

Prof. dr hab. Tadeusz PISARKIEWICZ
Katedra Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr inż. Andrzeja SIERAKOWSKIEGO
Opracowanie metody pomiaru wymiarów krytycznych i optymalizacja procesu
naświetlania z użyciem zintegrowanego mikroskopu bliskich oddziaływań i systemu
bezpośredniego naświetlania wzoru

1. Analiza stanu wiedzy związanej z przedmiotem rozprawy

Proces fotolitografii jako technika stosowana do definiowania kształtów w trakcie produkcji przyrządów mikroelektronicznych i systemów MEMS jest dobrze poznany i systematycznie rozwijany. Liczba prac poświęconych optymalizacji procesu fotolitograficznego ma ciągle tendencję wzrostową. Przy projektowaniu pojedynczych przyrządów chętnie stosuje się jednak techniki fotolitografii bezpośredniej należące do metod bezmaskowych. Dobór parametrów naświetlania przeprowadzany in situ jest tu szczególnie istotny ale liczba publikacji z tego obszaru jest relatywnie niska. Metoda zaproponowana przez autora rozprawy, której przedmiotem optymalizacji są parametry procesu naświetlania o największym wpływie na jakość finalnego wzoru należy właśnie do grupy metod optymalizacji in situ.

Ocena procesu fotolitografii nie jest możliwa bez zastosowania zaawansowanej techniki pomiarowej z obszaru nano. Możliwości takie daje mikroskopia bliskich oddziaływań znana bardziej jako tzw. mikroskopia SPM (Scanning Probe Microscopy) w wersji zarówno AFM (Atomic Force Microscopy) jak i STM (Scanning Tunneling Microscopy). Brak jest jednak opracowań o wykorzystaniu mikroskopu AFM pracującego w szczególności w trybie sił ścinających, zintegrowanego z systemem do litografii bezpośredniej DWL.

2. Cel rozprawy i jej realizacja

Autor rozprawy jest pracownikiem Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie i zagadnieniem litografii zajmuje się zawodowo w trakcie realizacji prac badawczo-rozwojowych i nowych wdrożeń. Realizacja projektów mających w szczególności charakter unikalny jest nierozdzielnie związana z optymalizacją procesu fotolitografii, w szczególności fotolitografii bezpośredniej. Wymagania technologiczne, które musiał mieć na uwadze autor rozprawy to uzyskanie odpowiedniej dokładności metod pomiarowych ale także konieczność ograniczenia ilości podłoża testowych ze strukturami próbnymi, co rzutuje na opłacalność ekonomiczną. W rezultacie doktorant opracował metodę oceny procesu z użyciem pojedynczego podłoża z finalnym wyrobem. Oceniany jest wzór naświetlony ale niewywołany. Struktura próbna może być naświetlana w wielu obszarach przy zmieniających się parametrach procesu, co umożliwia wybór optymalnych parametrów naświetlania finalnego.

Cel pracy sformułowano jako: „*opracowanie metody optymalizacji parametrów procesu fotolitograficznego z wykorzystaniem systemu do bezpośredniego naświetlania wzoru DWL ze zintegrowanym mikroskopem sił atomowych AFM. Metoda ta pozwala na optymalizację procesu naświetlania bez konieczności wywoływania emulsji*”.

W prezentowanej rozprawie autor udowadnia, że cel ten został osiągnięty. Wiele wywodów przytaczanych w pracy ma tak duży stopień szczegółowości, że w rezultacie redakcja pracy liczy 205 stron. Zdaniem recenzenta niektóre opisy procedur pomiarowych można było przedstawić bardziej zwięźle bez uszczerbku dla zrozumienia treści wywodów.

Struktura rozprawy doktorskiej to: wstęp gdzie omówiono motywację i metodologię badań a także podano cel pracy, pięć wydzielonych rozdziałów o charakterze zarówno przeglądowym jak i związanych ściśle z realizacją pracy, rozdział stanowiący podsumowanie i rozważania perspektywiczne oraz spis literatury liczący 226 pozycji. Andrzej Sierakowski jest współautorem 18 z cytowanych prac (w tym 1 patentu), z których 4 znajdują się na liście JCR. W początkowej części rozprawy podany został bogaty spis używanych akronimów, co z pewnością ułatwia czytanie tekstu pracy.

