

Lublin 7.09.2023

Prof. dr hab. inż. Jarosław Sikora
Katedra Automatyki i Metrologii
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Białasa
pod tytułem „Metodyka i układy sterowania wiązkami cząstek naładowanych
w mikrosystemach MEMS”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, obejmująca sto czterdzieści stron, zawiera spis oficjalnych akronimów występujących w rozprawie, osiem rozdziałów, w tym zestawienie bibliograficzne zawierające sześćdziesiąt cztery pozycje, z których dwanaście współautorskich prac Doktoranta zostało opublikowanych w latach 2019-2023, między innymi przez IOP Publishing, Elsevier Ltd., IEEE. Układ treści odzwierciedla przyjętą metodologię badań. Praca napisana jest w sposób staranny i prawidłowy pod względem stylistycznym. Poziom edytorski jest odpowiedni dla prac doktorskich.

Tematyka pracy dotyczy badań eksperymentalnych mikrosystemów próżniowych, zrealizowanych w technologii MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), z wykorzystaniem autorskich metod i układów sterowania wiązkami elektronów i jonów. Innowacyjne mikrosystemy, funkcjonalnie stanowiące narzędzia pomiarowe, w tym polowe źródła elektronów, mikroskopy elektronowe, spektrometry mas, źródła promieniowania rentgenowskiego zostały opracowane w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej, w której Doktorant prowadzi badania naukowe. Implementacja metod i algorytmów pomiarowych w strukturach MEMS umożliwia miniaturyzację narzędzi pomiarowych, zapewnia ich mobilność oraz potencjalnie, obniżenie kosztów produkcji w stosunku do drogich klasycznych przyrządów pomiarowych np. spektrometrów mas,

mikroskopów elektronowych. Z drugiej strony, komponenty mikrosystemu o wymiarach rzędu mikro i nanometrów tworzą nowe uwarunkowania dla implementacji przyjętych zjawisk fizycznych w danym urządzeniu, między innymi z powodu niejednorodności pól elektrycznych w obszarach międzyelektrodowych, większych pojemności montażowych spowodowanych relatywnie małymi odległościami międzyelektrodowymi. Powyższe uwarunkowania mogą mieć znaczący wpływ na trajektorie elektronów generowanych ze źródła polowego, trajektorie jonów w spektrometrze mas a także na parametry dynamiczne mikrosystemów, w kontekście relatywnie dużych pojemności montażowych. W celu zapewnienia pożądanych trajektorii cząstek naładowanych i oczekiwanych parametrów danego urządzenia, należy zastosować odpowiednie układy sterowania wiązkami elektronów lub jonów oraz adekwatne systemy kondycjonowania, akwizycji i przetwarzania sygnałów pomiarowych.

We wprowadzeniu mgr inż. Marcin Białas sformułował cel pracy: „Opracowanie układów i urządzeń (elektronicznych, mikromechanicznych, systemów automatyki i pomiarów) oraz oprogramowania, niezbędnych do uruchomienia i badań właściwości mikrosystemów elektronowych, jonowych lub ich podzespołów”.

Cel pracy wynika z analizy aktualnego stanu wiedzy na podstawie przeglądu literatury (rozdziały 2, 3) i jest spójny merytorycznie z badaniami prowadzonymi w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej.

W rozdziale drugim Autor opisał podstawy teoretyczne zjawisk fizycznych wykorzystywanych w działaniu badanych mikrosystemów, w tym wytwarzanie elektronów w oparciu o zjawiska termoemisji i emisji polowej, jonizację molekuł gazu elektronami, fotonami, oddziaływanie pól elektrycznego i magnetycznego na cząstki naładowane. W tym kontekście przedstawiono budowę i zasadę działania soczewek elektrycznych i magnetycznych oraz układów odchylenia cząstek naładowanych, a także układy zasilania wysokim napięciem służące do polaryzacji elektrod mikrosystemów oraz układy detekcji cząstek naładowanych. Przedstawione zagadnienia ściśle łączą się z tematem pracy.

