

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 wywodu 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

