



СТАНОВИЩЕ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

област на висше образование : 5. Технически науки

професионално направление : 5.2 Електротехника, електроника и автоматика

**научна специалност : Теория на електронните вериги и електронна
схемотехника**

Автор на дисертационния труд : маг. инж. Александър Петков Радев

катедра „Електронна техника“, ФЕТТ

Технически университет – София

**Тема на дисертационния труд : „Изследване и развитие на методи и подходи за
проектиране на CMOS интегрални схеми, реализирани по дълбоки субмикронни технологии“**

Член на научното жури : проф. д-р Георги Василев Ангелов

катедра „Микроелектроника“, ФЕТТ, Технически университет – София

1. Актуалност на разработваните в дисертационния труд проблеми и конкретни задачи в научно и научноприложно отношение

Полупроводниковата индустрия се развива експоненциално по отношение на степента на интеграция в последните 60+ години, следвайки емпиричната прогноза известна като Закон на Moore. Субмикронните технологии (под 1 μm) влизат в производство в средата на 1980-те, а дълбоките субмикронни технологии (под 100 nm) – в началото на 2000-те години; в последните години индустрията работи на нанометрични технологични възли – 5 nm (2021) и 2 nm (2024-2025). Тези технологични развития са свързани със съответни развития в областта на EDA (електронна автоматизация на проектирането) и по-конкретно с моделирането на полупроводникови устройства. Сnižаването на размерите води до поява на редица нежелани ефекти – наричани късонални ефекти – които компрометират традиционното поведение на полупроводниковите структури.

Напредъкът в развитието на полупроводниковите технологии, води до по-високи изисквания към симулаторите и схемните модели. Основното предизвикателство към моделирането е да осигури достатъчна точност и приложимост за всяка технология. Първоначално моделите се създават с цел описание на работата на полевите транзистори. С развитието на SPICE, моделите започват да отразяват поведението на транзисторите като елементи от електричните схеми. С течение на десетилетията, се оформят четири поколения модели на устройства. Първо поколение модели (Level 1, Level 2 и Level 3 на SPICE) използват опростени физични модели на MOS транзисторите. Отчитат геометрията в моделните уравнения, без да обръщат специално внимание на математическото представяне на зависимостите, което води до редица трудности при пресмятанията по време на симулация. Второ поколение (BSIM1, модифициран BSIM1 и BSIM2), премества фокуса върху схемната симулация и екстракцията на параметри. Така качеството на крайните модели зависи силно от



екстракцията на параметрите. Уравненията са силно повлияни от математическите условия за числена сходимост, като се въвеждат множество емпирични параметри без физически смисъл. Третото поколение модели (BSIM3, BSIM4, BSIM5, MM9, EKV v2.6, ACM) се завръща към по-проста моделна структура и редуциран брой параметри. Повечето параметри са физични, а не емпирични. Моделите разчитат на изглаждащи функции, които резултат в единично уравнение за описание на $I-V$ и $C-V$ характеристиките; съответно $I-V$ и $C-V$ характеристиките са непрекъснати. Последното четвърто поколение модели (HiSIM, MM11, SP и PSP) изхождат от листовия заряд за пресмятане на токовете и са базирани на формулиране на повърхностния потенциал. Описват поведението на устройствата с единични уравнения и характеристиките им са „гладки“ (без прекъснатости) във всички работни режими.

