

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ MOSFET TRANZISTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

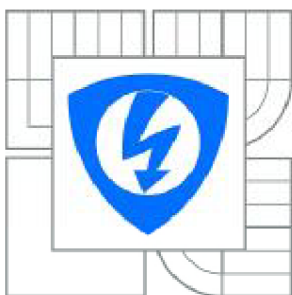
Bc. JAN MAJOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ MOSFET TRANZISTORU

COMPUTER MODELING OF MOSFET TRANSISTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

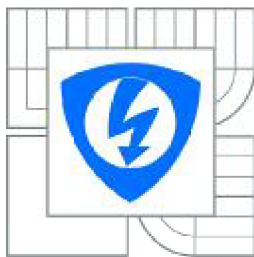
Bc. JAN MAJOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL POKORNÝ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jan Major

ID: 73001

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Počítačové modelování MOSFET tranzistoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a detailně popište makroskopický model driftu a difúze polovodičových struktur. Seznamte se s postupem modelování polovodičových struktur v programu COMSOL Multiphysics. Postup modelování ověřte na jednoduchém příkladu. Vytvořte model MOSFET tranzistoru. Výsledky simulací v programu COMSOL Multiphysics porovnejte s výsledky referenčních výpočtů ve specializovaném programu TiberCAD.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SELBERHERR, S. Analysis and Simulation of Semiconductor Devices. Hiedelberg: Springer-Verlag, 1984.

[2] KRAMER, K. M., HITCHON, W. N. G. Semiconductor Devices a Simulation Approach. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1997.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na počítačové modelování PN přechodu a MOSFET tranzistoru v programu COMSOL Multiphysics a v programu TiberCAD. V textu je pojednáno o driftu a difúzi v polovodičích. Také je ukázán způsob modelování PN přechodu a MOSFET tranzistoru v programech a srovnání modelů.

KLÍČOVÁ SLOVA

MOSFET, tranzistor, COMSOL Multiphysics, modelování, simulace, analýza, polovodič, drift, difúze, PN přechod, TiberCAD

ABSTRACT

Work is focused on computer modeling of PN junction and MOSFET transistor in the program COMSOL Multiphysics and in program TiberCAD. The text is discussed on the drift and diffusion in semiconductors. Also shown is a method of modeling the PN junction and MOSFET transistor in the programs and compare models.

KEYWORDS

MOSFET, transistor, COMSOL Multiphysics, modeling, simulation, analysis, semiconductor, drift, diffusion, PN junction, TiberCAD

MAJOR, J. *Počítačové modelování MOSFET tranzistoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Pokorný.

PROHLÁŠENÍ

Jako autor diplomové práce na téma „Modelování MOSFET tranzistoru“ dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Pokornému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	vii
Úvod	1
1 Struktura a funkce mosfet tranzistoru	2
1.1 Vlastní a nevlastní polovodiče.....	2
1.1.1 Vlastní polovodiče	2
1.1.2 Nevlastní polovodiče.....	2
1.2 Tranzistor s vodivým kanálem.....	3
1.3 Tranzistor s indukovaným kanálem	4
2 Základní teorie a rovnice polovodičů	6
2.1 Drift a difúze v polovodiči	6
2.1.1 Drift	6
2.1.2 Difúze	7
2.2 Poissonova rovnice	8
2.3 Rovnice kontinuity.....	8
2.4 Kinetická rovnice nosičů náboje.....	9
2.5 Generace rekombinace	9
2.6 Fyzikální parametry	10
2.7 Základní rovnice a okrajové podmínky.....	10
3 Model PN přechodu	13
3.1 Implementace modelu driftu a difúze v programu COMSOL.....	13
3.1.1 Modul Poissonovy rovnice	13
3.1.2 Modul konvence a difúze	13
3.2 Model v programu COMSOL.....	14
3.2.1 Konstanty PN přechodu.....	14
3.2.2 Rovnice PN přechodu.....	14
3.2.3 Podmínky subdomén	15
3.2.4 Okrajové podmínky PN přechodu.....	15

3.2.5	Nastavení Sítě	16
3.2.6	Nastavení řešení	16
3.2.7	Výpočet.....	16
3.3	Model v programu TiberCAD	16
3.3.1	Grafické znázornění PN přechodu	16
3.3.2	Zdrojový text simulačního skriptu	17
3.4	Srovnání modelů PN přechodů	19
3.4.1	Grafy s konstantní mobilitou	20
3.4.2	Grafy se závislou mobilitou na parametrech.	21
4	Modelování MOSFET tranzistoru	22
4.1	Modelování v programu COMSOL Multiphysics	22
4.1.1	Struktura	22
4.1.2	Doménové rovnice	22
4.1.3	Okrajové podmínky modelu	23
4.1.4	Moduly, rovnice a konstanty pro modelování	25
4.1.5	Nastavení subdomén u modulů	31
4.1.6	Nastavení okrajových podmínek modulů a parametrických hodnot... 32	
4.1.7	Nastavení sítě a výpočetního skriptu.....	33
4.2	Modelování v programu TiberCAD.....	33
4.2.1	Postup modelování.....	33
4.2.2	Struktura simulačního skriptu a nastavení regionů	34
4.2.3	Nastavení okrajových podmínek pro analýzu.....	34
4.2.4	Nastavení okrajových podmínek jednotlivých regionů.....	36
4.2.5	Nastavení rozmítání a ostatních parametrů	37
4.2.6	Nastavení vyhodnocovacích parametrů.....	38
4.3	Srovnání modelů	39
5	Závěr	49
	Literatura	50
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	51
	Seznam příloh	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Struktura tranzistorů s vodivým kanálem.....	4
Obr. 1.2:	Struktura tranzistorů s indukovaným kanálem.	5
Obr. 3.1:	Grafická závislost proudové hustoty J na nastavovaném napětí V_d s lin. osou y	20
Obr. 3.2:	Grafická závislost proudové hustoty J na nastavovaném napětí V_d s log. osou y	20
Obr. 3.3:	Grafická závislost proudové hustoty J na nastavovaném napětí V_d s lin. osou.	21
Obr. 3.4:	Grafická závislost proudové hustoty J na nastavovaném napětí V_d s log. osou y	21
Obr. 4.1:	Rozměry tranzistoru.....	22
Obr. 4.2:	Pomocná struktura tranzistoru pro nastavení okrajových podmínek.	25
Obr. 4.3:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro V_g 1 V.	39
Obr. 4.4:	Příklad grafického srovnání průběhů při ladění parametrů.....	40
Obr. 4.5:	Příklad grafické srovnání modelů při ladění parametrů.....	41
Obr. 4.6:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0 V.	42
Obr. 4.7:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,2 V.	42
Obr. 4.8:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,4 V.	43
Obr. 4.9:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,6 V.	43
Obr. 4.10:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,8 V.	44
Obr. 4.11:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1 V.	44
Obr. 4.12:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,2 V.	45
Obr. 4.13:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,4 V.	45
Obr. 4.14:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,6 V.	46
Obr. 4.15:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,8 V.	46
Obr. 4.16:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 2 V.	47
Obr. 4.17:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1 V.	48
Obr. 4.18:	Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1 V.	48
Obr. 5.1:	Příklad geometrie.....	58
Obr. 5.2:	Příklad meshové mřížky.	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1:	Nastavení rovnic	14
Tab. 3.2:	Nastavení rovnic	15
Tab. 3.3:	Nastavení modulu c_n PN přechodu.....	15
Tab. 3.4:	Nastavení modulu c_p PN přechodu.....	15
Tab. 4.1:	Přehled používaných konstant část č. 1.....	26
Tab. 4.2:	Přehled používaných konstant část č. 2.....	27
Tab. 4.3:	Přehled používaných konstant část č. 3.....	28
Tab. 4.4:	Přehled používaných vzorců.....	30
Tab. 4.5:	Nastavení rovnic	31
Tab. 4.6:	Nastavení modulů ψ_0 a ψ_1	31
Tab. 4.7:	Nastavení modulu c_n	31
Tab. 4.8:	Nastavení modulu c_p	32
Tab. 4.9:	Nastavení modulu c_n	32
Tab. 4.10:	Zobrazení příkladu laděných parametrů.....	40
Tab. 4.11:	Příklad nastavení a laděných parametrů.....	41

ÚVOD

MOSFET tranzistor je jeden z nejpoužívanějších elektronických prvků moderní elektroniky, která dnes zaznamenává velký rozvoj. Od roku 1947, kdy byl poprvé vynalezen tranzistor, dosáhla technologie výroby tranzistorů velkého rozvoje. Dnes se vyrábí několik druhů a různých modifikací tranzistorů podle potřeby. K velké oblibě jsou tranzistory používány jako spínací součástky pro velké proudy. Dnes se také používají ve výkonové elektronice a v signálové technice [16]. MOSFET tranzistor je používán jako jeden ze základních kamenů elektronických struktur, jako jsou složité struktury mikroprocesorů, pamětí, FPGA obvodů a ostatních integrovaných obvodů. [16]. Zkratka MOSFET je složená ze slov Metal (kov) Oxide (oxid) Semiconductor (polovodič) Field (pole) Effect (efekt) Tranzistor. Tento druh tranzistoru patří do skupiny polem řízených tranzistorů, kde je vodivost kanálu řízená napětím na hradle [16] a [7].

