

Warszawa, 24 czerwca 2026 r.

Prof. dr hab. inż. Mateusz Śmietana
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
Tel. 22 234 6364
Fax. 22 234 6063
e-mail: Mateusz.Smietana@pw.edu.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej pt. „Miniaturowe źródło promieniowania rentgenowskiego
MEMS” autorstwa pana mgr inż. Pawła Urbańskiego**

wykonana na wniosek Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej
z dnia 15.05.2026 r.

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Pawła Urbańskiego wpisuje się w dynamicznie rozwijany obszar badawczy dotyczący miniaturyzacji przyrządów elektronicznych. Rozprawa ma charakter konstrukcyjno-doświadczalny i jest poświęcona zagadnieniom inżynierskim z zakresu przyrządów mikroelektromechanicznych (MEMS). Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna z punktu widzenia rozwoju nauk, w szczególności inżynieryjno-technicznych i fizycznych, ale pośrednio również innych nauk, gdzie źródła promieniowania jonizującego mogą znaleźć szerokie zastosowanie.

Autor rozprawy zauważył, że tradycyjne źródła promieniowania rentgenowskiego cechują się stosunkowo dużymi rozmiarami, znacznym zapotrzebowaniem na energię i szeregiem złożonych wymagań eksploatacyjnych, co istotnie ogranicza ich możliwości zastosowania, w szczególności jako systemów mobilnych. W odpowiedzi na ten problem, pan mgr inż. Paweł Urbański skupił się na rozwoju konstrukcji MEMS na potrzeby generacji takiego promieniowania. Podejście oparte na MEMS poza miniaturyzacją, pozwala na integrację szeregu elementów w kierunku otrzymania w pełni funkcjonalnego i przenośnego systemu. Osiągnięcie postawionego celu podstawowego, czyli otrzymania zintegrowanego, miniaturowego źródła promieniowania X wykonanego w technologii MEMS, wymagało przeprowadzenia szeroko zakrojonych, zaawansowanych prac eksperymentalnych, w szczególności z zakresu otrzymywania wydajnych emiterów polowych, czy układów kształtowania wiązki elektronów, materiałów emisyjnych w zakresie X oraz ich detektorów. Niezbędne były również uzupełniające analizy numeryczne w zakresie projektowania kluczowych elementów, a w ich konsekwencji zaawansowane prace technologiczne w zakresie wytwarzania układów MEMS. Treść przedstawionego do oceny materiału nie

RDNAEETK/33/07/2026

pozostawia wątpliwości co do aktualności przeglądu potrzeb i wiedzy Autora w zakresie konstrukcji źródeł promieniowania X, technologii MEMS, a także miernictwa elektrycznego.

Układ rozprawy w początkowym jej etapie wydaje się być typowy, czyli po wstępie teoretycznym i ustaleniu motywacji, definiowany jest cel i teza. Dalej tradycyjny układ ulega dość swoistej modyfikacji. Zamiast poprzez wykorzystane materiały, metody i techniki wraz z ich parametrami i użytymi procedurami prowadzić do wyników badań, począwszy od Rozdziału 6 Autor bezpośrednio przedstawia wyniki badań. Wyniki te pojawiają się więc dla czytelnika dość niespodziewanie i nie obejmują wykonawczych szczegółów technicznych. Brak wyraźnie zdefiniowanej części opisującej, w szczególności wykorzystaną aparaturę, użyte materiały i parametry pomiarowe, czy procesowe, w moim odczuciu istotnie utrudnia analizę wyników przedstawionych prac. Do rozszerzonych informacji odwołują przypisy definiujące publikacje i wnioski patentowe współtworzone przez Autora. Niestety, publikacje te również nie uwzględniają brakujących opisów technicznych. Co więcej dopiero na tym etapie, czyli podczas analizy treści towarzyszących publikacji, czytelnik może zauważyć, że rozprawa ma charakter swego rodzaju cyklu publikacji. Zapoznanie z treścią publikacji uzmysławia, że są one w dużej mierze powieleniem treści rozprawy, oczywiście z różnicą użytego języka tj. rozprawa została przygotowana w języku polskim, a publikacje angielskim. Dokumenty zawierają w większości te same rysunki i opisy. Rozprawa jest więc spójnym ujęciem treści publikacji z ich uzupełnieniami głównie w celu nadania tym treściom układu i charakteru rozprawy doktorskiej. Niewątpliwie lepszym podejściem byłoby sporządzenie formy przewodnika po publikacjach jedynie z nadaniem ich treści kontekstu, niż powielanie opublikowanych już treści, dodatkowo w rozprawie w już często skrótowej formie.