Тематиката на предложени дисертационен труд е в областта на проектиране и моделиране на базови аналогови интегрални схеми чрез утвърдени в практиката подходи – моделиране (i) базирано на праговото напрежение, (ii) базирано на инверсия заряд и (iii) по метода g_m/I_D . Методът на праговото напрежение (V_T) е исторически първият подход за моделиране на MOS транзистори, базиран на уравненията на Shichman-Hodges (1967 г.) и възприет в първите SPICE модели, приложими за дългоканални устройства. При V_T -базираните модели повърхностният потенциал се представя с много опростена функция на входното напрежение; дрейновият ток е линеен спрямо дрейновото напрежение (V_D) за гейтови напрежения (V_G) над V_T и е квадратична функция на V_D за V_G под V_T . Това води до отделни решения за различните работни области на MOSFET, което поражда прекъснатост и налага въвеждане изглаждащи функции за непрекъснато (диференцируемо) свързване на областите. Затова и подходът се нарича още регионално моделиране. При интегриране на зарядите, за да се изведат токовете, се прилага приближението на постепенен канал (GCA). Въпреки своите ограничения, V_T -моделите се използват успешно и до днес – съвременни V_T -модели са BSIM3v3 и BSIM4 на UC Berkley.

Понастоящем актуален в индустрията е подходът за моделиране с повърхностен потенциал (ϕ_s). Най-общо, при ϕ_s -подхода зарядите се представят като неявни функции на терминалните напрежения, изразени чрез повърхностния потенциал. При пресмятане на токовете се използва приближението на листовия заряд (CSA). Такъв съвременен модел е PSP. ϕ_s -моделите предлагат по-голяма точност във всички работни области на транзисторните структури, както и са подходящи за моделиране на устройства, базирани на нови материали като силициев карбид (SiC). По-опростена алтернатива на V_T -моделите, са моделите базирани на инверсия заряд (q_i). При тях плътността на инверсия заряд се апроксимира с помощта на унифицирания модел за контрол на заряда (UCCM) на M. Shur (1990). Такива модели са EKV (EPFL, Швейцария, 1997) и ACM (Бразилия, 2007), реферирани в настоящия труд.

В предложената дисертация, при анализа и пресмятанията са използвани SPICE модели на транзистори от технологични възли 180 nm, 110 nm, 45 nm и 16 nm, съответно навлезли в производство през годините 1999, 2002, 2007 и 2014 г. Фактът, че разглежданите примери са за технологии от преди 10 до 20 години, не ги прави отживели – в полупроводниковата индустрия към момента делът на произвежданите чипове на технологични възли между 180 nm и 100 nm е около 20% от общото производство на чипове, а делът на произвежданите чипове по технологии 90 nm до 45 nm е около 10%; за сравнение, под 10% от цялото производство се пада на чипове по най-новите технологични възли под 10 nm.



2. Степен на познаване състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал

Прави впечатление, че дисертационният труд в размер на 202 страници е много добре структуриран, конкретен, без засягане на нерелевантни към темата въпроси. Библиографията обхваща общо 84 източника, 5 от които са на български език, а останалите – на английски. Авторските статии са 5, от които една е в процес на публикуване. Цитираните публикации обхващат някои основни източници на знания и опит по разглеждания проблем. Демонстрираното от автора осмисляне на съдържанието на проучения литературен материал е предпоставка за постигането на поставените цели в дисертацията.

3. Съответствие на избраната методика на изследване и поставената цел и задачи на дисертационния труд с постигнатите приноси

Целите на дисертационния труд са дефинирани подробно. Основните цели, както са представени от кандидата, включват (i) описание, проучване и анализ на класически методи за проектиране на схеми, (ii) разглеждане на транзисторни модели, използвани за аналитични пресмятания при оразмеряване, (iii) прилагане на известни методики за експериментално снемане на транзисторните параметри, използвани в тези модели, (iv) изследване и усъвършенстване на методи за проектиране на различни видове аналогови схеми в дълбоки субмикронни процеси – схеми за осигуряване на постояннотоков режим, типични усилвателни стъпала, операционни усилватели и сравнение на ефективността на тези методи и (v) отправяне на препоръки към проектантите. Съпоставката на поставените цели на дисертационния труд (в т. 1.3 на стр. 21-22) и обобщените приноси на дисертацията (стр. 165-166) показва припокриване като се забелязва, че целите са по-общо формулирани, а постигнатите приноси са по-конкретни. Налице е съответствие между поставените цели и постигнатите резултати.