Rozvoj také zaznamenaly simulační programy, které jsou hojně používány k modelování dějů fyzikálního chování polovodičů a kde jsou používány rovnice driftu a difúze. V textu jsou uvedeny základní rovnice, jimiž se modelují probíhající děje v polovodiči při analýze.

Cílem práce je implementace modelu driftu a difúze polovodičových struktur v programu COMSOL Multiphysics a porovnání modelu MOSFET tranzistoru modelovaného v programu COMSOL Multiphysics s tranzistorem modelovaným ve specializovaném programu TiberCad. V textu je pojednáno o modelování využívající fyzikální princip driftu a difúze. Dále jsou uvedené základní rovnice používané v modelování polovodičových struktur, které také využívají jmenované programy COMSOL Multiphysics a TiberCAD.

1 STRUKTURA A FUNKCE MOSFET TRANZISTORU

Základní rozdělení struktury MOSFET tranzistorů je na tranzistory s vodivým kanálem, kde vodivý kanál existuje již při nulovém napětí na hradle, a s indukovaným kanálem, kde se vodivý kanál vytvoří až při určité hodnotě napětí. Oba druhy tranzistorů mají hradlo (gate) oddělené tenkou vrstvičkou oxidu křemičitého [16]. Dále se dělí podle druhu použitého vodivého kanálu. Vodivý kanál může být vodivosti typu N a vodivosti typu P. Pro další vysvětlení principu činnosti MOSFET tranzistoru je zaměřeno na tranzistor s vodivým a s indukovaným kanálem typu N [7].

1.1 Vlastní a nevlastní polovodiče

1.1.1 Vlastní polovodiče

Vlastní polovodič se podobá izolantu a vodivý energetický pás je prázdný (bez volných elektronů) při 0 K [10]. Při zvýšení teploty nebo jiného vlivu můžou elektrony získat dostatečnou energii a přejít tak z valenčního do vodivého pásu. Tento děj je nazýván jako ionizace [10]. Přenášet elektrický proud nad teplotu 0 K mohou koncentrace volných elektronů n ve vodivém pásu a pohyblivé koncentrace volných děr p ve valenčním pásu. Protože současně vzniká vodivý elektron a pohyblivá díra, hustota elektronů se rovná hustotě děr a to je rovno intrinsické koncentraci nosičů ni [1], [3], [7], [9] a [10]

$$n = p = ni . \quad (1.1)$$

Jeden atom čtyřmocného prvku používá k zajištění čtyř vazeb čtyři valenční elektrony se sousedními atomy v krystalové mřížce [10]. V praxi jsou nejpoužívanější nevlastní polovodiče, kde je vlastní polovodič upraven přidáním příměsi, z nichž jsou vyrobeny elektronické součástky. Tím se dosáhne určitých elektrických vlastností.

1.1.2 Nevlastní polovodiče

Nevlastní polovodič lze získat přidáním trojmocného prvku (In - Indium, Ga - Galium) nebo pětimocného prvku (P - Fosfor, As - Arsen). Trojmocné a pětimocné prvky sousedí v periodické tabulce prvků s prvky čtyřmocnými (Si - Křemík, Ge - Germanium) [3] a [10].

Přidáním atomu trojmocného prvku do krystalové mřížky čtyřmocného prvku se všechny tři valenční elektrony zúčastní vazeb. Čtvrtá vazba zůstane prázdná. Jeden elektron chybí. Tento nevlastní polovodič je označován jako polovodič typu P. Pro vodivost stačí malá energie k tomu, aby byl jeden ze sousedních elektronů uvolněn a obsadil tuto prázdnou vazbu [10]. Pohyblivá díra je nazývána akceptorem.

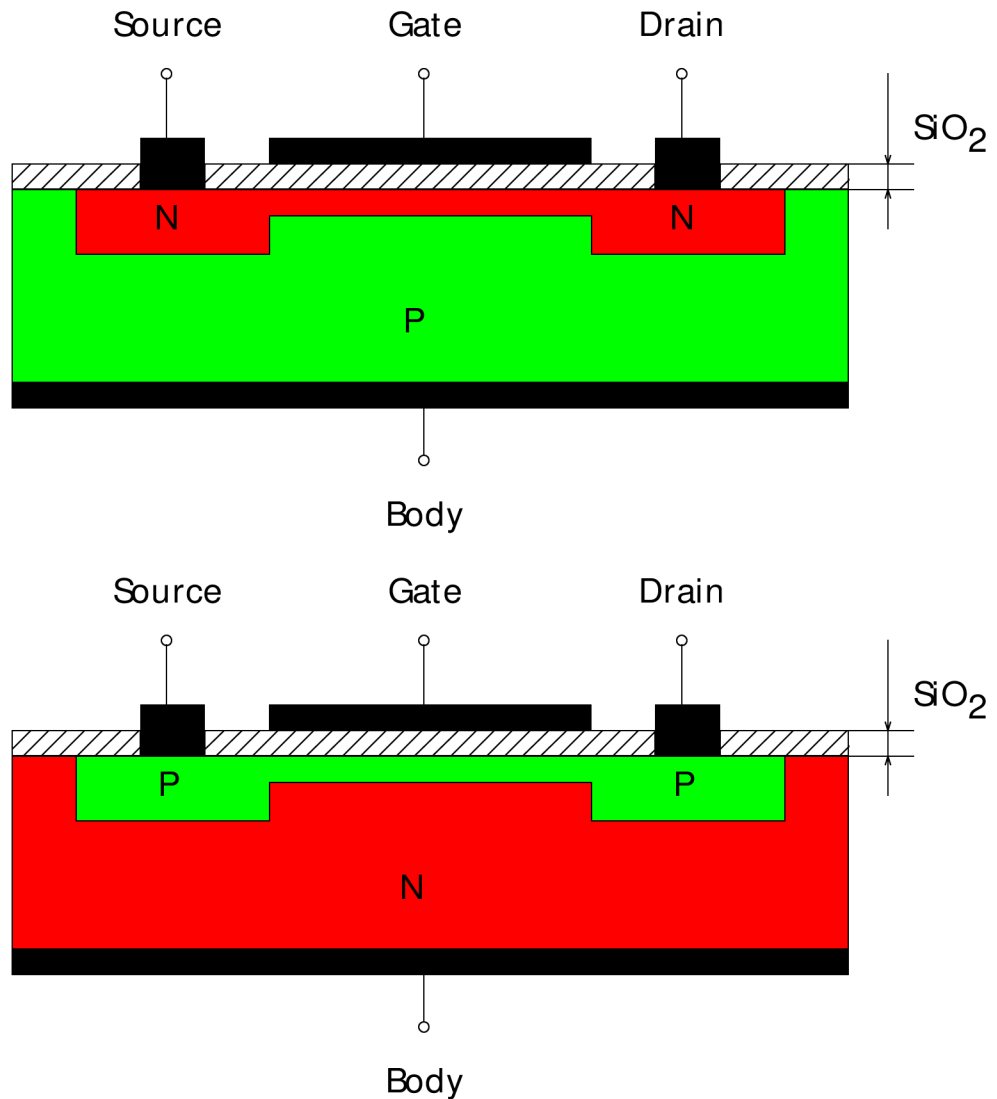
Podobně přidáním atomu pětimocného prvku do krystalové mřížky čtyřmocného

prvku se čtyři z pěti valenčních elektronů zúčastní vazeb a pátý je vázán jen velmi slabě. K zajištění vodivosti postačí malá energie, aby byl elektron uvolněn do vodivého pásu. Volný elektron je nazýván donorem [10].

1.2 Tranzistor s vodivým kanálem

Tranzistory s vodivým kanálem se vyrábí jak s vodivým kanálem typu N mezi elektrodami drain a source, tak i s kanálem typu P. U tranzistoru s vodivým kanálem jsou difúzní technologií do základní substrátové destičky vytvořeny dvě oblasti s vysoce dotovaným polovodičovým materiálem typu N. Mezi tyto dvě oblasti je vytvořen vodivý kanál typu N s nízkou koncentrací nosičů, který je vodivě spojuje [9]. Tím je zajištěná existence vodivého kanálu už při nulovém napětí na hradle gate. Elektrody source a drain jsou přímo spojeny s vodivým kanálem. Tenká vrstvička oxidu izoluje vodivý kanál od elektrody gate [9].

V okolí přechodu PN bude vytvořena vyprázdněná oblast. Bude-li přiloženo elektrické napětí mezi elektrody drain a source a zároveň je aplikované napětí na hradle gate nulové, dojde ke vytvoření elektrického proudu, který bude růst s růstem napětí mezi elektrodami drain a source. Zároveň dochází k rozšiřování vyprázdněné oblasti, jelikož je PN přechod přiloženým napětím polarizovaný v závěrném směru [9]. Rostoucí proud je omezován šířkou vyprázdněné oblasti. Proud roste jen do určité hodnoty přiloženého napětí a potom už k růstu proudu nedochází. Kolektorový proud je nasycen [9]. Na Obr. 1.1 je zobrazena struktura tranzistoru s vodivým kanálem [9].

