

prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki
Katedra Elektroniki Morskiej
Uniwersytet Morski w Gdyni

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Piotra Konrada Mierzwińskiego
nt. „Tranzystor bipolarny w technologii VESTIC”

1. Uwagi ogólne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Konrada Mierzwińskiego została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej. Rozprawa ta dotyczy badania możliwości praktycznej realizacji przyrządów półprzewodnikowych, w szczególności tranzystora bipolarnego, w technologii VESTIC. Jest to nowa technologia bazująca na wykorzystaniu w jednej strukturze półprzewodnikowej obszarów wykonanych z krzemu monokrystalicznego i polikrystalicznego i zorientowanych w taki sposób, aby przepływ prądu następował w osi równoległej do powierzchni struktury. Koncepcja tej technologii została opracowana przez badaczy z Politechniki Warszawskiej, a Doktorant zbadał możliwość jej praktycznej realizacji oraz scharakteryzował właściwości elektryczne elementów elektronicznych wykonanych w tej technologii. Do osiągnięć Doktoranta należy m.in. analiza właściwości struktur wykonanych w technologii VESTIC, opracowanie opisu matematycznego właściwości tych struktur i ich modelu dedykowanego dla programu SPICE. Najważniejszym jednak osiągnięciem Doktoranta jest wykonanie struktur testowych w technologii VESTIC oraz pomiary charakterystyk wykonanych elementów, analiza uzyskanych wyników pomiarów i sformułowanie wniosków dotyczących związków parametrów procesu produkcyjnego z parametrami elektrycznymi wytworzonych elementów.

Poruszane w pracy zagadnienia są ważne z punktu widzenia mikroelektroniki. Wyniki uzyskane przez Doktoranta mogą być także przydatne dla projektantów elementów półprzewodnikowych i układów scalonych, pozwalając na uzyskanie właściwości dynamicznych bipolarnych układów scalonych zbliżonych do właściwości układów unipolarnych.

Tematyka podjęta w ocenianej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna, a częściowe problemy rozważane przez Doktoranta są również poruszane w pracach innych autorów w odniesieniu do innych technologii mikroelektronicznych. Prace te zostały opublikowane w ostatnich kilkunastu latach. Dowodzi to trafnego wyboru zagadnienia badawczego.

Doktorant wykazał, że przy wykorzystaniu technologii VESTIC można wytworzyć poprawnie pracujące tranzystory bipolarne, które mogą efektywnie pracować w układach elektronicznych. Rozmiary wytwarzanych struktur tranzystorowych mogą być znacznie mniejsze od elementów wytworzonych przy wykorzystaniu klasycznej technologii planarnej. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji Doktoranta w zakresie technologii wytwarzania, pomiarów, modelowania i analizy właściwości elementów elektronicznych oraz planowania i realizacji badań naukowych.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca liczy łącznie 149 stron i zawiera 6 rozdziałów, dodatki oraz wykaz cytowanej literatury, a także spis treści oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił krótki rys historyczny rozwoju mikroelektroniki, opisał koncepcję technologii VESTIC oraz przedstawił układ ocenianej rozprawy. W szczególności pokazano topografie komórek elementarnych w prezentowanej technologii, tzn. bezzłączowego tranzystora polowego VESFET, polowego tranzystora złączowego VES-JFET oraz tranzystora bipolarnego VES-BJT.

Rozdział drugi zawiera opis właściwości tranzystora VES-BJT. W szczególności przedstawiono topografię tego tranzystora i wyjaśniono znaczenie parametrów geometrycznych jego struktury, które wpływają na właściwości elektryczne tego przyrządu. Wskazano różnice między tranzystorami bipolarnymi wykonanymi w technologii VESTIC oraz w klasycznej technologii SOI. W oparciu o zależności analityczne przedyskutowano wpływ koncentracji domieszek i wymiarów geometrycznych struktury na jej napięcie przebicia. Omówiono zalety stosowania technologii VESTIC i sformułowano cel pracy, którym jest:

Analiza możliwości realizacji tranzystora bipolarnego w technologii VESTIC oraz opis jego właściwości i metod jego modelowania, ze szczególnym uwzględnieniem roli polikrystalicznego krzemu w jego budowie.