Wybrane podzespoły i mikrosystemy wykonane w klasycznej technologii MEMS, w większości opracowane w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej przedstawiono w rozdziale trzecim, między innymi mikropompę jonowo-sorpcyjną, polowe źródła elektronów zbudowane z nanorurek węglowych, źródło promieniowania rentgenowskiego, mikroskop elektronowy oraz spektrometr mas z filtrem Wiena, którego krzemowo-szklaną strukturę zilustrowano na Rys. 30. Wymieniono także druk 3D

jako obiecującą technologię wytwarzania miniaturowych podzespołów, na przykładzie klistronu.

Uzyskane rezultaty wnikliwej analizy właściwości narzędzi pomiarowych wykonanych w technologii MEMS stały się podstawą do przyjęcia założeń projektowych i wykonania kluczowych układów elektronicznych umożliwiających odpowiednią polaryzację elektrod badanego mikrosystemu i sterowania, w układzie otwartym, ruchem cząstek naładowanych, formowanych w wiązki elektronów lub jonów a także układów detekcji, kondycjonowania sygnałów pomiarowych, ich akwizycji oraz przetwarzania. Opracowane układy elektroniczne oraz aplikacje komputerowe są zaprezentowane w rozdziałach czwartym i piątym, odpowiednio. Na uwagę zasługuje znakomite przygotowanie Doktoranta do rozwiązywania postawionych zadań w zakresie analogowych układów elektronicznych, techniki mikroprocesorowej i programowania, co zaowocowało utworzeniem zaawansowanego ale i przyjaznego dla użytkownika skomputeryzowanego systemu kontrolno-pomiarowego zintegrowanego funkcjonalnie z mikrosystemami.

Badania doświadczalne, których celem była weryfikacja skomputeryzowanego systemu kontrolno-pomiarowego we współpracy z rzeczywistymi mikrosystemami a także identyfikacja wybranych parametrów tych mikrosystemów są przedstawione w rozdziale szóstym. Dla mikroskopu MEMS wyznaczono, między innymi wpływ średnicy elektronowej wiązki skanującej na zdolność rozdzielczą mikroskopu, przeprowadzono badania sygnału wyjściowego detektorów elektronów w obrazowaniu bezpośrednim, transmisyjnym i elektronami wstecznie rozproszonymi, w funkcji napięcia polaryzującego detektory w zakresie od -30 V do 30 V, przy zadanej energii elektronów równej 4 keV oraz w funkcji energii elektronów w zakresie od 3 keV do 11 keV, dla ustalonej wartości napięcia polaryzującego detektory równego 30 V. Na podstawie otrzymanych zależności sprawności detektorów w funkcji energii elektronów, Autor wykazał, że najwyższą sprawność w zakresie relatywnie niskich energii elektronów zapewnia metoda detekcji wstecznie rozproszonych elektronów. W kolejnym etapie, obiektem badań były mikrostruktury spektrometrów mas wykonane w Katedrze Mikrosystemów, między innymi w ramach projektu dla Europejskiej Agencji Kosmicznej. Proces pomiarowy realizowany w spektrometrze mas składa się z trzech etapów: jonizacji atomów i molekuł najczęściej próbki gazowej, separacji jonów o wybranym ilorazie m/e i detekcji prądu jonowego. Dla spektrometru mas z analizatorem m/e typu czas przelotu, Doktorant, wykorzystując materiały odniesienia, wyznaczył krzywą kalibracji tj. zależność masy atomowej jonów względem czasu przelotu (Rys. 111) i zaprezentował przykładowe, zarejestrowane widmo mas. Dla spektrometru mas z analizatorem m/e typu filtr

