiego zajmowała się bowiem Pani Profesor Anna Górecka-Drzazga, która jest nie tylko inicjatorką tej tematyki lecz również współautorem patentu pt. „Miniaturowe źródło promieniowania rentgenowskiego” udzielonego 2017-06-06 (Pat. 227227). Ten ważny aspekt sprawy choć być może o charakterze historycznym nie został w sposób właściwy podkreślony w rozprawie doktorskiej.

Recenzowana rozprawa doktorska jest nietypowa pod względem formy. Z jednej strony ma strukturę tradycyjnej 99-stronnicowej dysertacji, podzielonej na 9 zasadniczych rozdziałów ale rozdział 10 stanowią opublikowane przez Doktoranta artykuły oraz opisy zgłoszeń patentowych. Zachodzi pytanie czy włączenie

RDNAEETK/43/09/2026

tekstów opublikowanych artykułów oznacza, że przedstawiona do recenzji rozprawa mieści się w trybie definiowanym w art. 267 ust. 3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce jako cykl publikacji? Na końcu rozprawy zostały zamieszczone oświadczenia współautorów do wszystkich załączonych pozycji, określające ich wkład merytoryczny.

Charakteryzując przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską należy podkreślić jej jednowątkową strukturę i precyzyjnie określony cel jakim jest konstrukcja i demonstracja prawidłowego działania miniaturowego źródła promieniowania rentgenowskiego MEMS. Praca składa się ze Wstępu (Rozdział 1), w którym zdefiniowano motywację i znaczenie badań (1.1), znaczenie tematu (1.2) oraz metodykę badań i podejście do problemu (1.3). Wskazano najważniejsze etapy działań Doktoranta zmierzające do realizacji celu pracy: projektowanie i modelowanie struktur MEMS, mikrofabrykację komponentów w technologii MEMS, przeprowadzenie testów elektrycznych oraz charakteryzacji spektralnej i przestrzennej generowanego promieniowania, integrację komponentów i hermetyzację struktury, weryfikację zdolności struktury do generacji promieniowania rentgenowskiego oraz przeprowadzenie testów funkcjonalnych w konkretnych aplikacjach. Rozdział 2 opisuje istniejące źródła i detektory promieniowania rentgenowskiego na podstawie obszernej literatury przedmiotu (około 70 publikacji). Rozdział 3 wprowadza czytelnika w podstawy powstawania promieniowania X i jego oddziaływania z materią. W rozdziale tym jest problem z powoływaniem się na wzory i ich numeracją (dla przykładu brak wzorów 3.3-3.10). W moim odczuciu, rozdział ten nie jest konieczny, ma charakter zbyt podręcznikowy i przerywa główny wątek nakreślony we wcześniejszych rozdziałach i późniejszym rozdziale 4.

Rozdział 4 opisuje stan badań nad miniaturyzacją źródeł rentgenowskich i jest kluczowy dla oceny znaczenia osiągnięcia Doktoranta oraz innowacyjności wprowadzonych rozwiązań konstrukcyjnych. Właśnie w tym rozdziale brakuje zarówno odwołań do pozycji literaturowych, które wzmacniałyby zbyt ogólnikowe stwierdzenia Autora jak i wyraźnej wzmianki o wcześniejszych osiągnięciach zespołu w tej tematyce.

Właściwa część rozprawy rozpoczyna się na stronie 46 a zatem zachowana jest proporcja 1:1 (część wprowadzająca : część wynikowa). W rozdziale 5 podano cele szczegółowe, powtarzając i rozszerzając wątek zawarty w podrozdziale 1.3. Bardzo cennym elementem rozprawy jest schemat przedstawiony na rysunku 5.1, który przejrzysto ilustruje cele pracy (9), ich metody realizacji (9) i rezultaty cząstkowe (9).

Rozdział 6 jest całkowicie poświęcony konstrukcji źródła rentgenowskiego MEMS zaprojektowanego wykonanego przez Doktoranta. Jako elementy urządzenia, nad którymi pracował Doktorant należy wymienić:

- Źródło elektronów w postaci emitera polowego

W tym zakresie działań Doktorant, po eksperymentalnej weryfikacji pracy mikrostrzy wykonanych w krzemie metodą trawienia, po raz pierwszy zastosował metodę termo-mechanicznego formowania struktur przestrzennych nanokompozytu złożonego z nanorurek węglowych i poliwinylpirolidonu, CNT-PVP. Konstrukcja tego emitera została opatentowana (PL 447233A1, 2025.06.23BUP25/2025).

