



Dr hab. Mikołaj Lewandowski, Prof. UAM

Centrum NanoBioMedyczne

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

ul. Wszechnicy Piastowskiej 3

61-614 Poznań

Tel.: +48737474700

E-mail: lewandowski@amu.edu.pl

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

Prace badawczo-rozwojowe, których wyniki opisano w przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej, zostały realizowane na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Tomasz Grzebyk.

Celem prowadzonych prac było opracowanie w pełni zintegrowanego miniaturowego źródła promieniowania rentgenowskiego wykonanego w technologii systemów mikroelektromechanicznych (MEMS). Realizacja zadania uwzględniała projektowanie i modelowanie struktur MEMS, mikrofabrykację komponentów, ich charakteryzację i integrację, hermetyzację struktury, weryfikację zdolności urządzenia do generowania promieniowania rentgenowskiego, a także analizę aplikacyjną i testy funkcjonalne skonstruowanego układu.

Rozprawa jest podzielona na 10 rozdziałów, z których pierwsze dziewięć tworzy klasyczną monografię napisaną w języku polskim, a ostatni zawiera publikacje i patenty/zgłoszenia patentowe Doktoranta stanowiące dodatkowe udokumentowanie opisanych w pracy osiągnięć. Na początku rozprawy znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, a także wykazy stosowanych skrótów, oznaczeń i symboli. Całość dopełniają oświadczenia współautorów publikacji/patentów/zgłoszeń patentowych Doktoranta oraz licząca 153 pozycje bibliografia. Uwzględniając wszystkie wymienione części, rozprawa liczy 260 stron, natomiast część monograficzna jest zawarta na 108 stronach (biorąc pod uwagę pierwsze dziewięć rozdziałów oraz bibliografię). Proporcja objętości części wprowadzającej do części przedstawiającej wyniki przeprowadzonych prac wynosi w przybliżeniu 1:1, co jest typowe dla rozpraw doktorskich mających formę monografii. Język pracy jest klarowny, a stosowane określenia specjalistyczne w większości poprawne. Na szatę graficzną składają się głównie schematy, fotografie i obrazy mikroskopowe opracowanych komponentów, a także wykresy przedstawiające charakterystyki poszczególnych elementów źródła, jak i całego urządzenia. Pod względem formy rozprawa prezentuje się bardzo dobrze, natomiast w opinii Recenzenta szata graficzna – mimo, iż spełnia funkcję informatywną – mogłaby być bardziej dopracowana.

Rozdział 1 przedstawia cel badań i motywację do ich podjęcia. Doktorant koncentruje się przede wszystkim na ogólnym znaczeniu układów MEMS oraz źródeł promieniowania rentgenowskiego, identyfikując lukę technologiczną w zakresie źródeł wykonanych w technologii mikroelektromechanicznej. Jednocześnie Autor wskazuje wyzwania związane z opracowaniem takiego rozwiązania i przedstawia metodykę badań przyjętą w ramach rozprawy doktorskiej.

W Rozdziale 2 szczegółowo omówione zostały powszechnie wykorzystywane typy źródeł oraz detektorów promieniowania rentgenowskiego. Opis opatrzony jest narracją dotyczącą historycznego rozwoju wspomnianych urządzeń i rosnącej liczby ich zastosowań. Doktorant porównuje parametry różnych typów źródeł i detektorów, wskazując na ich zalety oraz wady.

Zarówno Rozdział 1, jak i 2, oceniam bardzo wysoko. Motywacja i cele pracy są przedstawione klarownie, a powszechnie stosowane rozwiązania w zakresie emisji i detekcji promieniowania rentgenowskiego opisane szczegółowo. W Rozdziale 2 zauważyć można jednak dość liczne powtórzenia tych samych informacji i stwierdzeń, choćby na stronie 17 w paragrafie zaczynającym się od słów „Wprowadzenie anody obrotowej...”, czy na stronie 22 w paragrafie „W praktyce przemysłowej i medycznej...”.