Mimo przyjętego układu rozprawy należy podkreślić, że Autor dobrze zapanował nad poprawnym przedstawieniem uzyskanego materiału badawczego i jego szczegółową analizą. Jestem pod dużym wrażeniem szerokiego zakresu tematycznego rozprawy i ilości zrealizowanych eksperymentów. Wstęp do pracy obejmuje przede wszystkim szereg interesujących opisów z zakresu źródeł i detektorów promieniowania X, w szczególności w ujęciu historycznym i aplikacyjnym. Co istotne, każdy z omawianych zakresów przeglądu literaturowego pozostaje w ścisłym odniesieniu do tematyki rozprawy. Konsekwencją wstępu jest identyfikacja motywacji i celów oraz określenie zakresu pracy. Kolejne rozdziały obejmują wyniki realizacji podstawowych elementów proponowanego układu, w szczególności źródła i kształtowania wiązki elektronów oraz materiałów emisyjnych i materiałów wykorzystanych do detekcji promieniowania X. Następnie Autor skupił się na sposobie integracji elementów i wykonania układu MEMS obejmującego źródło promieniowania i niezbędną do jego funkcjonowania pompę próżniową. Kolejne rozdziały obejmują wyniki przeprowadzonej charakteryzacji funkcjonalnej wykonanego systemu i prób zastosowań. Należy podkreślić, że rozprawa ma charakter kompletny tj. obejmuje wszystkie etapy związane z otrzymaniem oryginalnego produktu, począwszy od identyfikacji potrzeby i oczekiwań, poprzez oryginalny projekt i jego fizyczną realizację z uwzględnieniem szeregu rozwiązań alternatywnych, ocenę parametrów

i weryfikację przydatności w przypadku wybranych aplikacji. Zarówno opis teoretyczny jak i część praktyczna przedstawiona w rozprawie w pełni potwierdzają umiejętności Autora w zakresie metodyki i metodologii prowadzenia badań naukowych. Lektura rozprawy potwierdza, że Autora w sposób konsekwentny i przemyślany zmierzał do osiągnięcia wyznaczonych celów. Nie mam wątpliwości, że Autor zrealizował każdy z elementów pracy w sposób pełni świadomy. Ponadto, każdy z elementów pracy został uzupełniony o uzasadnienie podjętych wyborów, co w pełni potwierdza widzę ekspercką p. mgr inż. Pawła Urbańskiego w zakresie tematycznym rozprawy i swobodne się w nim poruszanie.

Rezultaty badań przedstawione w rozprawie są niewątpliwie oryginalne. Pośrednio potwierdza ten fakt 10 publikacji materiału badawczego w czasopismach cieszących się wysoką lub umiarkowaną wysoką reputacją w środowisku naukowym. Należy też zauważyć, że Autor rozprawy realizował eksperymenty przy udziale wąskiego grona współpracowników, tj. głównie promotor i 4 innych badaczy. Pierwsza pozycja spośród współautorów w szeregu z tych publikacji, podkreśla kluczowy wkład p. mgr inż. Pawła Urbańskiego w powstanie przedstawionego materiału publikacyjnego. Wkład ten również potwierdzają oświadczenia współautorów. Na szczególne podkreślenie zasługuje też fakt pełnienia przez Autora z sukcesem funkcji korespondencyjnych na tak wczesnym etapie rozwoju naukowego. W pełni doceniam wysiłek z tym związany i uzyskane umiejętności organizacyjne. Pozycja wśród autorów publikacji i pełnienie funkcji korespondencyjnych w przypadku większości z publikacji świadczą o dojrzałości naukowej, wszechstronności i odpowiedzialności mgr inż. Pawła Urbańskiego.