Doktorant nie sformułował tezy rozprawy, ale podany powyżej cel pracy jasno definiuje zakres niezbędnych do przeprowadzenia badań. W kolejnych rozdziałach rozprawy Doktorant przedstawił niezbędne rozważania teoretyczne i efekty swoich badań, które pozwoliły na

zrealizowanie celu pracy przy zastosowaniu właściwych metod badawczych.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił analizę właściwości materiałowych krzemu polikrystalicznego. Przedstawione zostały informacje literaturowe na temat wpływu koncentracji domieszek na rezystywność polikrzemu oraz wysokość bariery potencjału na granicy ziaren polikrzemu. Opisano właściwości tranzystora bipolarnego, w którym polikrzem występuje w obszarze emitera. W obszarze tym może występować połączenie krzemu monokrystalicznego z polikrystalicznym lub połączenie to może występować na granicy bazy i emitera. Opisane zostały także modele matematyczne tranzystora bipolarnego z polikrzemowym emiterem. Wskazano, że w tranzystorze VES-BJT, który jest elementem symetrycznym, zarówno emiter, jak i kolektor mogą być wykonane z krzemu polikrystalicznego.

Rozdział czwarty zawiera opis konstrukcji tranzystora VES-BJT. W rozdziale tym przedstawiono ogólną zasadę działania tranzystora VES-BJT uwzględniając poszczególne rozmiary geometryczne struktury półprzewodnikowej, rozkład nośników nadmiarowych w bazie, rozkład gęstości prądu dyfuzyjnego oraz napięcie sterujące baza-emiter. Doktorant przeanalizował też zależność efektywnej szerokości bazy od parametrów geometrycznych i koncentracji domieszek. Opisał sposób przeprowadzania symulacji komputerowych przy wykorzystaniu pakietu TCAD oraz przy zastosowaniu programu SPICE. W przypadku modelu tranzystora bipolarnego wbudowanego w programie SPICE Doktorant podał zależności matematyczne pozwalające na wyznaczenie wartości parametrów tego modelu w oparciu o dane opisujące geometrię badanej struktury tranzystorowej i rozkład koncentracji domieszek.

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono w rozdziale piątym. Opisano w nim zastosowany proces technologiczny, wykonane struktury testowe oraz wyniki ich pomiarów. Przygotowano i zbadano 3 płytki prototypowe. W pierwszej płytce obszary wykonane z polikrzemu są zwarte i badane były właściwości diod z anodą polikrzemową. W drugiej płytce wytworzono działające struktury tranzystorów VES-BJT. W płytce trzeciej wytworzono pary komplementarne takich tranzystorów pozwalające na wytworzenie prostych układów elektronicznych, np. inwerterów. W ramach badań płytki nr 1 zmierzono charakterystyki prądowo-napięciowe wytworzonych rezystorów oraz diod. Wykazano, że charakterystyki wytworzonych rezystorów są liniowe, a charakterystyki diod mogą być zbliżone do charakterystyk diody idealnej. W ramach badań płytki nr 2 zmierzono charakterystyki wyjściowe, wejściowe i przejściowe wytworzonych tranzystorów oraz zależności współczynnika wzmocnienia prądowego od napięcia baza-emiter. Pomiary te

powtórzono po upływie roku i zbadano powtarzalność uzyskanych wyników. Z kolei, dla płytki nr 3 zmierzono charakterystyki statyczne komplementarnych tranzystorów bipolarnych oraz charakterystyki przejściowe inwerterów wykonanych przy wykorzystaniu tych tranzystorów. Wybrane wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonych przy wykorzystaniu programów TCAD oraz SPICE. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że za pomocą technologii VESTIC możliwe jest uzyskanie poprawnie działających tranzystorów bipolarnych. Wskazano też warunki realizacji procesu produkcyjnego niezbędne do wytworzenia takich tranzystorów i wskazano problemy technologiczne, które utrudniają uzyskanie tego efektu. Doktorant przedstawił analizę statystyczną uzyskanych wyników pomiarów i określił odsetek poprawnie pracujących tranzystorów oraz tranzystorów, które po upływie roku pogorszyły swoje właściwości elektryczne oraz te, których właściwości uległy poprawie.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie pracy, w którym Doktorant wskazał swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie.