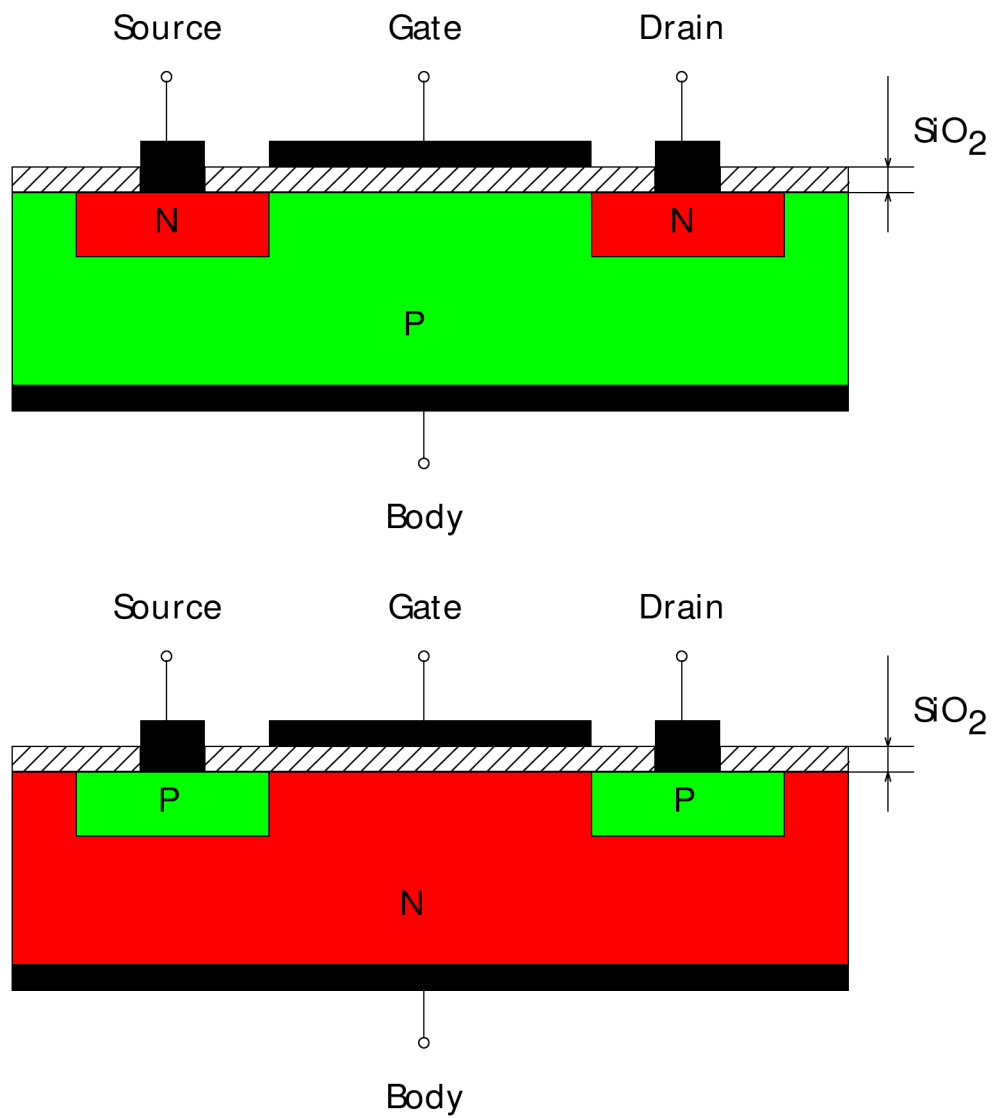


Obr. 1.1: Struktura tranzistorů s vodivým kanálem.

1.3 Tranzistor s indukovaným kanálem

Tranzistory s indukovaným kanálem se také vyrábí s kanálem typu N a P. Tento typ tranzistoru je použit jako model k simulaci. Struktura MOS tranzistoru s indukovaným kanálem je podobná jen s tím rozdílem, že mezi vysoce dotovanými oblastmi typu N není výrobní technologií vytvořen vodivý kanál.

Funkce tranzistoru je obdobná. Při nulovém napětí na hradle gate neteče žádný proud mezi elektrodami drain a source. Je-li hradlo gate připojeno na kladné napětí, pak dojde k odpuzení majoritních nosičů (děr - akceptorů) od rozhraní oxidu a polovodiče typu P. Zároveň jsou menšinové nosiče (elektrony) přitahovány k rozhraní. Tím vzniká inverzní vrstva a vodivý kanál k vedení elektrického proudu [3], [7] a [9]. Kolem inverzní vrstvy vzniká vyprázdněná oblast, jejíž šířka je řízena velikostí přiloženého napětí mezi drain a source elektrody. Uvedená struktura je na Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Struktura tranzistorů s indukovaným kanálem.

2 ZÁKLADNÍ TEORIE A ROVNICE POLOVODIČŮ

Základní rovnice pro analýzu polovodičů mohou být odvozeny z Maxwellových rovnic nebo z Boltzmanovy transportní rovnice. Chování elektronu je na mikroskopické úrovni popisováno kvantovou fyzikou částic a Schödingerovou rovnicí jako superpozicí různých vlnových funkcí [11]. Problémy transportu částic v makroskopickém měřítku popisuje Boltzmanova kinetická rovnice, která je k matematickému řešení značně složitá. Při uvážení řady zjednodušení, se řešení kinetické rovnice zjednoduší na systém parciálních diferenciálních rovnic, které tvoří matematický popis polovodičů nazývaný model driftu a difúze [11].

2.1 Drift a difúze v polovodiči

V této kapitole jsou představeny základní formulace modelu driftu a difúze používané pro modelování přechodu polovodiče. Na vedení proudu v polovodiči se podílejí tři základní mechanismy a to drift, difúze a generace – rekombinace nosičů [10].

2.1.1 Drift

Mechanismus driftu v polovodiči je definován jako pohyb nabitě částice v elektrickém poli [10]. S přiloženým napětím na polovodič se elektrony s nábojem $-q$ pohybují proti směru elektrického pole a díry s nábojem $+q$ ve směru působení elektrického pole. Z makroskopického pohledu se nosiče pohybují konstantní driftovou rychlostí v_d [10].

Pohybem nosičů plochou kolmou na směr šíření vzniká driftový proud $I_{n,drift}$ [10] a můžeme jej spočítat dle vztahu [10]

$$I_{n,drift} = qn v_d S, \quad (2.1.1.1)$$

kde pohybující se nosiče jsou elektrony. Více se používá rovnice proudové hustoty J , kterou se získá s použitím vztahu (2.1.1.2) [10] a použitím vztahu (2.1.1.3) [3] a [10]

$$J = \frac{I}{S}, \quad (2.1.1.2)$$

$$v_d = \mu_n E, \quad (2.1.1.3)$$

kde μ_n je efektivní pohyblivost elektronů (2.1.1.4) [4], τ_n relaxační doba elektronu a m_e je efektivní hmotnost elektronu. Z těchto rovnic se získá vztah proudové hustoty driftu pro elektrony (2.1.1.5) [4]

$$\mu_n = \frac{q \cdot \tau_n}{m_e^*}, \quad (2.1.1.4)$$

$$J_{n,drift} = qn\mu_n E \quad (2.1.1.5)$$

a obdobně při použití pohyblivostí děr μ_p získáme vztah proudové hustoty driftu pro díry [10]

$$J_{p,drift} = qp\mu_p E. \quad (2.1.1.6)$$

Vztah (2.1.1.3) představuje experimentálně zjištěnou driftovou rychlost s přiloženým elektrickým polem [10]. Pohyblivost μ_n je definována rovnicí (2.1.1.4), která vyjadřuje přímou závislost na relaxační době elektronu a nepřímou závislost na efektivní hmotnosti elektronů [4]. Podobně je definována pohyblivost děr vzorcem (2.1.1.7) [4]

$$\mu_p = \frac{q \cdot \tau_p}{m_p^*}. \quad (2.1.1.7)$$

2.1.2 Difúze

Difúze je fyzikální jev, kde můžeme sledovat neuspořádaný tepelný pohyb částic. V makroskopickém měřítku se jedná o pohyb částic z místa s vysokou koncentrací do místa s nízkou koncentrací částic až do doby vyrovnání koncentrace částic [10].

Difúzní tok částic lze dle 1. Fickova zákona vyjádřit vztahem [10]

$$J = -D\nabla c, \quad (2.1.2.1)$$

kde D je difúzní koeficient a c je libovolná koncentrace částic [10]. Jestliže existuje nenulový gradient ve směru osy x způsobený rozdílnou koncentrací příměsí, pak dle 1. Fickova zákona dostaneme vztahy [10] (v jednodimenzionální (1D) formulaci)

$$J_{n,dif} = qD_n \frac{dn}{dx}, \quad (2.1.2.2)$$

$$J_{p,dif} = -qD_p \frac{dp}{dx}, \quad (2.1.2.3)$$

kde D_n a D_p jsou difúzní koeficienty elektronů a děr [10].