- Kolumnę elektronowo-optyczną

Nowatorskim elementem jest tutaj zastosowanie pola magnetycznego, które z odpowiednio ukształtowanym polem elektrycznym pozwala na uzyskanie dużego natężenia wiązki elektronowej i jednorodności obszaru na jakim jest ogniskowana. Doktorant przeprowadził symulacje oraz

eksperymenty potwierdzające wyniki.

- Detektor sygnałów z miniaturowego źródła promieniowania

W tej części pracy badano zachowanie różnych luminoforów i dokonano odpowiedniego wyboru oraz parametrów akwizycji.

- Target transmisyjny

Wykorzystano tryb transmisyjny dzięki zastosowaniu membran krzemowych ale innowację stanowiło pokrywanie ich cienkimi warstwami metalicznymi Ni lub Ta.

Rozdział 6 kończą rozważania nad konstrukcją miniaturowej pompy jonowo-sorpcyjnej i jej połączenia z pozostałymi elementami urządzenia. Połączenie to zapewniło pracę źródła promieniowania rentgenowskiego w warunkach próżni hodowanej wewnątrz urządzenia co stanowi bardzo rzadkie i trudne w praktycznej realizacji zadanie. Dzięki temu można uznać, że całkowicie autonomiczne urządzenie do generacji promieniowania X zostało wykonane przez Doktoranta (zdjęcie na Rysunku 6.32).

Rozdział 7 przedstawia wyniki eksperymentalne mające na celu charakteryzację skonstruowanego urządzenia. Dużo uwagi poświęcono utrzymaniu stanu wysokiej próżni co jest szczególnie trudne podczas pracy takiego urządzenia. Monitorowano nie tylko ciśnienie ale również widmo gazów podczas emisji elektronów. Problem okazała się desorpcja wodoru wynikająca z bombardowania elektronami szkła borokrzemowego.

W rozdziale 8 pokazano wybrane wyniki badań aplikacyjnych. Ta część pracy budzi największy niedosyt gdyż jest ograniczona do badań składu jedynie bardzo oryginalnych a jednocześnie złożonych próbek będących symulantami regolitu księżycowego. Moja uwaga krytyczna jest taka, że powinno się w fazie początkowej sprawdzić działanie urządzenia mając dobrze zdefiniowany skład chemiczny badanego wzorca. Po ustaleniu czy zastosowane urządzenie czy daje wyniki zgodne z oczekiwaniami można przystąpić do analizy złożonych próbek. W tym kontekście proszę do Doktoranta aby podczas obrony przedstawił tego typu wyniki badań.

Pracę kończy rozdział 9 podsumowujący i przedstawiający najważniejsze wnioski pracy.

Bibliografia rozprawy zawiera 153 pozycje literaturowe. Publikacje, na które powołuje się Doktorant są aktualne, prawidłowo dobrane ale czasami niewłaściwie zacytowane w tekście (przykłady niedociągnięć edytorskich zamieszczam poniżej). Pracę uzupełnia streszczenie w języku angielskim i polskim, spis treści, spis oznaczeń i akronimów.

Ocena recenzowanej pracy

Elementy pozytywne (mocne strony rozprawy)

Problem naukowy rozprawy został trafnie i jasno sformułowany. Oryginalnym i istotnym osiągnięciem przeprowadzonych przez Doktoranta badań jest kompletne urządzenie do wytwarzania promieniowania rentgenowskiego, które ze względu na autonomiczny charakter i duży stopień miniaturyzacji może być przenoszone do miejsc trudno dostępnych (umieszczane np. w małych stacjach kosmicznych). Doktorant rozwiązał postawiony problem i użył do tego właściwych metod zarówno symulując pewne przebiegi (napięcia, prądu, ciśnienia) w funkcji parametrów technologicznych, jak i mierząc je. Można zatem stwierdzić, że posiada

umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych. Tematyka rozprawy jest aktualna i bardzo ważna, gdyż zagadnienia związane z konstrukcją urządzeń miniaturowych i całkowicie kompaktowych wykonanych w technologii MEMS stają się priorytetowe dla współczesnego społeczeństwa i badań w celu eksploracji np. Kosmosu. Oryginalny dorobek Doktoranta jest związany tematycznie z rozprawą i obejmuje 10 publikacji oraz 4 patenty. Niewątpliwie, zakres i poziom wykonanych prac, jak również dość bogaty dorobek publikacyjny rozprawy świadczy o wiedzy Doktoranta na zaawansowanym poziomie w zakresie metod i technik pomiarowych oraz dobrej znajomości zagadnień konstrukcyjnych.