Wykaz literatury zawiera łącznie 78 pozycji, w tym 6 prac, których współautorem jest Doktorant. Cytowane są zarówno prace klasyczne, jak i aktualne prace opublikowane w ciągu ostatnich 15 lat. Dobór cytowanych prac świadczy o dobrej orientacji Doktoranta we współczesnej wiedzy z zakresu mikroelektroniki.

5 dodatków zawiera fragmenty kodu niezbędnego do przeprowadzenia symulacji komputerowych, listę parametrów modelu Gummela-Poona, zestaw zmierzonych wartości współczynnika wzmocnienia prądowego dla wytworzonych tranzystorów oraz dane opisujące błąd pomiarów wykonywanych za pomocą zastosowanych przyrządów pomiarowych.

3. Uwagi ogólne

Praca jest napisana w języku polskim w sposób zrozumiały. W niektórych miejscach pracy widoczne jest dążenie Autora do nadmiernego skracania myśli. Dlatego brakuje szczegółów stosowanych metod pomiarowych, a część prezentowanych rysunków i tabel nie jest skomentowana w tekście pracy. Praca jest starannie przygotowana pod względem edycyjnym, a w tekście występują jedynie nieliczne i drobne błędy gramatyczne.

Zamieszczone w pracy rysunki są dobrze dobrane i ułatwiają zrozumienie zagadnień poruszanych przez Autora, a także dobrze ilustrują prezentowane w pracy spostrzeżenia i wnioski. Wrażenie robi szeroki zakres prac wykonanych przez Doktoranta i umiejętność syntezy uzyskanych rezultatów, która świadczy o jego wysokich kompetencjach badawczych.

W pracy przedstawiono wyniki badań Doktoranta dotyczące możliwości praktycznej

realizacji tranzystorów VES-BJT oraz pomiarów charakterystyk wykonanych płytek testowych z tymi przyrządami półprzewodnikowymi. Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta, przedstawionych w recenzowanej rozprawie, można zaliczyć:

- Opracowanie modelu tranzystora VES-BJT dla programu TCAD i przeprowadzenie symulacji badanego tranzystora,
- Opracowanie zależności analitycznych wiążących parametry technologiczne tranzystora VES-BJT z parametrami modelu tranzystora bipolarnego wbudowanego w programie SPICE i przeprowadzenie obliczeń za pomocą tego modelu,
- Zaprojektowanie i wykonanie struktur testowych tranzystorów VES-BJT,
- Przeprowadzenie pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych wykonanych struktur testowych,
- Analiza uzyskanych wyników pomiarów i sformułowanie wniosków wskazujących związek między parametrami geometrycznymi struktury tranzystorowej a parametrami elektrycznymi tranzystora,
- Wykazanie doświadczalnie, że zmierzone charakterystyki tranzystora VES-BJT można efektywnie modelować przy wykorzystaniu klasycznego modelu Gummela-Poona,
- Analiza wpływu procesów starzeniowych na charakterystyki wytworzonych struktur tranzystorowych,
- Analiza uzysku produkcyjnego struktur tranzystorowych oraz układów inwerterów zbudowanych przy wykorzystaniu komplementarnych tranzystorów VES-BJT.

Osiągnięcia te dowodzą, że Doktorant opanował umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania przy zastosowaniu nowoczesnych metod naukowych oraz prezentacji uzyskanych wyników badań. Oceniana rozprawa dowodzi, że Doktorant opanował zaawansowaną wiedzę z zakresu mikroelektroniki, modelowania elementów półprzewodnikowych przy wykorzystaniu modeli mikroskopowych oraz modeli skupionych i metod pomiaru właściwości elektrycznych elementów i układów elektronicznych oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka uwag:

- a) W rozprawie dosyć pobieżnie opisano procedurę pomiaru charakterystyk poszczególnych struktur testowych. Przypuszczam, że zrealizowano je przy wykorzystaniu sond ostrzowych. Kształt uzyskanych charakterystyk wskazuje na

to, że pomiar wykonano metodą impulsową. Czy Doktorant mógłby podać parametry czasowe sygnału testującego w czasie pomiarów? Czy każdy pomiar był wykonywany tylko jednokrotnie?