Rozdział 3 stanowi opis zjawisk odpowiedzialnych za generowanie promieniowania rentgenowskiego – w szczególności podczas oddziaływania elektronów z materią. Doktorant przedstawił w nim procesy fizyczne zachodzące podczas wspomnianej interakcji i powiązał emisję promieniowania z parametrami pracy źródła rentgenowskiego, co jest istotne z punktu widzenia celów rozprawy. Rozdział ten jest napisany na bardzo wysokim poziomie merytorycznym i stanowi cenne źródło informacji dla osób rozpoczynających pracę z promieniowaniem X. Za zbędne uważam natomiast wielokrotne wprowadzanie tych samych wielkości fizycznych w ramach jednego wywodu (np. opis „ U – napięcie przyspieszające (V)” występuje na stronie 30 cztery razy przy następujących po sobie wzorach).

W Rozdziale 4 Autor przedstawił aktualny stan badań w zakresie miniaturyzacji źródeł promieniowania rentgenowskiego. Rozwiązania zostały podzielone ze względu na typ emitera elektronów (katody), rodzaj tarczy emitującej promieniowanie (anody), a także technologii wytwarzania źródła. Również w przypadku tego rozdziału, przedstawione informacje w interesujący sposób osadzono w rysie historycznym.

Rozdziały 2, 3 i 4 potwierdzają ogólną wiedzę Doktoranta w zakresie typów źródeł promieniowania rentgenowskiego, ich konstrukcji, zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za generowanie promieniowania X, a także budowy urządzeń MEMS.

Cele pracy zostały raz jeszcze sformułowane w Rozdziale 5 – tym razem bardziej szczegółowo, w oparciu o przedstawiony stan wiedzy dotyczący miniaturowych źródeł promieniowania rentgenowskiego. Uwzględniły one opracowanie koncepcji źródła rentgenowskiego MEMS, zaprojektowanie i zamodelowanie poszczególnych komponentów

źródła, integrację komponentów, a także charakteryzację i weryfikację działania kompletnego urządzenia. Doktorant przedstawia również oczekiwane parametry fizyczne i techniczne źródła.

Proces opracowywania źródła promieniowania rentgenowskiego został opisany szczegółowo w Rozdziale 6. W toku prac mgr inż. Paweł Urbański zoptymalizował wszystkie elementy składowe urządzenia, tj. źródło elektronów oparte na emisji polowej, układ ogniskowania wiązki elektronowej z wykorzystaniem pola magnetycznego i elektrycznego, target transmisyjny, a także luminescencyjny układ detekcji promieniowania. Badania zostały przeprowadzone bardzo systematyczne, uwzględniając w przypadku każdego z elementów składowych testy różnego typu rozwiązań oraz określenie ich charakterystyk. Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie przez Doktoranta źródła emisji elektronów w postaci igły z kompozytu nanorurek węglowych i poli(winylopirolidonu), a także zintegrowanie w układzie wysoce wydajnej miniaturowej pompy jonowo-sorpcyjnej. Opisy są klarowne, a ciąg podejmowanych działań logiczny. Na stronie 51 ponownie zauważyć można jednak powtórzenia tych samej informacji w dwóch następujących po sobie zdaniach (zaczynając od słów „W dalszej części...”). W opinii Recenzenta – mając na uwadze naukowo-techniczny charakter pracy – treść tego i wielu innych paragrafów mogłaby zostać zoptymalizowana pod kątem zwięzłości. Natomiast stronę merytoryczną i zakres zrealizowanych zadań należy ocenić bardzo wysoko. Przeprowadzone prace zaowocowały skonstruowaniem miniaturowego źródła promieniowania rentgenowskiego z wbudowaną pompą jonowo-sorpcyjną o całkowitych wymiarach urządzenia $30\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ i wadze 7 g, a także bardzo niskim poborze mocy, co stanowi rozwiązanie unikatowe w skali światowej i bardzo duże osiągnięcie Doktoranta.