W rozdziale 2 został omówiony szeroko proces litografii. Scharakteryzowano w szczególności parametry typowe dla procesu fotolitografii oraz omówiono ograniczenia tego procesu. Następnie omówione zostały typowe emulsje używane w naświetlaniu. Omówiono techniki definiowania wzoru: fotolitografię kontaktową i zbliżeniową, fotolitografię projekcyjną. Przedstawiona została również litografia bezmaskowa w postaci zarówno fotolitografii bezpośredniej jak i elektronolitografii.

Rozdział 3 dotyczy zagadnień metrologii i optymalizacji procesu litografii. Kontrola w postaci pomiaru i oceny wzorów uzyskanych w emulsji ma na celu stwierdzenie, czy uzyskana wielkość liczbowa, np. szerokość ścieżki, osiąga wartość dopuszczalną. W rozdziale tym omówiono również stosowane w fotolitografii metody pomiarowe, w tym mikroskopię bliskich oddziaływań. Zilustrowano zagadnienie optymalizacji parametrów procesu definiowania wzorów metodami mikro- i nanolitograficznymi.

Rozdział 4 to analiza celu pracy w świetle obecnego stanu wiedzy. Autor rozważa konieczność opracowania nowej metody optymalizacji procesów naświetlania zwłaszcza wykorzystywanych w trakcie opracowywania nowych urządzeń czy produkcji małoseryjnej. Analiza danych literaturowych wskazuje na konieczność użycia mikroskopii AFM będącej w stanie dokonywać obserwacji na niewywołanych wzorach. Znaczne uproszczenie procesu optymalizacji uzyskuje się, jak wykazał autor w szeregu publikacjach, poprzez integrację mikroskopu AFM z urządzeniem do bezmaskowego naświetlania wzoru.

W rozdziale 5 opisana została szczegółowo budowa stanowiska badawczego. Istotną częścią tego stanowiska był system do naświetlania bezpośredniego DWL 200 firmy Heidelberg Instruments Mikrotechnik, którego budowę i zasadę działania pokrótce opisano. Znacznie więcej uwagi poświęcił autor stanowisku pomiarowemu w oparciu o mikroskop AFM pracujący w trybie sił ścinających. Przedstawiona została konstrukcja sondy pomiarowej wraz z układami aktuacji oraz detekcji wychylenia dźwigni. Opisano procedury wyznaczania czułości aktuacji i detekcji wychylenia. Omówiono architekturę i działanie zintegrowanego mikroskopu wraz z układami piezoelektrycznych skanerów XY oraz Z.

Rozdział 6 omawia procedury pomiarowe wykorzystywane w optymalizacji procesu naświetlania. Procedury te stosowano wykorzystując testowe struktury, dzięki czemu możliwa była ocena wpływu parametrów procesu naświetlania na uzyskany wzór. Procedury te z wykorzystaniem mikroskopu AFM umożliwiały charakteryzację powstającego w emulsji pod wpływem naświetlania obrazu ukrytego, bez konieczności wywoływania emulsji światłoczułej.

Rozdział 7 to podsumowanie rozprawy z konkluzją, że cel pracy został osiągnięty. Wskazane zostały również projekty, w ramach których finansowano prace badawcze. W

końcowej części autor odnosi się do perspektywicznych badań, które należałoby podjąć w omawianej tematyce. Wskazuje się na konieczność modyfikacji konstrukcji sondy. Opracowana dźwignia pomiarowa spełnia wprawdzie wymagania metody, ale lepszym rozwiązaniem byłaby dźwignia o wyższej częstotliwości rezonansowej i mniejszej sztywności. Pożądanym byłoby również wprowadzenie ulepszeń mechanicznych umożliwiających równoległy przesuw układów pozycjonujących sondy i stołu DWL względem próbki. Wskazane są również dalsze prace nad ulepszeniem oprogramowania w kierunku poprawy obsługi stanowiska badawczego.