Słabe strony rozprawy

Jak w przypadku każdego opracowania naukowego, także i w stosunku do recenzowanej pracy można sformułować pewne uwagi krytyczne, które wynikają z subiektywnej identyfikacji „słabych stron” rozprawy i nie umniejszają wysokiej jej oceny.

Należą do nich:

- Niewystarczający w moim odczuciu sposób odniesienia się do wcześniejszych prac zespołu nad elementami urządzenia. Doktorant w podrozdziale 6.5.2 opisując zintegrowaną mikropompę jonowo-sorpcyjną zauważa (str.78), że „Mikropompa taka została opracowana w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej przeszło 10 lat temu” ale, jak wspomniałam na początku recenzji, nie powołuje się na odpowiedni patent. Zamiast takiego odwołania wskazuje publikację [144]. Jest to praca autorstwa T.Grzebyk, A.Gorecka-Drzazga, A.Zawada, J.A.Dziuban. Problem w tym, że na stronie 57 w zupełnie innym podrozdziale 6.2, w przypisach znajdujemy powołanie na zgłoszenie patentowe „Sposób mechaniczno-termicznego formowania na podłożu form przestrzennych z nanorurek węglowych” [144]. Kolizja? Zamieszanie w spisie literatury? Proszę Doktoranta do ustosunkowania się na obronie do mojego pytania: na jakich konkretnie doświadczeniach wcześniejszych zespołu bazował a co wyraźnie zmienił (poprawił). Chodzi o ustalenie rzeczywistego wkładu w innowacyjność rozwiązania.
- Brak bezpośredniego porównania wyników przeprowadzonych eksperymentów z wynikami symulacji. Proszę o sformułowanie wniosków w stosunku do jakich konkretnych wyników można uznać, że spełniły się oczekiwania wynikające z symulacji. A jeśli nie, jakie czynniki należy uwzględnić w przyszłych badaniach aby uniknąć tych rozbieżności.
- W podrozdziale 5.2 *Oczekiwane rezultaty* Doktorant pisze: „Oczekiwano, że urządzenie będzie zdolne do generacji promieniowania rentgenowskiego o parametrach użytecznych w rzeczywistych zastosowaniach, takich jak: fluorescencja rentgenowska XRF do analizy składu pierwiastkowego materiałów, inspekcja materiałowa z wykorzystaniem promieniowania X w warunkach *in situ* (m.in. w mikrosystemach przepływowych)”. Nie znalazłam w rozdziale 8 wyników badań w mikrosystemach przepływowych. Proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do rezultatów tego rozdziału i ewentualne przedstawienie podczas obrony przekonujących wyników analiz XRF na dobrze zdefiniowanych wzorcach.
- Interesującym ale wykraczającym poza obszar pracy pytaniem jest czy takie źródło mogłoby służyć w pomiarach dyfrakcji promieniowania X zmierzających do określenia struktury krystalograficznej. Jakie metody poza zewnętrznym monochromatorem można brać pod uwagę? Czy można rozważać

zastosowanie siatki dyfrakcyjnej wewnątrz urządzenia?

- Od strony edytorskiej praca jest przygotowana bardzo niestarannie. W rozdziale 3 wystąpił poważny problem z numeracją wzorów. Na stronie 31 Doktorant powołuje wzór 3.6, który nie istnieje (chyba chodzi o 3.18). W przypadku spisu pozycji literaturowych i powołań na nie też jest duże zamieszanie. Spis skrótów nie jest w kolejności alfabetycznej. Niektóre rysunki są mało czytelne a opisy osi w wersji „drukowanej” zupełnie rozmyte: przykłady Rys.6.9, 6.29, 7.2, 7.11.
- Podane zostały opisy złożonych zgłoszeń patentowych ale trudno zorientować się czy patent został przyznany? Innego rodzaju dokument byłby właściwy na tym etapie.

**Jako recenzent zaliczam rozprawę do kategorii: wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny
(spełniająca wymagania z nadmiarem)**

Praca zdaniem recenzenta wykracza poza poziom przeciętny. Oryginalnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie nowego, całkowicie autonomicznego, zintegrowanego, miniaturowego źródła promieniowanie rentgenowskiego o parametrach odpowiednich do przeprowadzania analiz chemicznych i obrazowania. Biorąc pod uwagę dorobek publikacyjny i patentowy Doktoranta stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Urbańskiego. Może to jednak nastąpić po ustosunkowaniu się do mojej recenzji i pozytywnie ocenionym przebiegu obrony rozprawy.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **spełnia wymagania** wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz wnioskuję o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Pawła Urbańskiego do publicznej obrony.