Charakterystyka źródła została opisana w Rozdziale 7. Autor rozprawy dokonał bardzo szczegółowej analizy parametrów pracy skonstruowanego układu, z uwzględnieniem poziomu próżni wewnątrz urządzenia w stanie spoczynku i podczas emisji elektronów z emitera, charakterystyk prądowo-napięciowych układu emiter-soczewka-target (w tym stabilności parametrów w czasie), oraz spektralnych. Uzyskane informacje pozwoliły Doktorantowi zoptymalizować parametry działania źródła i potwierdzić jego stabilną pracę w zakresie emisji promieniowania rentgenowskiego.

Rozdział 8 prezentuje przykładowe zastosowania opracowanego źródła. Szczególną uwagę poświęcono wykorzystaniu urządzenia do rejestracji widm rentgenowskiej spektroskopii fluorescencyjnej (XRF) oraz do obrazowania rentgenowskiego. Testy aplikacyjne prowadzono zarówno w warunkach standardowych, jak i w warunkach próżni. Zarejestrowane widma XRF charakteryzują się wysokim stosunkiem sygnału do szumu, a wykonane zdjęcia rentgenowskie – między innymi obrazujące ścieżki układu elektronicznego – posiadają zadowalającą rozdzielczość. Przeprowadzone próby potwierdziły więc wysoki potencjał aplikacyjny skonstruowanego urządzenia. Autor rozprawy bardzo ostrożnie formułuje tezy dotyczące możliwych aplikacji w technologiach kosmicznych, natomiast potencjał urządzenia w tym zakresie jest w opinii Recenzenta niepodważalny.

Główną część rozprawy kończy Rozdział 9, w którym przedstawiono podsumowanie zrealizowanych celów i wnioski płynące z przeprowadzonych prac. Pokróćce omówiono w nim również perspektywy dalszego rozwoju skonstruowanego urządzenia.

W Rozdziale 10 zawarto publikacje i patenty/zgłoszenia patentowe dokumentujące opisane w rozprawie osiągnięcia. Jak już wspomniano, całość rozprawy wieńczą oświadczenia współautorów prac Doktoranta oraz Bibliografia. Ponieważ praca ma formę monografii, zamieszczenie publikacji jako jednego z rozdziałów – a nie dodatku do pracy – uważam za mylące, podobnie jak umieszczenie bibliografii – odnoszącej się do pierwszych dziewięciu rozdziałów rozprawy – za publikacjami i oświadczeniami współautorów. Natomiast fakt napisania przez mrg. inż. Pawła Urbańskiego klasycznej rozprawy doktorskiej – mimo posiadania w dorobku 10 powiązanych tematycznie pierwszoautorskich prac naukowych, które w formie cyklu mogłyby stanowić podstawę nadania stopnia naukowego doktora, zasługuje na najwyższe uznanie. W mojej opinii sam proces pisanie rozprawy doktorskiej przyczynia się do znaczącego poszerzenia oraz usystematyzowania wiedzy kandydata do stopnia doktora i stanowi kluczowy etap rozwoju naukowego.

Podczas obrony rozprawy doktorskiej, prosiłbym Doktoranta o odniesienie się do następujących zagadnień:

- (1) Czy przewidywany koszt wytworzenia urządzenia będzie uzasadniał jego częstą wymianę w przypadku awarii (konstrukcja zalana żywicą epoksydową uniemożliwia serwisowanie)?
- (2) Czy użyty w procesie technologicznym krzem był domieszkowany? Jakie były parametry elektryczne materiału?
- (3) Na stronie 54 wspomniano o „związaniu polimeru z nanorurkami” w ostrzach kompozytowych – czy Autor rozprawy spodziewa się powstawania chemicznych wiązań pomiędzy materiałami w wytworzonym nanokompozycie?
- (4) Czy przed naniesieniem warstwy metalu powierzchnia krzemowego targetu transmisyjnego była w jakiś sposób oczyszczana?
- (5) W jaki sposób mierzone było pole magnetyczne podczas rejestracji danych do Tabeli 6.2 oraz Rysunku 6.14? Na stronie 60 Doktorant pisze, że pole o wartości 0,22 T jest wystarczające do uzyskania najlepszego możliwego w tym układzie skupienia wiązki elektronów, podczas gdy wykres na rysunku 6.14 zdaje się nie potwierdzać tego stwierdzenia. Dlaczego do optymalizacji układu skupiającego nie użyto pomiarów natężenia prądu wiązki elektronowej docierającej do detektora?
- (6) W jaki sposób skalibrowano wartość prądu pompy jonowo-sorpcyjnej względem ciśnienia w układzie i jak rejestrowano widmo emisji pozwalające na identyfikację obecnych w urządzeniu gazów resztkowych?
- (7) Na stronie 44 Autor pisze, że w momencie rozpoczynania pracy nie istniały doniesienia o w pełni zintegrowanych mobilnych źródłach promieniowania rentgenowskiego wykonanych w technologii MEMS – czy poza rozwiązaniem opracowanym w ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej pojawiły się w trakcie realizacji doktoratu doniesienia o innych tego typu urządzeniach?
- (8) Pomimo imponującego stopnia miniaturyzacji źródła promieniowania rentgenowskiego opracowanego w ramach rozprawy, czy osiągnięte wymiary kwalifikują je do kategorii

urządzeń MEMS? Czy może klasyfikacji dokonano w oparciu o rodzaj zastosowanej technologii wytwarzania urządzenia?

- (9) Z punktu widzenia zastosowań w sektorze kosmicznym, jaka jest przewidywana stabilność pracy źródła w podwyższonych/obniżonych temperaturach?

Pozostałe uwagi (niewymagające odniesienia się):

- Rysunek 2.2, który zaadoptowano z serwisu Wikipedia, prezentuje w mojej ocenie bardzo niski poziom merytoryczny – uważam, że Autor mógł wykonać lepszej jakości schemat samodzielnie;

- podpisy pod niektórymi rysunkami nie odzwierciedlają do końca ich treści, np. w przypadku Rysunku 6.6 brak jest informacji, co oznaczają symbole „1”, „2” oraz „3(a-d)”, natomiast opis Rysunku 6.7 powinien wskazywać, że przedstawione zostały na nim obrazy skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM); brak jest również konsekwencji w sposobie numeracji rysunków, gdzie niekiedy są one numerowane w zapisie z dwiema kropkami (np. „Rysunek 6.7.”), a niekiedy z kropką i myślnikiem (jak choćby „Rysunek 6.8 –.”);

- z informacji zawartych na początku rozprawy nie do końca wynika, o jakim „obrazie” Doktorant pisze w Rozdziale 2 (np. we fragmencie „...kosztem nieco gorszej rozdzielczości obrazu.”, s. 18) – kwestia ta pozostaje dla czytelnika domyślna;

- na stronie 32 Autor zapewne miał na myśli zależność Katza-Penfolda, a nie „Pokrovski-Russella”;

- w przypadku niektórych zapisów liczbowych Doktorant stosuje kropkę, a w przypadku innych przecinek, niekiedy łącząc oba formaty w ramach jednego wywodu (choćby w równaniu 3.21);

- opis Tabeli 4.1 powinien brzmieć „Tabela 4.1. Podsumowanie głównych cech...” zamiast „Tabela 4.1. podsumowuje główne cechy...”;

- na stronie 43 Autor rozprawy używa skrótów „DMLS”, „SLA” i „LOM” bez podawania ich znaczenia;

- w Tabeli 4.2 opisy „Szkłane z elementami metalowymi” i „Metalowo-ceramiczne struktury” nie odpowiadają nazwie kolumny („Technologia”);

- wartości ciśnienia są raz podawane w jednostkach Torr, a innym razem hPa (przykładem może być strona 57, gdzie w drugiej linii jest jednostka hPa, a na osi rzędnych wykresu na Rysunku 6.10 jednostka Torr);