Разработките в дисертационния труд имат практически и приложен характер. Избраната методика на изследване е присъща за инженерните науки – включва анализ на приложими литературни източници, идентифициране на основни уравнения за анализ и проектиране на базови функционални елементи на аналоговите интегрални схеми, проектиране и симулация на класически аналогови схеми и валидиране на получените резултати. В дисертацията са решени поставените задачи с използване на известни приложими методи и техники. Значителна част от симулациите са проведени в общодостъпната среда LTspice. Симулациите на моделите за технологии 180 nm, 45 nm и 16 nm са извършени с общодостъпни LTspice моделни карти, а тези на технология 110 nm – в Cadence Spectre с използване на модели XT011 на X-FAB Silicon Foundries SE. Използването на симулатор с отворен достъп дава достъп за проверка на резултатите. Използваните примерни технологии показват, че направените анализи са приложими за различни технологии и модели.

По отношение на изложението, в Глава 1 са засегнати общи въпроси, свързани с моделирането на устройства. Глава 2 представлява литературен обзор – разглежда накратко опростени традиционни модели на MOS транзистори, както и някои основни късоканални ефекти без твърде изчерпателно представяне на материята. В Глава 3 са разгледани базовите DC уравнения на EKV модела (EKV v2.6 е пуснат през 1997 г., а EKV v3.0 – през 2001 г.) и



неговата вариация АСМ (2007 г.). Сравнени са резултатите при проектиране на схема общ сорс с товар, представен като идеален източник на ток (фиг. 3.13) за три различни области на инверсия на транзистора: силна, умерена и слаба чрез три подхода: (i) с модел, базиран на праговото напрежение, (ii) с модел, базиран на инверсия заряд и (iii) чрез g_m/I_D подход. Сравнението е обобщено като "отлично", "много добро" и "лошо" без да са посочени числови изражения на тази класификация.

Глава 4 е посветена на екстракцията на параметри; заслужава да се отбележи, че смисълът на този процес е много добре изразен. Описани са параметрите, за които са представени методи за екстракция, без да е експлицитно аргументиран изборът на тези параметри. Реферира се към четири технологии за производство на транзистори – 16 nm, 45 nm, 110 nm, 180 nm. Представени са ясни и добре систематизирани пресмятания и сравнения на получените резултати от екстракцията на параметри. Глава 5 съдържа сравнение на трите използвани подхода за проектиране на примерите на просто токово огледало, каскодно токово огледало, диференциален усилвател, източник на ток на базата на бета-умножител, източник на напрежение на MOS транзистори в слаба инверсия, операционен усилвател на проводимост с токови огледала, операционен усилвател на проводимост – схема на Miller без да е експлицитно обосновано защо са използвани тези примери. В края на главата е предложено подробно обобщение на резултатите.

В края на глави 2, 3, 4 и 5 са формулирани съответните приноси, но те не са директно пренесени в поместените на стр. 165-166 „Основни приноси на дисертационния труд“, а са обобщени.

Накрая, в приложение, са описани подробно оразмеряванията на схемите разгледани в Гл. 5, както и SPICE кода на използваните модели за симулация. Заслужава да се отбележи, че дисертационният труд е много добре обобщен в „Заключение“.

4. Научни и/или научноприложни приноси на дисертационния труд

В дисертационния труд авторът е посочил общо 6 приноса, определени от него като научноприложни и приложни без да са класифицирани кои приноси от какъв тип са. В принос 1 са посочени твърдения, които са добре известни и изучени: *"Акцентирано е върху предимствата на компактните модели при оразмеряването на аналогови схеми. Анализирани е влиянието на ефектите на късия канал при дълбоките субмикронни технологии."* В същия принос 1 е посочено и че е проведено систематично литературно проучване – заслужава да се отбележи, че литературното проучване е по-скоро предпоставка за постигане на приноси, отколкото принос. Принос 6, който гласи *"На базата на проведените изследвания, в дисертационния труд са формулирани препоръки за проектиране на аналогови интегрални схеми, реализирани по субмикронни и дълбоки субмикронни технологии."*, реално обобщава споменатото в предходните приноси, тъй като в приноси 2, 3 и 4 вече е посочено, че са направени препоръки.

