

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA i TECHNOLOGIE
KOSMICZNE**

zaprasza na

PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr. inż. Piotra Mierzwińskiego

która odbędzie się w dniu *20 czerwca 2023* roku o godzinie 12:00
w Sali 116, w gmachu Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych PW

Temat rozprawy doktorskiej:

" Tranzystor bipolarny w technologii VESTIC "

Promotor: prof. dr hab. inż. Wiesław Kuźmicz - Politechnika Warszawska

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni

dr hab. inż. Witold Machowski, prof. uczelni, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

*Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1. Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-automatyka-elektronika-i-elektrotechnika-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych>

Przewodniczący Rady Naukowej
Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie
Kosmiczne Politechniki Warszawskiej
Prof. dr hab. inż. Tomasz Starecki

STRESZCZENIE

Od wynalezienia w 1947 r. tranzystora bipolarnego rozpoczyna się epoka burzliwego rozwoju elektroniki półprzewodnikowej. Rozwojowi technologii CMOS towarzyszą narastające problemy dotyczące gęstości wydzielanej mocy, trudnościami z wytwarzaniem izolatorów bramkowych i związanymi z nimi prądami upływu. Dlatego zwracają na siebie uwagę rozwiązania alternatywne w tym możliwość powrotu do technologii bipolarnej. Jednym z alternatywnych rozwiązań jest zaproponowana przez W. Małego technologia VESTIC (ang. Vertical Slit Transistor based Integrated Circuit), która umożliwia wytwarzanie, zarówno przyrządów bipolarnych, jak i polowych.

Praca skupia się na omówieniu tranzystora bipolarnego VES-BJT (ang. Vertical Slit Bipolar Junction Transistor) z uwzględnieniem podstaw teoretycznych, opisu struktury, symulacji numerycznych oraz wyników pomiarów prototypowych struktur.

Celem niniejszej pracy jest analiza możliwości realizacji tranzystora bipolarnego w technologii VESTIC oraz opis jego właściwości i metod ich modelowania, ze szczególnym uwzględnieniem roli polikrystalicznego krzemu w jego budowie. Przedstawiono sposób adaptacji modeli powszechnie stosowanych w przemyśle do nietypowej konstrukcji tranzystora, korzystając z niewielkiej liczby dodatkowych parametrów. Jednocześnie dzięki symetrii struktury możliwe było ogólne ograniczenie liczby parametrów modelu.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że można uzyskać działające struktury tranzystorów bipolarnych w technologii VESTIC. Struktury te potencjalnie mogą być kompatybilne z innymi strukturami, takimi jak tranzystory polowe VES-JFET albo VESFET, jest to jednak obarczone kompromisem związanym ze stosowanymi poziomami domieszkowania.

Opisano prototypowy tranzystor VES-BJT, który jest w pełni działającym tranzystorem bipolarnym, co już samo w sobie jest dużym sukcesem. Udało się potwierdzić, że możliwe jest uzyskanie tranzystorów bipolarnych o wymiarach porównywalnych z analogicznymi strukturami polowymi VESFET.

Technologia VESTIC może stanowić atrakcyjną alternatywę dla współczesnych zaawansowanych konstrukcji opartych na układach CMOS.

Słowa kluczowe: VESTIC, tranzystor bipolarny, model kompaktowy, przyrząd SOI.

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

dr hab. inż. Witold Machowski, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i
Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej**

wykonana na podstawie jej uchwały z dnia 21 czerwca 2022 roku

Autor rozprawy: **mgr inż. Piotr Konrad Mierzwiński**

Tytuł rozprawy: **Tranzystor bipolarny w technologii VESTIC**

Tematyka rozprawy mieści się par excellence w obszarze dyscypliny **elektronika** (w zakresie której wszczęto przewód doktorski) zawierającej się według obecnej klasyfikacji w dyscyplinie: **automatyka, elektronika i elektrotechnika**

1. *(Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrzone w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?)*