Rozdíl v pohybu driftového proudu a difúzního proudu je ten, že driftový proud elektronů a děr teče stejným směrem a difúzní proud elektronů teče opačným směrem, než difúzní proud děr a celkový proud je jejich rozdílem [10]. Vztah pro celkový proud (proudovou hustotu) ve směru osy x [10] (v 1D formulaci)

$$J_x = qE_x (\mu_n n + \mu_p p) + q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right). \quad (2.1.2.4)$$

2.2 Poissonova rovnice

Poissonova rovnice je odvozena z třetí diferenciální Maxwellové rovnice pro Gaussův zákon elektrostatiky (2.2.1) [11] a z rovnice pro elektrické pole E (2.2.2) [11]

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (2.2.1)$$

$$E = -\nabla\psi, \quad (2.2.2)$$

kde D značí elektrickou indukci, ρ hustotu volného náboje a ψ elektrický potenciál. Z těchto rovnic a úpravou dostaneme rovnici pro elektrický potenciál [1] a [11]

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \psi) = -\rho, \quad (2.2.3)$$

kde ϵ představuje permitivitu prostředí. Při analýze polovodičů za ρ použijeme dosazení součtu koncentrace záporně nabitých elektronů n a koncentrace kladně nabitých děr p . Dále jsou tyto koncentrace kompenzovány koncentrací pevného náboje příměsí N , kde N představuje součet koncentrace ionizovaných donorů a akceptorů. Tyto koncentrace jsou v součinu s elementárním nábojem q . Vztah [1] a [11]

$$\rho = q(p - n + N). \quad (2.2.4)$$

Dosazením vztahu (2.2.4) do rovnice (2.2.3) získáme konečný tvar Poissonovy rovnice (2.2.5) používanou pro modelování elektrostatického pole v polovodičových strukturách [11]

$$\nabla \cdot (\nabla \psi) = \frac{q}{\epsilon} (n - p - N). \quad (2.2.5)$$

2.3 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vychází z první Maxwellové rovnice pro zákon celkového proudu (viz. příloha A3 vzorec (A.3.1)) a aplikováním operátoru divergence na tuto rovnici dostaneme vztah (2.3.1) [11]. Úpravou rovnice rozložením vektoru proudové hustoty a s uvážením, že divergence rotace vektoru je rovna nule a pevný náboj v krystalické mřížce je časově neměnný, získáme rovnici (2.3.2) [1] a [11]

$$\nabla \cdot \nabla \times H = \nabla \cdot J + \frac{\partial D}{\partial t} = 0, \quad (2.3.1)$$

$$\nabla \cdot (J_n + J_p) + q \frac{\partial}{\partial t} (p - n) = 0, \quad (2.3.2)$$

kde tato rovnice vyjadřuje to, že zřídlové oblasti proudové hustoty jsou plně kompenzovány časovou změnou volného náboje [11]. Rozdělením rovnice (2.3.2) a zavedením funkce četnosti generace a rekombinace elektronů a děr R dostaneme rovnice (2.3.3) a (2.3.4) [11].

$$\nabla \cdot J_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR \quad (2.3.3)$$

$$\nabla \cdot J_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR \quad (2.3.4)$$

2.4 Kinetická rovnice nosičů náboje

Rozdělením rovnice (2.1.2.4) zvlášť pro proudovou hustotu elektronů a zvlášť pro proudovou hustotu děr a úpravami získáme rovnice (2.4.1) a (2.4.2). Pomocí zjednodušení je možné příčinu nenulové driftové rychlosti rozložit na působení Lorenzovy síly a difúzní síly [1] a [11]. Člen na pravé straně u rovnic (2.4.1) a (2.4.2) představuje složku proudové hustoty způsobenou Lorenzovou silou s uvážením vlivu elektrického pole [11]. V rovnicích pro proudovou hustotu jsou zanedbány působení tepelných účinků. Pohyblivost nosičů náboje μ_p a μ_n má vliv na vlastnosti polovodičových součástek. Druhý člen na pravé straně rovnic představuje vliv difúze nosičů ve směru gradientu jejich koncentrace a zavádí Einsteinovy difúzní konstanty (2.4.3) a (2.4.4) [1] a [11]

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n, \quad (2.4.1)$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \nabla p, \quad (2.4.2)$$

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}, \quad (2.4.3)$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q}, \quad (2.4.4)$$

kde k je Boltzmanova konstanta a T je teplota.

2.5 Generace rekombinace

Jak již bylo zmíněno, funkce R vyjadřuje četnost výskytu generace a rekombinace

nosičů. Za normálních okolností je rovnoměrně dotovaný polovodič v tepelné rovnováze a procesy generace rekombinace buzené tepelnou energií jsou v dynamické rovnováze. Tento stav můžeme definovat vztahem rovnovážné koncentrace elektronů n a děr p [1], [4] a [11]

$$np = ni^2, \quad (2.5.1)$$

kde ni představuje intrinsickou koncentraci. Pokud rovnováhu polovodiče narušíme například působením elektrického pole, bude narušena i koncentrace elektronů a děr. Dle narušení rovnováhy, který fyzikální jev jej vyvolal, je rozeznáno několik druhů mechanismů generace rekombinace, jako jsou fononová (Shockley-Reed-Hallova), povrchová, přechody fotonů, nárazové ionizace a Augerových přechodů [11]. Dominantním mechanismem narušení funkce R je Shockley-Reed-Hallova (SRH) generace rekombinace, která je modelována jako past mezi vodivým a valenčním pásmem [11]. Rovnice [11]

$$R^{SRH} = \frac{np - ni^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}, \quad (2.5.2)$$

kde τ_p a τ_n jsou doby života nosičů [11], n_1 a p_1 jsou koncentrace závislé na umístění pasti v energetické hladině zakázaného pásu a pokud se bude past nacházet uprostřed energetické hladiny zakázaného pásu, pak n_1 a p_1 bude rovno ni [11].

2.6 Fyzikální parametry

Jak již bylo psáno výše, je pohyblivost elektronů i děr veličinou závislou na mnoha faktorech. Pohyb nosičů je narušen kolizemi. Pohyblivost nosičů je závislá na koncentraci příměsí, kde s rostoucí příměsí klesá hodnota pohyblivosti. Na teplotě krystalické mřížky, kde s rostoucí teplotou klesá hodnota pohyblivosti. Dále s rostoucí intenzitou elektrického pole opět klesá hodnota obou pohyblivostí pro elektrony i díry. Driftová rychlost stoupá s rostoucí intenzitou elektrického pole [3] a [11]. Jednotlivé grafické závislosti jsou zobrazeny v dokumentu [11] a v publikacích v uvedených v přehledu použité literatury.

Při modelování elektrického potenciálu v polovodiči se definuje dotační profil polovodiče [11]. Modelování dotačního profilu polovodiče je možno pomocí Gaussovou funkcí. Druhou možností je modelování skokovou funkcí, která je použita při modelování MOSFET tranzistoru.

2.7 Základní rovnice a okrajové podmínky

Úpravami předešlých rovnic a za předpokladu kladných hodnot parametrů D_n , D_p , μ_n a μ_p a dostaneme systém tří parciálních diferenciálních rovnic s proměnnými n , p a ψ [11], která jsou v literatuře označovány jako základní rovnice pro polovodiče [1] a [11]

$$\nabla \cdot (\nabla \Psi) - \frac{q}{\epsilon} (n - p - N) = 0, \quad (2.7.1)$$

$$\nabla \cdot (D_n \nabla n - n \mu_n \nabla \Psi) - R = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (2.7.2)$$

$$\nabla \cdot (D_p \nabla p + p \mu_p \nabla \Psi) - R = \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (2.7.3)$$

Pro matematickou analýzu je potřeba znát také počáteční podmínky těchto proměnných [11]. Používané hodnoty a vzorce pro počáteční odhad jsou uvedené v literatuře [1], [3], [7] a [11].

Okrajové podmínky se vážou na strukturu MOSFET tranzistoru na jednotlivá rozhraní. Jsou známy okrajové podmínky pro ohmický kontakt, pro Schottkyho kontakt a pro kontakt polovodiče s izolantem [11].

Okrajová podmínka pro ohmický kontakt je nejjednodušší Dirichletova okrajová podmínka pro elektrický potenciál. Celkový potenciál je roven nule. Tuto podmínku vyjadřuje rovnice [1] a [11]

$$\Psi(t) - \Psi_b - \Psi_D(t) = 0, \quad (2.7.4)$$

kde $\Psi_D(t)$ je přiložené napětí a Ψ_b značí vestavěný potenciál. Rovnice vestavěného potenciálu [1] a [11]

$$\Psi_b = \frac{kT}{q} \cdot a \sinh\left(\frac{N}{2 \cdot n_i}\right), \quad (2.7.5)$$

kde N představuje koncentraci pevného náboje příměsí. Dále je uvažována tepelná rovnováha a nábojová neutralita na ohmickém kontaktu. Platí vzorce [1] a [11]

$$np = n_i^2, \quad (2.7.6)$$

$$n - p = N. \quad (2.7.7)$$

Z nich jsou odvozeny vzorce (4.1.3.6) a (4.1.3.7) použité v simulaci.

U Schottkyho kontaktu se ve vzorci (4.2.4.1) vyskytuje šířka potenciálové bariéry, která je nastavená velikostí napětí. Vzorec je používán modelem v programu TiberCAD pro region gate.