kwadрупolowy, wyznaczył zależność masy atomowej jonów w funkcji amplitudy napięcia wysokiej częstotliwości (wzór (14)), wykorzystując materiały odniesienia tj. wzorcowe gazy azot, tlen, argon. Następnie skalibrowanym spektrometrem wyznaczył widmo mas powietrza (Rys. 117). W przedmiotowych spektrometrach, do jonizacji gazu wykorzystano wiązkę elektronową uformowaną w obszarze superpozycji pól elektrycznego i magnetycznego, w celu zwiększenia drogi jonizacji i w efekcie wydajności jonizacji. Wzrost wydajność jonizacji gazu umożliwia uzyskanie wyższych wartości natężenia parcjalnych prądów jonowych i zwiększenie dokładności pomiarów realizowanych spektrometrem mas. Kalibracja spektrometru mas wieńczy proces jego uruchamiania i stanowi pozytywną weryfikację przyjętych założeń projektowych zarówno dla mikrostruktury jak i układów kontrolno-pomiarowych, między innymi opracowanego przez Doktoranta wzmacniacza m.cz. z wyjściem różnicowym. W końcowym etapie, Autor przeprowadził badania materiałów mogących znaleźć zastosowanie w konstrukcji miniaturowego źródła promieniowania rentgenowskiego. Wyznaczył i porównał względną jaskrawość wybranych materiałów scyntylacyjnych, następnie w oparciu o pomiary jaskrawości scyntylatorem Luminex porównał emisję promieniowania rentgenowskiego z przygotowanych krzemowych anod pokrytych warstwami metalicznymi: Cu, Mo, Ni, Ta, W, o trzech zadanych grubościach. Do generacji promieniowania rentgenowskiego zastosował napięcie przyspieszające elektrony o wartościach w zakresie od 6 kV do 18 kV. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów Doktorant uzasadnił, że pokrycia krzemowych anod tantalum i niklem zapewniają odpowiednią emisję promieniowania rentgenowskiego, w kontekście budowy mikrostruktury źródła promieniowania rentgenowskiego. Pokrycia pozostałymi metalami wywołują świecenie luminoforu na poziomie szumu. Dla anody krzemowo-tantalowej wyznaczył średnicę obszaru emisji promieniowania (110 μm), profil wiązki rentgenowskiej (Rys. 134) oraz przeprowadził test wytrzymałości termicznej przy napięciu przyspieszającym elektrony 24 kV, natężeniu prądu anody 200 μA i czasie trwania 5 minut. Na podstawie otrzymanych wyników, uzasadnił przydatność katody krzemowo-tantalowej do budowy mikrostruktury źródła promieniowania rentgenowskiego, o odpowiedniej mocy.

Na podstawie zaprezentowanych w rozprawie wyników badań, zastosowanych metod badawczych i przedstawionych wniosków, należy stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora należy uznać:

- wnikliwą analizę zjawisk fizycznych występujących w mikrostrukturach badanych narzędzi pomiarowych.

- zaprojektowanie i wykonanie układów sterowania wiązkami elektronów i jonów,
- wykonanie prototypu skomputeryzowanego systemu kontrolno-pomiarowego zintegrowanego funkcjonalnie z mikrosystemami i jego weryfikację eksperymentalną,
- empiryczne wyznaczenie wpływu średnicy elektronowej wiązki skanującej na zdolność rozdzielczą mikroskopu,
- analizę wyników badań sprawności detektorów elektronów w funkcji napięcia przyspieszającego elektrony w obrazowaniu bezpośrednim, transmisyjnym i elektronami wstecznie rozproszonymi, w kontekście budowy mikroskopu elektronowego,
- kalibrację spektrometrów mas z analizatorami czasu przelotu i kwadrupolowym oraz wyznaczenie widm masowych,
- analizę wyników badań emisji promieniowania rentgenowskiego z krzemowych anod pokrytych warstwami metalicznymi pod kątem ich wykorzystania w mikrostrukturze źródła promieniowania rentgenowskiego.

Uwagi wynikające z lektury pracy:

1. Pewien niedosyt merytoryczny budzi brak streszczenia pracy.
2. Na stronie 15 rozprawy, pod równaniem (7) podano oznaczenie n jako gęstość cząsteczek gazu w przestrzeni, natomiast w równaniu (11) stanu gazu doskonałego (równaniu Clapeyrona), dla liczby moli gazu również przyjęto oznaczenie n .

Powyższe uwagi nie wpływają na jakość rozprawy doktorskiej, w której zaprezentowane osiągnięcia poznawcze oceniam wysoko.

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Białasa pod tytułem „Metodyka i układy sterowania wiązkami cząstek naładowanych w mikrosystemach MEMS” spełnia wymogi jakie stawia rozprawom doktorskim Ustawa o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych i uprzejmie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgra inż. Marcina Białasa do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.

Yaroslav Silina