Rolą recenzenta jest przede wszystkim zwrócenie uwagi na wady i słabe strony ocenianego materiału. Poza wspomnianym powyżej nietypowym układem rozprawy, który może utrudniać przyswojenie jej treści, nie dostrzegam istotnych jej wad, ale zauważyłem kilka uchybień o charakterze edycyjnym tj.:

- Str. 17. Nieprawidłowe odwołanie do rysunku. Rys. 1.1. nie występuje w rozprawie;
- Słownictwo np. „szczelne techniki pakowania” (str. 19), „przerwa wzbroniona” (str. 23) brzmią osobliwie, prawdopodobnie na skutek bezpośredniego tłumaczenia z innych języków. Z kolei brak tłumaczenia określeń np. „fan-beam” (str. 20) czy „fokusującej” (str. 58) pozostawia wrażenia żargonu technicznego. Opis „pokrycie krzemu cienką warstwą metalizacji” (str. 71) wydaje się być nadmiarowy i może być zastąpiony np. „metalizowanym krzemem”;
- Drobne błędy edycyjne tj. namiarowy odstęp na str. 21., czy z kolei ich brak przed numeracją równań, niespójne stosowanie spacji między wartościami i jednostkami, brak indeksu (np. podpis Rys 6.3 i Rys. 6.12), niespójne przyjęcie jednostek np. (Rys. 6.6 $U_b(kV)$, zaś już Rys. 6.8 $U_b(V)$), a w przypadku Rys. 6.17 ich brak. Oznaczenie U_f występuje na Rys. 7.7. jako U_{fokusa} . Nie wiadomo do czego odnosi się numeracja w legendzie w przypadku Rys. 7.8;

- W przypadku opisu wytworzonych elementów (szczególnie Rozdział 6) bardzo cenna byłaby informacja ile ich sztuk wytworzono i przebadano;
- Na stronie 52 opisano problem degradacji krzemu. Wspomniano jego rekrytalizację w warunkach wysokotemperaturowych. Mając na uwadze, że wykorzystany został krzem krystaliczny, opis wydaje się być niespójny logicznie;
- Wykorzystanie pola magnetycznego do ogniskowania wiązki elektronów jest określone w rozprawie jako nowatorskie. Jednakże rozwiązanie to jest szeroko wykorzystywane choćby w przypadku konstrukcji magnetronów użytych w pracach do osadzania warstw. Nowatorski charakter wymaga uszczegółowienia;
- Przyjęty na potrzeby rozprawy układ skutkuje brakiem istotnych informacji towarzyszących przedstawionym wynikom. Taka sytuacja ma miejsce np. w przypadku Rozdziału 6.2.1. Wydaje się również, że zaburzeniu uległa chronologia. W Rozdziałach 6.2.1. i 6.2.2. wykorzystano luminofor, którego wybór opisano w rozdziale 6.3. Inny luminofor wydaje się być zastosowany w Rozdziale 6.4. Powód zmiany, czy wyboru nie został należycie uzasadniony;
- Niespójność nazewnictwa. W ramach Rozdziału 3 opisano hamowanie elektronów i związane z nim powstanie widma ciągłego. Oba efekty zostały określone jako Bremsstrahlung. W dalszej części rozprawy mowa o hamowaniu, ale na str. 74 niespodziewanie został ponownie użyty termin niemieckojęzyczny, a później (str. 88) ponownie oba;
- W przypadku uszkodzenia targetu podano prąd i napięcie przy jakim ten efekt zaobserwowano bez uwzględnienia czasu ekspozycji;
- Próbkę luminoforu testowano z wykorzystaniem pobudzenia SEM i rejestracji obrazu z użyciem kamery (Rozdział 6.3). Nie jest jasne jak został zorganizowany ten układ i gdzie znajdowała się kamera. Ponadto, mimo różnego zakresu widmowego luminescencji rejestrowany układ porównano w skali szarości. Takie uproszczenie implikuje szczególne założenia dotyczące rozkładu czułości spektralnej układu detekcji;
- Rysunki ujęte w ramach 6.28 uwzględniają 8 grubości materiałów. Odpowiedzi dla większości z nich się pokrywają, co sprawia, że rysunki są nieczytelne.
- W rozprawie występuje szereg określeń mających bardzo względne znaczenie np. „małego magnezu” (str. 58), „staranne przygotowanie podłoża” (str. 76), „dokładne czyszczenie” (str. 85), „mała masa i niewielkie wymiary” (str. 98).