Pro rozhraní mezi polovodičem a oxidem (izolantem) s různými materiálovými vlastnostmi se uplatňuje Gaussův zákon [1], [7] a [11]

$$\varepsilon_{sem} \frac{\partial \psi}{\partial n} \Big|_{sem} - \varepsilon_{ins} \frac{\partial \psi}{\partial n} \Big|_{ins} = Q_{int}, \quad (2.7.8)$$

kde ε_{sem} a ε_{ins} značí permitivitu polovodiče a izolantu a Q_{int} je náboj na rozhraní. Po zjednodušení a zanedbání bude platit, že složky proudu kolmé na rozhraní se rovnají povrchové rekombinaci [11]. V modelech je náboj na rozhraní považován za zanedbatelný.

3 MODEL PN PŘECHODU

3.1 Implementace modelu driftu a difúze v programu COMSOL

Program COMSOL obsahuje moduly, které má ve svojí knihovně a které obsahují klasické parciální diferenciální rovnice v konečné podobě. Uživatel si jen nastaví konkrétní koeficienty těchto rovnic.

3.1.1 Modul Poissonovy rovnice

Odvození rovnice je popsáno v textu. Poissonova rovnice v 1D prostoru programu COMSOL má tvar (3.1.1.1) a ve 2D prostoru tvar (3.1.1.2) [17]

$$-\nabla \cdot (c\nabla u) = f, \quad (3.1.1.1)$$

$$-\nabla \cdot d\varepsilon_0\varepsilon_r\nabla u = d\rho, \quad (3.1.1.2)$$

kde na levé straně první rovnice označuje c difúzní koeficient např. součin permitivity vakua s relativní permitivitou $\varepsilon_0\varepsilon_r$, který se bude dosazovat v modelech. Člen u představuje elektrický potenciál psi . Na pravé straně se za koeficient f dosadí pravý výraz rovnice (2.2.4). Ve druhé rovnici (3.1.1.2) na levé straně označuje d tloušťku, které je rovna 1, permitivitu ε_r je možno blíže konkretizovat, za člen u se také dosadí elektrický potenciál $psi0$ a psi u modelu tranzistoru. Na pravé straně je za koeficient ρ možno opět dosadit stejný výraz rovnice (2.2.4) na pravé straně. Tento popis odpovídá nastavením jednotlivých subdomén modulu u modelů.

Modul nabízí nastavení okrajových podmínek. Nastavit lze elektrický přesun, hodnotu povrchového náboje, nulový náboj, hodnotu elektrického potenciálu, uzemnění a kontinuita, kde rozdíl složek působící na rozhraní je roven 0.

3.1.2 Modul konvence a difúze

Opět odvození je naznačeno v textu. V 1D i ve 2D prostoru má parciální diferenciální rovnice tvar (3.1.2.1). Rovnice nestlačitelného toku má konzervativní tvar. Rovnice [17]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla c + cu) = R, \quad (3.1.2.1)$$

kde zlomek představuje časové měřítko přenosu, D je difúzní koeficient, za který se bude dosazovat v modelech rovnice (2.4.3) a (2.4.4). Koeficient c je roven koncentraci ($c = c(t_0)$) a u označuje zrychlení v ose, za které se bude nastavovat pohyblivost nosičů. Člen R na pravé straně je reakční člen, který bude roven generaci rekombinaci nosičů. Tato označení koeficientů lze nalézt v nastavení subdomén. Dále je v modulu

implementována stabilizační funkce a její jednotlivé druhy.

Dále je možné nastavovat okrajové podmínky. Nastavit lze určitou koncentraci nosičů (obecně $c = c_0$), izolaci, kde kolmá složka na rozhraní je rovna 0 ($n \cdot N = 0$), a tok, kde složka kolmá na rozhraní se rovná určité hodnotě. Podrobněji jsou jednotlivá konkrétní nastavení popsána dále u jednotlivých modelů.

3.2 Model v programu COMSOL

Model PN přechodu je modelovaný v 1D prostoru. Model využívá modul Poissonovy rovnice a dva moduly konvence a difúze, které jsou součástí knihovny klasických parciálních diferenciálních rovnic (PDE) v programu COMSOL. Konkrétně pro statickou analýzu (transportních procesů) elektronů a děr. U obou modulů je potřeba nastavit formulaci transportních rovnic na tvar konzervativní a dále definovat použití slabé formulace okrajových podmínek. Závislá proměnná u modulu Poissonovy rovnice je nazvaná *psi*, která označuje elektrický potenciál. U modulů konvence a difúze je závislá proměnná pojmenovaná *cn* pro elektrony a jméno aplikačního módu *cdn*. U druhého modulu je závislá proměnná nazvaná *cp* pro díry a jméno aplikačního módu *cdp*. Všechny tři moduly jsou řešeny zároveň.

Model PN přechodu je prezentovaný v grafickém rozhraní úsečkou, která má délku 50 μm . Střed úsečky je umístěn v souřadnici 0 na ose *x*.

3.2.1 Konstanty PN přechodu

Dále je potřeba vložit konstanty v menu options – constants. Tyto konstanty jsou stejné i pro model MOSFET tranzistoru ve společné tabulce konstant 4.1. Je potřebné upravit snížením hodnoty špičkových koncentrací dopování elektronů *Nd* a děr *Na* na hodnotu 10^{14} cm^{-3} a přidat hodnotu permitivity pro vakuum *epsilon0* $8,8541878176 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

3.2.2 Rovnice PN přechodu

V menu options – expressions – scalar expressions se vloží rovnice pro počáteční podmínky řešení modelu. Tyto rovnice jsou zobrazeny v tabulce s používanými rovnicemi (viz. Tab. 4.4). Jsou stejné jako pro model tranzistoru. Je nutné přidat rovnici pro skokovou funkci rozložení dopování pro proměnnou *N* (viz. Tab. 3.1). Dále v menu options – integration coupling variables – boundary variables pro první krajní bod doplnit rovnici pro proměnnou proudovou hustotu *J* (viz. Tab. 3.1), která označuje rozdíl normálních celkových toků koncentrací nosičů. Díky této rovnici lze po úspěšném řešení vykreslit závislost proudové hustoty na změně elektrického napětí. V rovnici se odečítají celkové toky nosičů a jsou násobeny elementárním nábojem.

Tab. 3.1: Nastavení rovnic

Proměnná	Rovnice
N	$Nd^{*(x \leq 0)} - Na^{*(x > 0)}$
J	$q^{*}(ntflux_cp_cdp - ntflux_cn_cdn)$

3.2.3 Podmínky subdomén

V nastavení physics – subdomain settings pro modul Poissonovy rovnice se nastavuje v kartě koeficientů rovnice pro koeficient c a rovnice pro koeficient f (viz. Tab. 3.2). Ve sloupci by měla být jen jedna subdoména. V kartě init se za $psi(t_0)$ doplní psi_init . U modulu konvence a difúze pro elektrony cn je nastavení pro kartu cn dle tabulky 3.1. Dále se potřeba z důvodů konvergence k hodnotě relativní toleranci zapnou stabilizační funkci artificial diffusion – streamline diffusion funkci Petrov-Galerkin / Compensated s hodnotou 0,25. V kartě init za $cn(t_0)$ se vloží n_init . Pro druhý modul cp se hodnoty opět vyplní dle tabulky 3.2 pro kartu cp , zapne se také stejná stabilizační funkce a v kartě init se za $cp(t_0)$ vloží p_init .

Tab. 3.2: Nastavení rovnic

Proměnná	Rovnice
c	$\epsilon_0 * \epsilon_{nr_si}$
f	$q * (N - cn + cp)$

Tab. 3.3: Nastavení modulu cn PN přechodu.

Proměnná	Hodnota
D	$V_t * \mu_{const_n}$
R	-RSRH
u	$\mu_{const_n} * \psi_{ix}$

Tab. 3.4: Nastavení modulu cp PN přechodu.

Proměnná	Hodnota
D	$V_t * \mu_{const_p}$
R	-RSRH
u	$-\mu_{const_p} * \psi_{ix}$

Parametry μ_{const_n} a μ_{const_p} v tabulkách označují vzorce pro konstantní mobilitu nosičů. Pokud místo těchto parametrů vložíme parametry μ_{c_nx} a μ_{c_px} (viz. tabulka 4.4) a spustíme výpočet, tak dostaneme řešení proudové hustoty se závislou mobilitou na parametrech. Hodnoty získané výsledné závislosti je nutno dvojnásobně zvětšit, abychom dostali odpovídající průběh.

3.2.4 Okrajové podmínky PN přechodu

V nastavení okrajových podmínek v menu physics – boundary settings se pro modul Poissonovy rovnice se v kartě koeficientů pro první bod za r doplní psi_init a pro druhý bod se za r dosadí $psi_init + Vd$. U modulu konvence a difúze pro elektrony cn se pro oba krajní body nastaví okrajová podmínka n_init a u druhého modulu pro díry se nastaví p_init .

3.2.5 Nastavení Sítě

Nastavení sítě se provádí v mesh – free mesh parameters v kartě global pro položku maximum element size se nastaví maximální velikost jednotlivých prvků sítě na hodnotu $0,5 \cdot 10^{-6}$ a potvrdí se.