Autor przedstawia technologiczno-doświadczalne studium wykonalności tranzystora bipolarnego w strukturze VESTIC (Vertical Slit Integrated Circuits) – pomysłowej technologii, zaproponowanej ponad dekadę temu przez niedawno zmarłego prof. Wojciecha Małego. Układy VESTIC pomimo, że nie weszły jak dotąd jeszcze do praktyki przemysłowej kryją w sobie olbrzymi potencjał: bardzo podobnych i regularnych strukturach matrycowych można implementować różne przyrządy półprzewodnikowe bez istotnych modyfikacji procesów litograficznych. O ile tranzystory polowe zarówno złączowe (JFET) jak i z izolowaną bramką (MOSFET) dla tej technologii są przedmiotem wielu publikacji pochodzących z kilku ośrodków badawczych na świecie, o tyle tematyka tranzystora bipolarnego VES-BJT jest – sądząc np. po indeksacji w bazie IEEEExplore – jest wyłącznie domeną ośrodka warszawskiego (PW-ITE), ze znaczącym udziałem doktoranta we wszystkich publikacjach. Jedna z nich jest samodzielna, dwie pozostałe wspólnie z promotorem (prof. Wiesław Kuźmicz) i jedna w większym zespole autorskim – ale z doktorantem wskazanym jako autorem-korespondentem. Według przepisów obowiązujących w przedmiotowym przewodzie doktorskim rozprawą może być *samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej, jeżeli wykazuje ona indywidualny wkład kandydata przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.* Jest zupełnie oczywiste, że w przypadku opisywanych przedsięwzięć technologicznych i eksperymentalnych konieczna jest współpraca, ale z uwagi na przyjęty przez autora – skądinąd w zgodzie ze standardami redakcji prac naukowych – bezosobowy styl narracji (*uzyskano, zmierzono, wykonano, postanowiono*) oczekuję, że jego indywidualny wkład do części eksperymentalnej – uzyskania prototypów - zostanie jednoznacznie zaakcentowany podczas autoreferatu na publicznej obronie.

Cel pracy został *explicite* sformułowany w punkcie 2.5 dopiero na stronie 19, choć wcześniej dwukrotnie (str. 9 i 13) jest on zapowiadany. Ale patrząc ze strony czytelnika dzieła – nie stanowi to poważnej wady, a nawet, powiedziałbym, uprzyjemnia lekturę.

Wypada odnotować, że rozprawa nie zawiera żadnych tez naukowych i nie zamyka się ich dowodem. Pomimo, że od strony terminologicznej (rozprawa, PhD Thesis) można by obu elementów w takim utworze oczekiwać, żadne przepisy formalne nie stawiają wyraźnie takiego wymogu. Z uwagi na charakter rozprawy – zawiera ona komponent teoretyczny (obliczenia TCAD, modele dla symulatorów układowych), jak i technologiczno-eksperymentalny ewentualne tezy pracy musiałyby być dość ogólne i trywialne.

2. *(Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?)*

Z uwagi na pionierski charakter implementacji BJT-VES literatura tego przedmiotu jest dość skąpa, czego nie można oczywiście powiedzieć o pracach dotyczących technologii bipolarnej w ogólności. W moim przekonaniu autor właściwie i poprawnie dobrał źródła i dokonał ich przeglądu – czego owocem jest rozdział 3 – swoiste kompendium elementów półprzewodnikowych używających warstw polikrystalicznych oraz rozdział 4, w którym wprowadził analityczne modele zjawisk w rozpatrywanym przyrządzie BJT-VES. Większość pozycji bibliograficznych może sprawiać wrażenie nieco anachronicznych, ale sama technologia bipolarna ma lata najbardziej burzliwego rozwoju już za sobą. Z tej perspektywy autor jest zaznajomiony z najbardziej aktualną literaturą przedmiotu. Przykładowo przytacza w trybie relata refero za [74] opinię Kai Christiana Handel'a pochodzącą pracy doktorskiej tegoż – która jest dostępna w języku niemieckim w repozytorium cyfrowym RWTH Aachen. Jednak uznanie budzi w tym kontekście samo wzmiankowanie postaci Herberta Materé – którego wkład w rozwój techniki półprzewodnikowej konsekwentnie zamilczano w opracowaniach historycznych niemal do samej jego śmierci (2011).

Choć wnioski z przeglądu źródeł są poprawne i stanowią dobry punkt wyjścia do dalszej części poświęconej modelowaniu VES-BJT, znacznie słabiej wygląda strona redakcyjna samej bibliografii w strukturze dokumentu oraz przytaczanie pozycji bibliograficznych w tekście. Autor wymienia 78 źródeł, co dowodzi dobrego obeznania piśmiennictwa, ale sama ta liczba jest jednak nieco problematyczna a trudno też jednoznacznie stwierdzić, czy wszystkie pozycje bibliografii są cytowane w tekście pracy.