3. Najważniejsze osiągnięcia autora rozprawy

- Zintegrowanie systemu do fotolitografii bezpośredniej DWL z mikroskopem sił atomowych AFM w postaci urządzenia o zwartej budowie, umożliwiającego charakteryzację naświetlonego ale niewywołanego wzoru.
- Opracowanie konstrukcji mikroskopu AFM pracującego w trybie sił ścinających, gdzie tłumienie drgań dźwigni zależne jest dodatkowo od reaktywności chemicznej badanej warstwy zmodyfikowanej procesem naświetlania. W opracowanej konstrukcji mikroskopu wszystkie elementy funkcjonalne głowicy takie jak sonda pomiarowa czy odpowiedzialne za przesuw skanery piezoelektryczne, zostały usytuowane w taki sposób aby było możliwe badanie próbek o większych rozmiarach niż typowe w mikroskopii AFM.
- Modyfikacja technologii wytwarzania piezorezystywnego układu detekcji wychylenia w porównaniu do standardowej technologii CMOS. Dzięki wstępnej amorfizacji podłoża krzemowego uzyskano złącza p-n o mniejszych prądach upływu i mniejszej ilości defektów typowych dla domieszkowania metodą implantacji.
- Opracowanie oprogramowania sterującego systemem do bezpośredniego naświetlania w celu umożliwienia integracji z mikroskopem AFM oraz oprogramowania do sterowania i akwizycji danych uzyskanych z tego mikroskopu.

Wg. oświadczenia autora rozprawy opracowane rozwiązanie było podstawą do udzielenia przez Urząd Patentowy RP patentu nr 219462. Dokonano również zgłoszenia patentowego na terenie Niemiec, Francji, Anglii, Włoch i Austrii zgodnie z obowiązującą procedurą EPC.

4. Uwagi krytyczne

W pracy nie dostrzeżono błędów merytorycznych związanych z tematyką rozprawy. Język rozprawy jest zasadniczo poprawny, mało jest błędów stylistycznych czy pojęciowych. Wyjątkiem są tu m.in.:

- błędne używanie pojęcia „ogniskowa” dla oznaczenia ogniska (m.in. str. 23, 24, 27)
- str. 36 – pojęcie „orbita” ma znaczenie historyczne i przy omawianiu modelu atomu powinno się używać raczej „stan energetyczny” elektronu
- str. 97, pierwszy wiersz – zanik „ekspotencjalny”, nie ma takiego pojęcia w jęz. polskim

Pewną ułomnością są zbędne odwołania literaturowe przy wprowadzaniu wzorów czy struktur szeroko znanych. Przykładem jest tu wzór (5-24) na siłę Lorentza, dla którego dodatkowo następuje odwołanie do książki kursowej z fizyki (pozycja [193]). Analogicznie następuje odwołanie do książki kursowej [221] przy wprowadzaniu warunku Nyquista na

str.136. Przy omawianiu na str. 107 znanego powszechnie układu mostka Wheatstone'a następuje odwołanie do oryginalnej pracy Wheatstone'a z I połowy XIX w, pozycja [196].

We wzorze 2-1 na str. 21 jest błędny wskaźnik sumowania, poza tym tłumaczenie nazwy LWR (Line Width Roughness) na język polski jako „jednorodność szerokości linii” nie jest intuicyjnie poprawne gdyż wg. definicji (2-1) parametr ten charakteryzuje odchylenie od średniej szerokości linii.

W kilku miejscach opis np. procedury pomiarowej jest tak dokładny, że sprawia wrażenie instrukcji obsługi. Przypuszczalnie to m.in. spowodowało, że rozprawa doktorska liczy ponad 200 stron.

5. Ocena końcowa

Wymienione nieliczne uwagi krytyczne nie wpływają w sposób oczywisty na jakość rozprawy doktorskiej, którą oceniam wysoko. Jest niewiele błędów redakcyjnych. Brak błędów merytorycznych, o których należałoby wspomnieć. Widoczny jest bardzo wielki wkład pracy natury eksperymentalnej, zarówno od strony konstrukcji i technologii jak i przede wszystkim przeprowadzonych pomiarów.

Uważam, iż autor w pełni potwierdził tezę rozprawy, że opracowany *system do bezpośredniego naświetlania wzoru DWL ze zintegrowanym mikroskopem sił atomowych AFM pozwala na optymalizację procesu naświetlania bez konieczności wywoływania emulsji*. System ten został wykonany oraz wielokrotnie przetestowany. Wskazane jest jego wykorzystanie szczególnie w produkcji prototypowej i małoseryjnej, gdzie brak jest jeszcze opracowanych standardów technologicznych.

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty i recenzowana rozprawa doktorska **spełnia wymagania** wynikające z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 r oraz wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Andrzeja SIERAKOWSKIEGO do publicznej obrony.

Ponadto biorąc pod uwagę ogólny poziom rozprawy jak również duży dorobek publikacyjny doktoranta związany z rozprawą doktorską (współautorstwo 18 publikacji w tym 4 na liście JCR) oraz perspektywy aplikacyjne uzyskanych wyników uważam, że można uznać pracę doktorską za wyróżniającą się.

Kraków, 25.10.2015 r.