3.2.6 Nastavení řešení

Nastavení pro řešení výpočtů lze nalézt v menu solve – solver parameters, kde se vybere parametrická analýza. V kartě general v kolonce parametrů se vloží jméno parametru Vd, kde se bude zvyšovat hodnota napětí od 0 do 2 V po kroku 0,2 V. V kartě stationary za maximální počet interací se vyplní hodnota 50 a zapne se řešení vysoce nelineárního problému.

3.2.7 Výpočet

Před samotným spuštěním výpočtu je dobré dát dvakrát v menu solve – get initial value. Tím se před samotným výpočtem získají počáteční hodnoty z konstant a rovnic a ověří se funkčnost modelu. Poté se může spustit samotný výpočet. Po proběhnutém výpočtu se v menu postprocessing – domain plot parameters a v kartě point se do pole expression vloží J a ve výběru okrajových podmínek se vybere např. první bod. Tím se získá grafická závislost hustoty proudu J na nastavovaném napětí Vd.

3.3 Model v programu TiberCAD

Veškerá nastavení modelu PN přechodu i jeho grafického znázornění je ve formě textového skriptu. Nakreslení PN přechodu je možné v programu Gmsh a dále konkrétně editovat vytvořený textový soubor. U uvedených rozměrů nejsou uvedeny jednotky. Rozměry jsou v jednotkách μm .

3.3.1 Grafické znázornění PN přechodu

V textovém souboru jsou uvedeny souřadnice bodů. První číslo v závorce je souřadnice X, druhé Y, třetí Z a poslední udává velikost elementu sítě v jednotkách μm . Dále jsou v souboru uvedeny propojení bodů úsečkami a fyzikální pojmenování úseček a bodů. Tohoto pojmenování se využívá v textovém souboru, ve kterém jsou uvedeny parametry nastavení simulace.

```
Point(1) = {-25,0,0,0.5}; # Bod
Point(2) = {0,0,0,0.002}; # Bod
Point(3) = {25,0,0,0.5}; # Bod
Line(1) = {1,2}; # Část přímky
Line(2) = {2,3}; # Část přímky
```

```
Physical Line("p_side") = {1}; # Fyzikální pojmenování úsečky
Physical Line("n_side") = {2}; # Fyzikální pojmenování úsečky
Physical Point("anode") = {1}; # Fyzikální pojmenování bodu
Physical Point("cathode") = {3}; # Fyzikální pojmenování bodu
```

3.3.2 Zdrojový text simulačního skriptu

Simulační text obsahuje veškerá nastavení simulace. V textu jsou uvedeny informace o velikosti dopování jednotlivých regionů, zapnutí modelu driftu a difúze pro všechny regiony, nastavení mobility závislé na změně pole a dopování, model generace rekombinace, nastavení okrajových podmínek, rozmítání parametru, teplota a řešené parametry, které se budou ukládat do souborů. Nejdůležitějším výsledným parametrem je celková proudová hustota *Contact Currents*. Tento parametr je využíván ve srovnání s proudovou hustotou z modelu v programu COMSOL. Podrobnější popis nastavení v textovém souboru je uveden u skriptu MOSFET tranzistoru. Jak model PN přechodu tak i model MOSFET tranzistoru využívají stejné konstanty a vzorce. Řešené modely jsou řešeny s konstantní mobilitou a se závislou mobilitou na parametrech. Konstantní mobilita se při řešení zapíná automaticky při smazání konkretizované mobility v části fyzikálního modelu elektronové a děrové mobility nebo uvedením slova *constant* za slovem *model* v textovém souboru. Závislá mobilita na parametrech je uvedena v textovém skriptu.

```
# diode example

$Device
{
  Region n_side # Nastavení regionu n_side
  {
    material = Si # Konkretizace materiálu
    doping = 1e14 doping_type = donor # Velikost špičkové
koncentrace
  }

  Region p_side # Nastavení pro region p_side
  {
    material = Si # Konkretizace materiálu
    doping = 1e14 doping_type = acceptor # Velikost špičkové
koncentrace
  }
}

# Definition of Simulation Models and associated Boundary
Conditions
$Models
{
  model driftdiffusion # Zapnutí modelu driftu a difúze
  {
    options
    {
      simulation_name = dd # Pojmenování simulace
      physical_regions = all # Nastavení řešení ve všech regionech
    }

    physical_model electron_mobility # Zapnutí mobility závislé na
parametrech pro elektrony
  }
}
```

```

{
    model = field_dependent # Model závislý na velikosti pole

    low_field_model = doping_dependent #Masetti model for Si
!!!
}

physical_model hole_mobility # Zapnutí mobility závislé na
parametrech pro díry
{
    model = field_dependent

    low_field_model = doping_dependent # Model mobility závislý
na dopování

}

physical_model recombination # Nastavení modelu rekombinace
{
    model = srh # Zapnutí modelu Shockley Reed Hallové funkce
rekombinace
}

BC_Regions
{
    BC_Region anode
    {
        type = ohmic # Zapnutí okrajové podmínky pro ohmický
kontakt
        voltage = @Vb[0.0] # Nastavení rozmítané proměnné
    }

    BC_Region cathode
    {
        type = ohmic # Zapnutí okrajové podmínky pro ohmický
kontakt
        voltage = 0.0 # Velikost napětí
    }
}
}

# Definition of Model-dependent Solver parameters
$Solver

{
    driftdiffusion
    {
        #nonlin_step_tol = 1e-6
    }
}

```

```

sweep # nastavení rozmítání parametru
{
  variable = Vb # Proměnná
  start = 0.0 # Začátek rozmítání
  stop = 2.0 # Konec rozmítání
  steps = 10 # Krok
  plot_data = true # to write data for each step
  simulation = dd
}
}

# Definition of Model dependent physical parameters
$Physics
{
  driftdiffusion
  {
    # use Fermi-Dirac statistics
    statistics = FD
  }
}

# Definition of model-independent parameters of the Simulation

$Simulation
{
  #searchpath = ../../materials # Cesta k souborům s parametry
jednotlivých materiálů
  meshfile = diode_1D.msh
  dimension = 1 # Nastavení řešení v jedné dimenzi
  verbose = 2
  temperature = 300 # Nastavení teploty
  solve = sweep
  resultpath = out_diode_1D
  output_format = grace

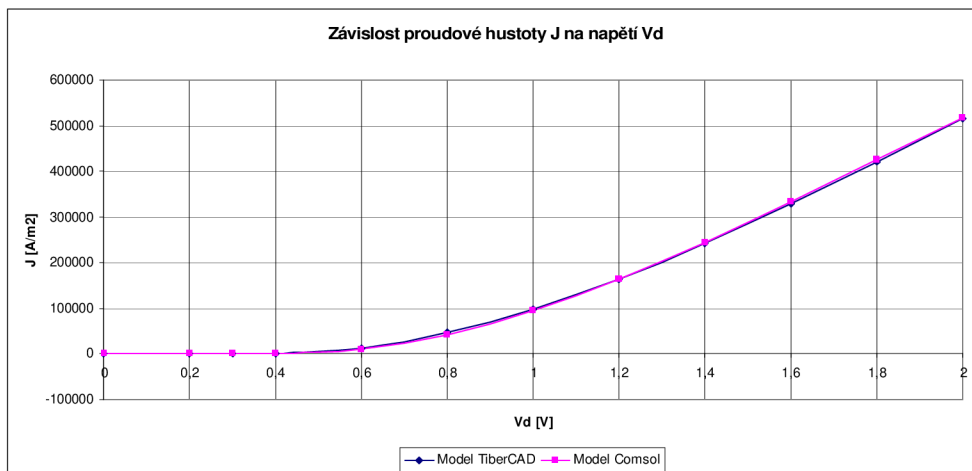
  plot = (Ec, Ev, QFermi_e, QFermi_h, eDensity, hDensity, eCurrent,
hCurrent, CurrentDensity, ContactCurrents, eMob, hMob) # Řešené a
ukládání parametry
}

```

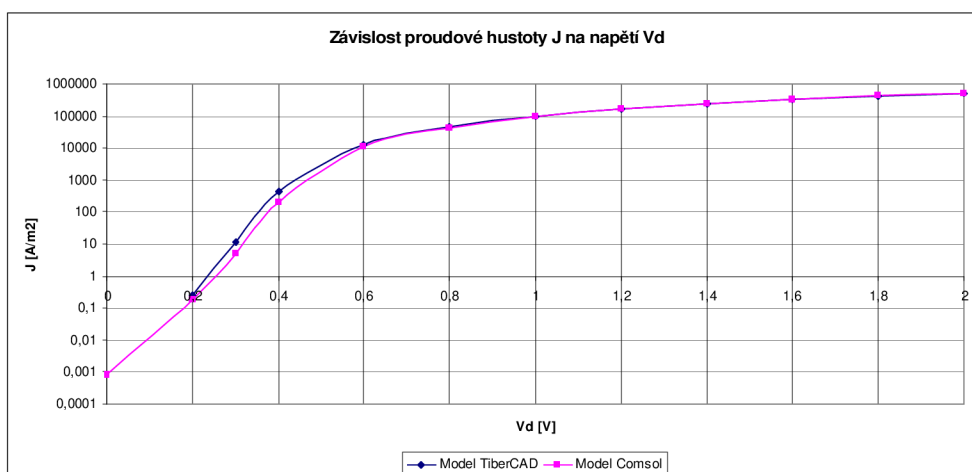
3.4 Srovnání modelů PN přechodů

V následujících grafech jsou uvedena srovnání závislosti proudové hustoty na nastavovaném napětí.