Otóż przykładowo pozycje własne [17] i [23] są literalnie tożsame, zaś pozycje (też własne) [30] i [35] choć zapisane różnie – dotyczą *de facto* tego samego komunikatu konferencyjnego konferencji ELTE 2013, której materiały zostały udostępnione w bibliotece cyfrowej towarzystwa SPIE. Pozycja wskazana jako [42] jest co prawda osobnym rekordem w bazie IEEEExplore, ale jest niczym innym jak nie zawierającą żadnej treści tzw. „przekładką” (breaker page) sekcji tematycznej materiałów konferencji MIXDES2011 – sesji specjalnej poświęconej technologii VESTIC. Przytaczając na stronie 23 rzekomo pozycje [21-25] bibliografii Autor – trochę wbrew zasadom przyjętego stylu podaje też nazwiska cytowanych autorów a nawet tytuły ich dzieł. To odstępstwo ma jednak swój pozytyw – nieświadomiony czytelnik mógłby studiując tekst doznawać swoistego „dysonansu poznawczego” – bo w rzeczywistości chodzi o pozycje [47-51] ze spisu literatury. Za niefortunne uznaję też wskazywanie Encyklopedii

Powszechnej (i to w jej wydaniu sprzed 20 lat) [1] jako autorytatywnego dla określenia czym zajmuje się elektronika jako nauka – zwłaszcza, w dziele nie tyle popularyzatorskim a stricte naukowym.

3. (Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?)

Autor po przedstawieniu dość obszernych rozważań teoretycznych i zastosowaniu uzasadnionych uproszczeń wynikających z będącej głównym atutem technologii VESTIC horyzontalnej jednorodności struktur wyprowadził analityczne zależności opisujące zależności prądowo-napięciowe dla analizowanego przyrządu. Pomimo zastosowanych uproszczeń analityczne rozwiązania części otrzymanych równań okazało się w ogólnym wypadku niemożliwe, dlatego też przeprowadził symulacje numeryczne z użyciem pakietu TCAD – będącego powszechnie przyjętym narzędziem dla zagadnień modelowania przyrządów półprzewodnikowych. Wyniki uzyskane na tym etapie mogły posłużyć do wstępnego określenia wymaganych poziomów domieszkowania i charakterystycznych wymiarów struktury VESTIC. Uzyskano działające prototypy przyrządu VES-BJT zatem założony cel pracy został osiągnięty.

4. (Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?)

VES-BJT jest przedsięwzięciem pionierskim. Możliwość realizacji tranzystora bipolarnego w technologii VESTIC była przewidywana i zapowiadana przez jej pomysłodawcę od najwcześniejszych publicznych komunikatów naukowych na jej temat, ale przedmiotowa praca jest dokumentacją jedynej jak dotąd podjętej próby praktycznej takiego przedsięwzięcia uzupełnioną o opracowany przez autora generyczny model VES-BJT do użycia w standardowym symulatorze układowym SPICE.

5. (Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?)

Praca jest napisana zrozumiałym i jasnym językiem i jak na utwór profesjonalnej literatury technicznej jej lektura przynosi czytającemu dużą przyjemność. Struktura dzieła jest przejrzysta a tok wyводу logiczny. Przyjęte rozwiązania typograficzne (choć nie mam pewności czy to zasługa autora czy też narzucenie przez Uczelnię wzorców formatowania) w połączeniu ze staranną edycją dają dobry efekt estetyczny. Oczywiście od strony redakcyjnej można wykazać wiele usterek – ale takowe przecież zawsze wystąpią nawet w przypadku książek wydawanych w pełnym cyklu z udziałem redaktora i korekty. Dla przykładu wymienię kilka z nich:

- w opisie części c) rysunku 1.4 i tożsamego z nim rysunku 2.2 jest legenda kolorów, w której jest mowa o zaznaczonym na pomarańczowo obszarze izolacyjnego dwutlenku krzemu który w przyrządach złączowych jak sam autor pisze przecież nie występuje;
- kilka razy autor używa pojęcia „tranzystor poprzeczny”. W polskiej literaturze – choć niezbyt bogatej - „lateral transistor” jest zawsze oddawane jako tranzystor „boczny”;