- b) Jak ocenia Doktorant relację między kosztami wytwarzania tranzystorów bipolarnych w klasycznej technologii planarnej i w technologii VESTIC?
- c) Jeżeli tranzystory VES-BJT są symetryczne, to należy oczekiwać, że ich charakterystyki przy polaryzacji normalnej i inwersyjnej będą identyczne. Czy Doktorant wykonał pomiary, które mogłyby potwierdzić tę hipotezę?
- d) Podane w rozprawie wartości współczynnika wzmocnienia prądowego są bardzo małe i nie przekraczają 8,5 (Tabela 17). Jakie są możliwe do uzyskania wartości tego parametru po udoskonaleniu technologii?
- e) Czy przedstawione w rozdziale 5.4 różnice między charakterystykami wytworzonych tranzystorów zmierzone w odstępie roku mogą być spowodowane niedoskonałością procedury pomiarowej? Wątpliwości budzi w szczególności fakt, że część tranzystorów, które nie działały poprawnie, po roku zaczęła poprawnie pracować.

Uwagi powyższe mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają pozytywnej oceny pracy.

4. Uwagi szczegółowe

Oceniana praca jest zredagowana starannie, ale Autor nie ustrzegł się drobnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Najważniejsze z tych usterek podano poniżej.

- a) W rozdziale 2.1 wyodrębniono tylko jeden podrozdział 2.1.1. Jest to działanie nieuzasadnione.
- b) Na rys. 4.9 opis osi i legenda są w języku angielskim, co kontrastuje z językiem polskim, w którym napisano rozprawę.
- c) Na charakterystykach prądowo-napięciowych (np. Rys. 5.4) przyjęto tzw. naukową notację liczb i jednostkę na osi prądowej wyrażoną w amperach. Tymczasem dla czytelnika wygodniejsze jest stosowanie liczb naturalnych i wybór na osi jednostki z odpowiednim przedrostkiem, np. μA .
- d) Tabele zamieszczone w pracy, np. Tabela 1, zawierają dane, do których nie ma odwołania w tekście pracy. Dla lepszej czytelności należy wskazać czytelnikowi, na co m zwrócić uwagę w tabelach.

- e) Na części wykresów pokazanych w rozdziale 5 (np. Rys. 5.8) występuje dużo krzywych w różnych kolorach, dla których nie podano informacji, jakiej struktury dotyczy każda z nich.
- f) Na rys. 5.28 brakuje opisu wielkości prezentowanej na dodatkowej osi pionowej oraz informacji, jakie napięcie występuje na osi poziomej.
- g) Tytuł Tabeli 9 jest niejasny. O nachylenie czego chodzi?
- h) Nie wiem, jak interpretować zawartość Tabeli 14.
- i) W ostatniej linii na stronie 131 nie powinno być minusa w wykładnikach liczb opisujących wartości koncentracji domieszek.
- j) W wykazie literatury nie podano autora pracy [42].
- k) Nie znalazłem w tekście pracy odwołań do tabel zawartych w Dodatkach. Takie odwołania poprawiłyby czytelność pracy.
- l) Występują też drobne uchybienia w zakresie odmiany pojedynczych wyrazów oraz tzw. „literówki”, ale ich liczba jest niewielka.

5. Wniosek końcowy

Oceniana praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w badania właściwości elementów elektronicznych wykonywanych w technologii VESTIC. Badania te obejmowały zarówno symulacje komputerowe, realizację procesów technologicznych, jak i pomiary i analizę uzyskanych wyników. Doktorant samodzielnie rozwiązał ważne zagadnienie badawcze i wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Przedstawione wyniki badań dowodzą, że ich cel sformułowany przez Doktoranta został osiągnięty. Sposób przeprowadzenia badań i przedstawienia ich wyników dowodzą dobrego przygotowania Doktoranta do prowadzenia badań naukowych.

Uwagi sformułowane w punkcie 3 mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony.

W mojej opinii praca spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa. Temat i zakres pracy wpisują się w obszar elektroniki, czyli odpowiadają dyscyplinie naukowej Automatyka, elektronika i elektrotechnika. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Piotra Konrada Mierzwińskiego do publicznej obrony.

Wnioskodawca