Класифицирам приносите на кандидата като приложни и ги обобщавам, както следва:

- изследване, анализиране, оразмеряване и сравнение на три основни подхода за проектиране на аналогови интегрални схеми: (i) базиран на праговото напрежение, (ii) базиран на инверсия заряд и (iii) чрез g_m/I_D подход;
- формулиране на съответни практически препоръки за проектиране на аналогови схеми вследствие на изследване и обобщаване на известни моделни уравнения, използвани при прилагането на горните подходи, приложение на известни методи



за експериментално извличане на моделни параметри и съпоставка на разглежданите методи при проектиране на базови аналогови схеми;

- предлагане на усъвършенствани процедури за изследване, класификация и проектиране на аналогови интегрални схеми, които биха могли да намерят практическо приложение при проектиране на аналогови интегрални схеми в процеса на обучение на студенти и докторанти.

На база гореописаното, считам, че приносите адекватно отразяват получените резултати в дисертационен труд и са в съответствие с изискванията за придобиване на образователна и научна степен „Доктор“.

5. Преценка на публикациите по дисертационния труд и отражение в науката

Резултатите, свързани с дисертационния труд, са представени в 5 статии: 4 статии са докладвани на български конференции с международно участие, индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (Scopus) и една статия е приета в българското списание „Е+Е“, като е в процес на отпечатване; 4 статии са обзорни; всички статии са самостоятелни (без съавтори) и всички са на английски език; в Scopus са индексирани 4 статии, където са налице 4 цитирания.

Вижда се, че минималните изисквания точки по групи показатели за ОНС „Доктор“ са удовлетворени. Публикациите отразяват получените резултати и приноси. Ето защо, мога да направя заключение, че основните резултати от дисертационния труд са станали достояние на националната и международната научна общност.

6. Мнения, препоръки и бележки

Дисертационният труд се откроява с практическа приложност. Написан е на ясен и разбираем език. Прави впечатление консистентността на изложението. Графиките навсякъде са четливи и ясни. Само на няколко места има пунктуационни грешки и граматически грешки като неправилно членуване или словоред, което прави много добро впечатление. Докторантът демонстрира познаване на състоянието в областта на дисертацията и доказва способностите си с представените резултати. Особено полезни в практическо отношение са направените изводи под формата на препоръки, както и представените подробни пресмятания при оразмеряване на базови аналогови блокове. В бъдещата си работа кандидатът би могъл да оформи и публикува ръководство за семинарни упражнения по проектиране на аналогови схеми, както и да задълбочи и разшири обекта на изследвания, като се насочи към реномирани научни конференции и научни списания с импакт фактор и квартали.

Бележките и препоръките класифицирам в две гупи: по същество и по оформление.

По същество

Забелязват се уравнения, които са математически некоректно изписани – напр. в ур. (2.21) на стр. 31 и (2.23) на стр. 32 в лявата страна е посочен токът I_D , а отдясно стои производна по y (dQ_I/dy). Има и пропуски, свързани с математически преобразувания – напр. от ур. (2.23) с интегриране по дължината на канала се преминава към ур. (2.24), но не са посочени експлицитно границите на интегриране.



Препоръчвам описанието на видовете подходи за моделиране, както и на използваните модели (в т. 2.2), да бъде разширено, предвид факта че това е основна тема в дисертацията.