Powyższe uchybienia nie umniejszają w istotny sposób wartości pracy, ale zwracając na nie uwagę mam nadzieję, że mogą korzystnie wpłynąć na przyszłą działalność redakcyjną Autora.

Mimo, że nie dostrzegam istotnych wad, czy słabych stron pracy, jej lektura nasuwa kilka pytań, do których Autor powinien odnieść się w ramach dalszych etapów postępowania.

- Eksperymenty zrealizowane na potrzeby pracy wymagały dużo wysiłku ze strony Autora rozprawy, ale uzyskane efekty mogą mieć charakter jednostkowy. Jest to typowe dla nauk podstawowych, ale też może prowadzić do błędnych wniosków. Czy

Autor podejmował próby weryfikacji poprawności wyników poprzez zwielokrotnienie liczby eksperymentów?

- Parametry materiałowe i możliwość ich wykorzystania z użyciem dostępnej technologii wymagają kompromisów. Tak było w przypadku targetu krzemowego (Rozdział 6.4). Czy można rozważyć inny materiał pełniący tę funkcję przy zastosowaniu innej technologii łączenia?
- W treści rozprawy występuje szereg sugestii co do potencjalnych zastosowań medycznych układu, w tym w ramach systemów mikroprzepływowych. Jako potencjalną aplikację potwierdzono obrazowanie materiałów. Czy w związku z tym możliwe jest wykorzystanie układu do uzyskania terapeutycznych dawek promieniowania jonizującego (radioterapia)?
- Wśród perspektyw rozwojowych dość ogólnie określono rekomendacje co do optymalizacji wydajności źródła. Jak konkretnie postępowanie Autor ma na myśli? Co stało na drodze przed przeprowadzeniem takiej optymalizacji w ramach badań na potrzeby rozprawy?

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska autorstwa p. mgr inż. Pawła Urbańskiego ma istotne znaczenie poznawcze i obejmuje opracowanie oraz analizę rozwiązań oryginalnych inżyniersko i przydatnych w zakresie konstrukcji przyrządów MEMS, w tym przede wszystkim wykorzystanych na potrzeby uzyskania promieniowania rentgenowskiego. Autor wykazał dostateczną wiedzę teoretyczną oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawę oceniam jako wyraźnie wykraczającą poza poziom przeciętny (spełniającą wymagania z nadmiarem). Poza niewątpliwie pozytywną oceną rozprawy doktorskiej, uznaję że uzyskane efekty mają charakter wyróżniający na tym etapie rozwoju naukowego. Mając powyższe na uwadze, stwierdzam, że rozprawa doktorska odpowiada warunkom określonym w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742 ze zm.) o wnoszę o dopuszczenie pana mgr inż. Pawła Urbańskiego do dalszych etapów postępowania. Ponadto, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy i spełnienie warunków Uchwały 81/3/RDN02/2024-2028 wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