3.4.1 Grafy s konstantní mobilitou

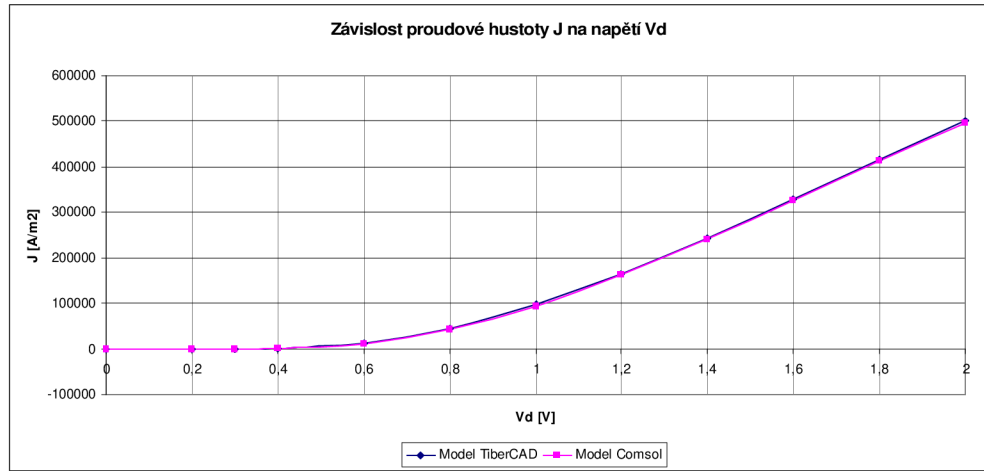


Obr. 3.1: Grafická závislost proudové hustoty J na nastávaném napětí Vd s lin. osou y.

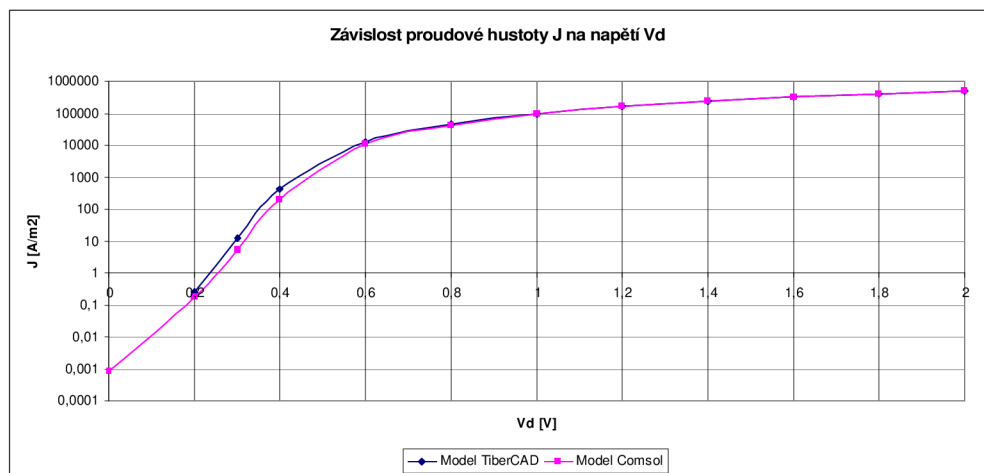


Obr. 3.2: Grafická závislost proudové hustoty J na nastávaném napětí Vd s log. osou y.

3.4.2 Grafy se závislou mobilitou na parametrech.



Obr. 3.3: Grafická závislost proudové hustoty J na nastávaném napětí Vd s lin. osou.



Obr. 3.4: Grafická závislost proudové hustoty J na nastávaném napětí Vd s log. osou y.

V grafech s lineární osou y u modelu s konstantní mobilitou nosičů i se závislou mobilitou nosičů jsou rozdíly v hodnotách proudové hustoty jen minimální mezi modelem vytvořeným v programu COMSOL a v programu TiberCAD. U grafů s logaritmickou osou y je pozorovatelné malé hodnoty proudové hustoty i když je PN přechod ještě zavřen. Dále jsou patrné větší rozdíly v hodnotách proudových hustot v části průběhů pro nastavované napětí od 0 V do 0,8 V. Při nulovém napětí v modelu vytvořeném v programu COMSOL vzniká malá hodnota proudové hustoty. Vznik této malé hodnoty proudové hustoty zapříčinilo zapnutí stabilizační funkce artificial diffusion. Bez zapnuté stabilizační funkce není program COMSOL schopen nalézt řešení.

4 MODELOVÁNÍ MOSFET TRANZISTORU

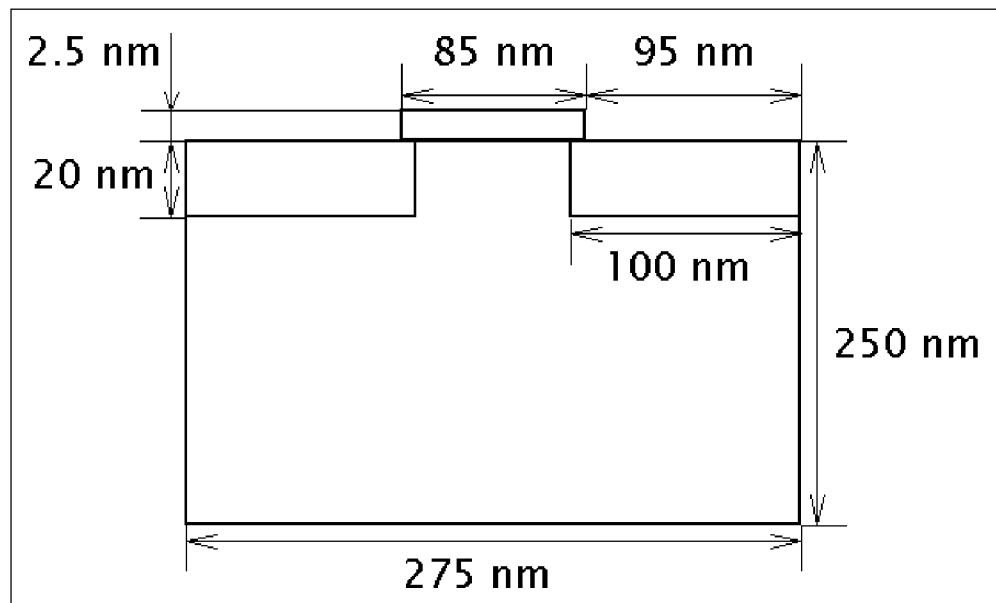
Simulace a analýza tranzistoru bude modelována ve dvou simulačních nástrojích a to v programu COMSOL Multiphysics a v TiberCAD. V modelech nejsou zahrnuty teplotní vlivy.

4.1 Modelování v programu COMSOL Multiphysics

Stejnosměrné (DC – direct current) vlastnosti modelu MOS tranzistoru jsou analyzovány pomocí standardní fyziky polovodičů [14]. Velikost proudu je řízeno napětím na hradle gate. Při zvyšování napětí na elektrodě drain roste velikost napětí a také roste proud až do saturace. Saturace proudu závisí na napětí hradla [14].

4.1.1 Struktura

Elektrické pole na hradle gate ovlivňuje nízko dopovaný nevlastní polovodič typu P křemíkové substrátové destičky. Při určitém napětí na hradle gate se změní vlastnosti v tenké vrstvě u rozhraní oxid polovodič z typu P na vlastnosti polovodiče typu N. Tento proces je nazývaný inverze a je vytvořen vodivý kanál mezi vysoce dopovanými oblastmi polovodiče typu N [14]. Rozměry modelu jsou uvedeny na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Rozměry tranzistoru.

4.1.2 Doménové rovnice

Model MOSFET tranzistoru používá standardní aproximaci driftu a difúze vázanou Poissonovou rovnicí. S použitím určitých zjednodušení jako zanedbání magnetického pole, tepelných účinků, konstantní hustoty stavů ve valenčním a vodivém pásu a za

předpokladu, že je použito Boltzmannovo rozdělení nosičů, je možné tyto rovnice odvodit z Maxwellovy rovnice a Boltzmannovy transportní teorie [14]. Model používá tři základní proměnné n , p a ψ , kde ψ označuje elektrostatický potenciál, n a p jsou koncentrace. Základní rovnice [14]

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla \psi) = q(p - n + N), \quad (4.1.2.1)$$

$$-\nabla \cdot J_n = -qR_{SRH}, \quad (4.1.2.2)$$

$$-\nabla \cdot J_p = qR_{SRH}. \quad (4.1.2.3)$$

J_n a J_p jsou rovnice obsahující člen pro drift a difúzi [14]

$$J_n = -qn\mu_n \nabla \psi + qD_n \nabla n, \quad (4.1.2.4)$$

$$J_p = -qp\mu_p \nabla \psi - qD_p \nabla p. \quad (4.1.2.5)$$

Dále je používána Shockley-Read-Hall generační rekombinační funkce [14]

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}, \quad (4.1.2.6)$$

kde τ_n a τ_p jsou doby života nosičů a n_1 a p_1 jsou úrovně vztahující se k energetické pasti pro nosiče [14].