- z treści pracy nie do końca wynika jaka była geometria układu pomiarowego użytego do zarejestrowania danych do Tabeli 6.1; brak jest również informacji na temat sposobu rejestracji obrazów plamki elektronowej;

- na początku strony 60 powinien znajdować się odnośnik do Rysunku 6.13, a nie 5.13;

- w Tabelach 6.5 i 6.6 część pól jest opisana w języku polskim, a część w języku angielskim, (wszystkie opisy powinny zostać przetłumaczone na język rozprawy, tj. język polski);
- na stronie 82 Autor pisze, że emisja elektronów z emitera nie wywołała znaczącego odgazowywania, podczas gdy poziom próżni pogorszył się o dwa rzędy wielkości;
- na stronie 92 pada sformułowanie, iż skonstruowane źródło posiada zdolność do wzbudzania i rejestracji promieniowania charakterystycznego, podczas gdy samo źródło nie posiada zdolności rejestracji promieniowania;
- w Rozdziale 9, przy opisie zrealizowanych celów, jest błąd w ich numeracji (brak celu nr 7);
- w Bibliografii cytowane są źródła internetowe (np. pozycje [18], [30] i [34]), ale nie podano przy nich daty dostępu (strony internetowe ulegają aktualizacji, dlatego podanie daty dostępu jest ogólnie przyjętą praktyką); niektóre odnośniki do artykułów naukowych wydają się z kolei być niekompletne (brak choćby wskazania strony w pracy [135]), w innych nie zastosowano odpowiedniego formatowania (na przykład brak indeksów dolnych w tytule artykułu [113] lub tytuł pracy/czasopisma w całości zapisany wielkimi literami w pracach [44], [48], [62], ...); zapewne Autor korzystał z oprogramowania dedykowanego do automatycznego tworzenia spisu cytowanej literatury, natomiast przed publikacją rozprawy powinien był tę listę zweryfikować;
- w wersji drukowanej niektóre opisy osi rzędnych wykresów są nieczytelne (np. w przypadku Rysunku 6.15) – problem ten nie występuje natomiast w wersji cyfrowej rozprawy;
- w rozprawie można znaleźć dość liczne błędy edytorskie, w tym błędy literowe (np. „poprzez oko z materiału”, s. 18; „w krzemie (~3,7 eV) lub germanu (~2,8 eV)”, s. 22; „czyli w przy opracowywaniu”, s. 23; etc.), językowe (przykładowo: „po procesie bondingu anodowym”, s. 57; „w rozważanej strukturze zastosowano nowatorskiego podejścia”, s. 58; „oraz większy nieznacznie większy udział”, s. 73), niewłaściwe określenia (np. ITO – „tlenek indu i cyny”, gdzie właściwszym określeniem byłoby „tlenek indowo-cynowy”, s. 9; „magnetronowego osadzania metalizacji” -> „magnetronowego osadzania warstwy metalizującej”, s. 14; „GE Healthcare oferuje serię turbin Performix” -> „serię lamp”, s. 20; „pokrycie krzemu cienką warstwą metalizacji” -> metalizacja jest procesem, s. 71; „widmo VIS mikropompy” -> pompa nie posiada widma, podpis pod Rysunkiem 7.5 na stronie 84), kolokwializmy („pierwiastków o wysokim Z”/”próbek o niskim Z”, s. 21/40; „natężenie/irradiacja padająca na wejściu materiału”, s. 28; „przebieg prądu emisyjnego”, podpis pod Rysunkiem 6.9 na stronie 56) i anglicyzmy („stosuje się je głównie do monitoringu”, s. 23; „można aproksymować równaniem”, s. 32; „z wysoką rozdzielczością czasową”, s. 38; „elektrody fokusującej”, s. 87); w niektórych miejscach brakuje też indeksów górnych (np. opis pod Rysunkiem 6.3) lub dolnych (patrz s. 21-22).