Работата би спечелила, ако се засили акцентът върху новостите в приносите на дисертанта в сравнение с известните резултати, тъй като се прилагат утвърдени модели и методи, за които има богата литература. По-ясно да се обоснове в какво се състои усъвършенстването на известните процедури за проектиране на основни класове функционални елементи на аналоговите схеми и съответно до какви ползи води то – по-добра точност, оптимизирани уравнения, по-голяма бързина, по-широка област на приложение. Например, в Глава 4 се посочват 4 метода за екстрахиране на параметъра "специфичен ток" (specific current, I_s ; по същество това е нормализиращ коефициент в EKV модела и EKV-свързаните модели). В приносите към главата (т. 4.13) е посочено, че метод 4 в т. 4.3 е „предложен модифициран метод“, т.е. това е принос на автора за първоначално определяне на I_s , но в текста на т.4.3 това не е експлицитно упоменато.

В Глава 4 става дума за екстракция на напрежението на Early: обикновено при MOS транзисторите се работи със свързания параметър "коефициент на модулация на дължината на канала" λ – в текста на стр. 65 λ е споменат, но в обратен смисъл (че λ се използва понякога).

По оформление

Забелязват се слабости по отношение на форматирането – в целият текст на дисертацията символите на променливи не са изписани в *курсив (italic)* – например изписано е V_G , а не $V_{G,}$; това се отнася както за символите в текста, така и за символите в уравненията. В някои уравнения има неправилно отпечатани символи – напр. " ζ " в ур. (2.1) на стр. 27.

Библиографията обикновено се поставя в края на труда, а в случая тя се намира преди приложението (което предполага, че в приложението не се цитира литература). Някои от литературните източници не са изписани с всички атрибути на литературен източник – напр. [7], [9], [40]. Други не са изписани коректно: например [24] – книгата на бразилските изследователи Carlos Galup-Montoro и Marcio Schneider, която се явява основен източник – е цитирана по втори автор.

Номерацията на страниците не е консистентна – дисертацията е номерирана последователно по страници до края на библиографията (завършваща на стр. 172), а след това страниците на приложението (означено с пореден номер б) започват от номер едно.

В текста на много места липсват препратки към литературни източници или представения материал в приложението, което затруднява проследяването на изложението – например, но не само, в табл. 4.1 са посочени експериментално снети стойности на специфичния ток на NMOS транзистор, реализиран в 45 nm технология, но не е предоставена препратка към лит. източници [13] и [40] или модела за този транзистор в приложението.

Има изрази, които заслужават редакция – например на стр. 10 от Глава 6 "Моделът осигурява много добра интуиция на проектанта в какъв режим на инверсия е транзисторът..." или на стр. 11 от същата глава: "Въпреки че промяната е преувеличена, тенденцията е правилна, а моделът осигурява ясна представа за по-дълбокото навлизане в линеен режим на транзистора.". Има и очевидни твърдения, които не добавят стойност, напр. в "Заклучение" на стр. 163: "Проектантът трябва да е запознат със спецификите на субмикронните технологии, ефектите на късия канал и различните модели и методи за



проектиране, предимствата и ограниченията на тези методи. Това би му помогнало при избор на метод на проектиране и последващият избор на геометрични размери и работни точки."

Забелязаните недостатъци и отправените бележки, мнения и препоръки не нарушават впечатлението, което оставя дисертацията, както и постигнатите практически резултати.

7. Заключение с ясна положителна или отрицателна оценка на дисертационния труд

Въз основа на получените резултати и приноси, считам, че представеният дисертационен труд отговаря напълно на изискванията за присъждане на образователна и научна степен "Доктор", съгласно ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и ПУРПНСТУС. Поради това, давам положителна оценка на представения дисертационен труд.

Предлагам на научното жури да присъди на маг. инж. Александър Петков Радев образователната и научна степен "Доктор" в област на висшето образование "5. Технически науки", професионално направление "5.2. Електротехника, електроника и автоматика", научна специалност "Теория на електронните вериги и електронна схемотехника".

Дата: 29.08.2025 г.
гр. София

ЧЛЕН НА ЖУРИТО : (н)
/проф. д-р Георги Ангелов/