- fakt redakcji pracy w języku polskim oczywiście nie zabrania użycia słów pochodzenia obcego. Jednak na stronie 12 w drugim od dołu akapicie autor aż trzykrotnie pisze o „homogeniczności” jakby zapominając że mamy w słowniku termin „jednorodność”;
- tłumaczenie skrótu angielskiego ASIC jako „układy przystosowane do specyficznych zastosowań” jest niezbyt udaną kalką językową; tłumaczenie wyrażeń specjalistycznego języka angielskiego na polszczyznę jest zresztą standardową pułapką w dziedzinie elektroniki. Zasadnym wydaje się pytanie-dlaczego wobec wyłącznie anglojęzycznego materiału już opublikowanego przez doktoranta oraz potencjału upowszechniana technologii VESTIC nie zredagowano pracy w języku angielskim?
- złożoność równania (42) (str. 52) jest porównywana z [15]. Nie może tu chodzić o równanie (15) bo dotyczy ono zupełnie innych wielkości fizycznych, z kolei pozycja [15] literatury nie zawiera w ogóle żadnych rozważań ilościowych a zatem nie występują w niej żadne wzory;
- zgodnie z normą poprawnościową dopełniacz liczby mnogiej rzeczownika „złącze” brzmi „złączy”. U autora zdarza się forma poprawna, ale wygrywa „złączyć” – piętnowane już w poradniku prof. Nowickiego „O ścisłość pojęć i kulturę słowa w technice” (WKiŁ 1978)

Kontynuując wątek uwag krytycznych, zwrócę jeszcze uwagę na usterkę znacznie większego kalibru. Otóż na stronie 125 autor pisze: *Zaprezentowane charakterystyki i ich zestawienie mogą budzić pewne wątpliwości, zwłaszcza zestawienie charakterystyk, które przedstawiają Rysunek 5.41 i Rysunek 5.42. Sam Rysunek 5.41 sugeruje wniosek, że tranzystory nie działają prawidłowo, czemu zdaje się przeczyć wynik drugiego pomiaru.* Doceniając szczerą i uczciwą postawę autora (można było przecież kłopotliwych danych eksperymentalnych nie zamieszczać) nie sposób jednak nie zauważyć, że brak jakiegokolwiek wzmianki o ewentualnym powtórzeniu procedur pomiarowych w parze z niepodjęciem jakiegokolwiek próby wyjaśnienia niezrozumiałego zjawiska nie daje najlepszego świadectwa o naukowej dociekliwości kandydata.

6. *(Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?)*

Technologia VESTIC powoli zdobywa popularność – ograniczoną póki co do ośrodków akademickich i stricte badawczych nie doczekawszy się jednak dotąd większego zainteresowania ze strony przemysłu. Z tego punktu widzenia eksperymentalnie potwierdzona możliwość dodania – obok osiagających już znacznie wyższy stopień dojrzałości technologicznej tranzystorów unipolarnych – złączowego tranzystora bipolarnego jest istotnym kamieniem milowym dla VESTIC. Wprowadzie parametry uzyskanego przyrządu bipolarnego nie są imponujące, ale mamy przecież do czynienia z etapem początkowym rozwoju. Martwić może niewielki uzysk produkcyjny i duża liczba nieprawidłowo działających lub zgoła niedziałających przyrządów – ale z drugiej strony z uwagi na regularną strukturę macierzową samego VESTIC-a ewentualne wadliwe elementy można – jak przewidział sam pomysłodawca – w ostateczności oznaczać i rekonfigurować końcową topologią połączeń omijając elementy wadliwe. Jak się wydaje może być to droga do tworzenia atrakcyjnych funkcjonalnie układów scalonych przy ograniczonym wolumenie prototypowania a zarazem

akceptowalnych dla końcowego użytkownika końcowych kosztach. Z tego względu przydatność uzyskanych wyników dla dalszego rozwoju technologii VESTIC jest duża, co w nieco dłuższej perspektywie czasowej może przełożyć się na odbudowę krajowej elektroniki półprzewodnikowej jak optymistycznie zauważa autor w zamykającym rozprawę zdaniu.

(Podsumowanie)

Obowiązujące w tym przewodzie przepisy każą rozprawie doktorskiej stanowić *oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne (...) oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej (...) oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej*. Z przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona rozprawa – pomimo wskazanych wyżej niedociągnięć, głównie natury redakcyjno-edycyjnej – **spełnia te wymagania** i wnioskuję o dopuszczenie jej pod publiczną dyskusję.

LEWALD 18 08 2022

W. Jankowski