Wymienione powyżej uwagi krytyczne nie wpływają na moją bardzo pozytywną oceną rozprawy. Podjęta tematyka jest aktualna, a zrealizowane zadanie ambitne. Uwagę zwraca systematyczne podejście polegające na odpowiednim przygotowaniu teoretycznym (szczegółowa analiza podstaw fizycznych generowania promieniowania rentgenowskiego i

rozwiązań technicznych stosowanych w dostępnych na rynku rozwiązaniach w zakresie źródeł promieniowania X), wykonaniu wielu symulacji i testów z wykorzystaniem różnych materiałów, skonstruowaniu źródła w oparciu o jasne przesłanki dotyczące optymalnych do tego celu komponentów, a także zebranie szeregu charakterystyk gotowego źródła.

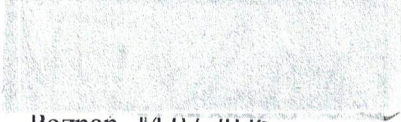
Warto również podkreślić dorobek publikacyjny i patentowy Doktoranta, na który składa się 10 publikacji naukowych (uwzględniających zarówno prace przeglądowe, jak i opisujące wyniki badań własnych), których mgr inż. Paweł Urbański jest pierwszym autorem i które w momencie pisania recenzji były cytowane łącznie ok. 50 razy (h-index: 5, wg. Scopus), 1 patent i 3 zgłoszenia patentowe, z których wszystkie są związane z tematyką rozprawy. Część artykułów została opublikowana w wysoko punktowanych czasopismach, m.in. Measurement (Elsevier, 200 pkt. wg listy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego – 2 artykuły), Ultramicroscopy (Elsevier, 140 pkt. – 2 artykuły), Advanced Optical Materials (Wiley, 140 pkt.) oraz Acta Astronautica (Elsevier, 140 pkt.). Biorąc pod uwagę wczesny etap kariery naukowej Autora rozprawy, jest to dorobek ponadprzeciętny.

Podsumowując, stwierdzam, iż przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2018 poz. 1668), ponieważ (i) prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata z zakresu źródeł i detektorów promieniowania rentgenowskiego, podstaw fizycznych generowania promieniowania wskutek oddziaływania elektronów z materią, zasad działania oraz podstaw konstrukcyjnych opracowanych do tej pory źródeł i detektorów promieniowania X, a także konstrukcji urządzeń MEMS, (ii) potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej, co zostało potwierdzone załączonymi wynikami prac badawczo-rozwojowych oraz publikacjami naukowymi i patentami/zgłoszeniami patentowymi, a także (iii) dokumentuje opracowanie przez niego oryginalnego rozwiązania problemu naukowego w postaci źródła promieniowania rentgenowskiego wykonanego z technologii MEMS, które jest ukierunkowane na zastosowanie wyników w sferze gospodarczej. W związku z powyższym, wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Urbańskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego w celu nadania mu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Jednocześnie, mając na uwadze szeroki zakres przeprowadzonych prac, ich interdyscyplinarny charakter oraz bardzo wysoki poziom merytoryczny, a także potencjalne znaczenie opracowanego rozwiązania w sferze aplikacyjnej, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Formalna podstawa wniosku o wyróżnienie

W odniesieniu do Uchwały nr 81/3/RDN02/2024-2028 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 18 listopada 2024 r. w sprawie zaopiniowania Zasad wyróżniania rozpraw doktorskich we wspomnianej dyscyplinie:

- mgr inż. Paweł Urbański jest pierwszym autorem licznych publikacji naukowych związanych z bronią rozprawą doktorską, z których 6 ma przypisaną punktację odpowiadającą co najmniej 70% wartości najwyższej punktowanych czasopism na liście Ministerstwa właściwego do spraw nauki i szkolnictwa wyższego, jak również 1 patentu ściśle związanego z bronią rozprawą;
- przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom naukowy, a uzyskane przez Doktoranta wyniki są oryginalne w skali światowej;
- Doktorant posiada wyróżniający dodatkowy dorobek naukowy w postaci publikacji naukowych i zgłoszeń patentowych.



Poznań, 14.07.2026