4.1.3 Okrajové podmínky modelu

Okrajové podmínky se stanovují pro každé rozhraní modelu. Vychází z nábojové neutrality při tepelné rovnováze. Také je předpoklad potřeby dodat určitou energii, aby nosiče překonaly šířku energetického pásu. Pro rozhraní kov polovodič, rozhraní C-D, A-J a G-H, je použita podmínka pro fixaci elektrostatického potenciálu. Předpokládá se nekonečné zrychlení rekombinace [14]. Dále použití tohoto zákona a předpokladu, že není náboj na kontaktech a je možno vypočítat koncentraci nosičů. Hodnota přiloženého napětí na kontaktu se rovná hladině Fermiho úrovně. Celkový elektrostatický potenciál na kontaktech je roven součtu aplikovaného napětí a rozdílu Fermiho hladiny a elektrostatické referenční úrovně [14]. V_D představuje aplikované napětí na hradle drain. Referenčním napětím je zde energetická hladina pro vakuum. To se používá z důvodu použití různých materiálů, a jejich různých hodnot pro spřízněnost pracovní funkce [14]. Zde jsou zobrazeny používané rovnice pro elektrický potenciál [14] pro Schottkyho kontakt a ohmický kontakt, kde je předpoklad nábojové neutrality [1], [11] a [14]

$$\psi = V_D - \chi_{si} - \frac{E_g}{2} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right), \quad (4.1.3.1)$$

$$\psi = V_D - \chi_{si} - \frac{E_g}{2} + \frac{kT}{q} \cdot a \sinh \left(\frac{N_D - N_A}{2 \cdot n_i} \right). \quad (4.1.3.2)$$

Rovnice pro vestavěný potenciál [1]

$$\psi = \frac{kT}{q} \cdot a \sinh \left(\frac{N_D - N_A}{2 \cdot n_i} \right). \quad (4.1.3.3)$$

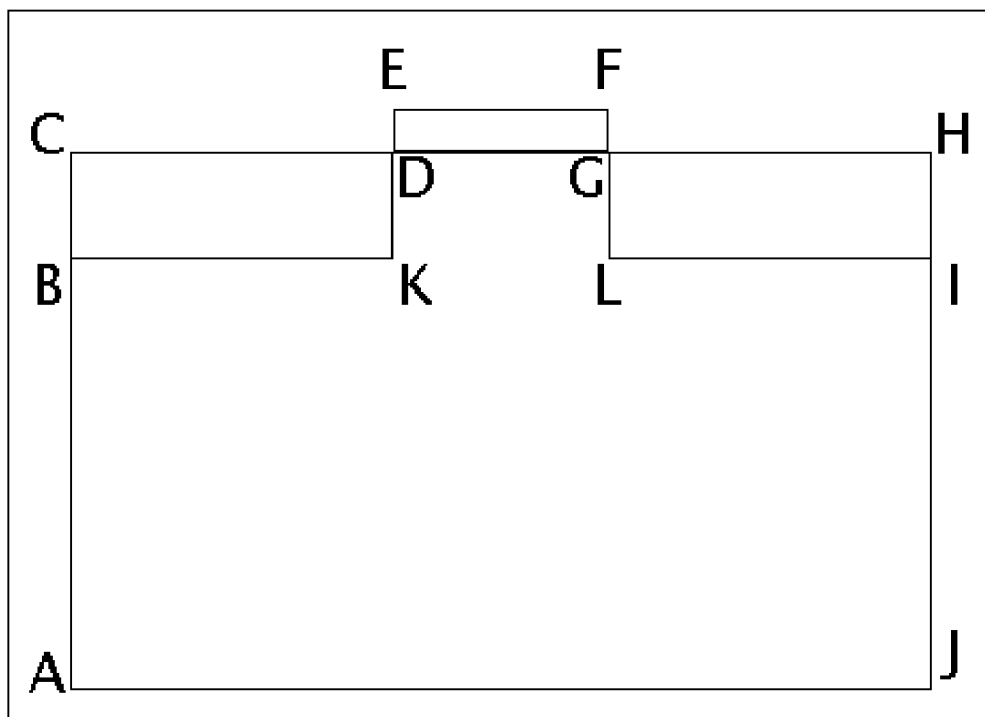
Vzorce pro nábojovou neutralitu při tepelné rovnováze, které jsou aplikovány v podmínkách pro ohmický kontakt [1], [11] a [14]

$$n = p = n_i, \quad (4.1.3.4)$$

$$n + N_A = p + N_D, \quad (4.1.3.5)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}, \quad (4.1.3.6)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}. \quad (4.1.3.7)$$



Obr. 4.2: Pomocná struktura tranzistoru pro nastavení okrajových podmínek.

4.1.4 Moduly, rovnice a konstanty pro modelování

Model používá dva moduly pro elektrostatiku, pojmenované např. *psi0* a *psi*, a dva moduly konvence a difúze pro analýzu ustáleného stavu pojmenované např. *cn* a *cp* v ustáleném stavu. Je nutné nastavit u obou modulů konvence a difúze formulaci transportních rovnic na tvar konzervativní a dále definovat použití slabé formulace okrajových podmínek. Použité konstanty pro řešený model MOSFET tranzistoru jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Tab. 4.1: Přehled používaných konstant část č. 1.

Název	Konstanta, rovnice	Popis
q	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementární náboj
T	300 K	Pokožová teplota
k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	Boltzmannova konstanta
epsilon _{r_sio2}	3,9	Rel. permitivata oxidu
epsilon _{r_si}	11,7	Rel. permitivata křemíku
n _{ix}	$1,46 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	Intrinsická koncentrace křemíku
μ _n	$1417 \text{ cm}^2/\text{V/s}$	Pohyblivost elektronů v křemíku
μ _p	$470,5 \text{ cm}^2/\text{V/s}$	Pohyblivost děr v křemíku
V _t	$(k \cdot T)/q$	Tepelné napětí
V _d	0 V	Přiložené napětí na drain
N _a	$1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	Špičková koncentrace akceptorů
N _d	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	Špičková koncentrace donorů
V _g	1,0 V	Napětí na hradle gate
V _s	0 V	Napětí na hradle source
X _{si}	3,4 V	Elektronová affinita pro Si
X _{sio2}	0,3 V	Elektronová affinita pro SiO ₂
X _{poly}	3,0 V	Pracovní funkce pro poly-Si
E _{g_si}	1,12 V	Šířka zakázaného pásu (Band gap) pro Si
T ₀	300 K	Referenční teplota
E _{trap_n}	0 eV	Konstanta
E _{trap_p}	0 eV	Konstanta
τ _{amin_n}	0 s	Konstanta
τ _{amin_p}	0 s	Konstanta
τ _{amax_n}	$1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$	Konstanta
τ _{amax_p}	$3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	Konstanta
N _{ref_n}	$1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	Konstanta
N _{ref_p}	$1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	Konstanta
γ _n	1	Konstanta
γ _p	1	Konstanta
α _n	-1,5	Konstanta
α _p	-1,5	Konstanta
T _{coeff_n}	2,55	Konstanta
T _{coeff_p}	2,55	Konstanta
μ _{max_n}	$1417 \text{ cm}^2/\text{V/s}$	Konstanta
μ _{max_p}	$470,5 \text{ cm}^2/\text{V/s}$	Konstanta

Tab. 4.2: Přehled používaných konstant část č. 2.

Název	Konstanta, rovnice	Popis
ksi_n	2,5	Konstanta
ksi_p	2,5	Konstanta
mumin1_n	52,2 cm ² /V/s	Konstanta
mumin1_p	44,9 cm ² /V/s	Konstanta
mumin2_n	52,2 cm ² /V/s	Konstanta
mumin2_p	0 cm ² /V/s	Konstanta
mu1_n	43,4 cm ² /V/s	Konstanta
mu1_p	29 cm ² /V/s	Konstanta
Pc_n	0 cm ⁻³	Konstanta
Pc_p	9,23 · 10 ¹⁶ cm ⁻³	Konstanta
Cr_n	9,68 · 10 ¹⁶ cm ⁻³	Konstanta
Cr_p	2,23 · 10 ¹⁷ cm ⁻³	Konstanta
Cs_n	3,43 · 10 ²⁰ cm ⁻³	Konstanta
Cs_p	6,1 · 10 ²⁰ cm ⁻³	Konstanta
alpha_n	0,68	Konstanta
alpha_p	0,719	Konstanta
beta_n	2	Konstanta
beta_p	2	Konstanta
beta0_n	1,109	Konstanta
beta0_p	1,213	Konstanta
betaexp_n	0,66	Konstanta
betaexp_p	0,17	Konstanta
vsat0_n	1,07 · 10 ⁷ cm/s	Konstanta
vsat0_p	8,37 · 10 ⁶ cm/s	Konstanta
vsatexp_n	0,87	Konstanta
vsatexp_p	0,52	Konstanta

Tab. 4.3: Přehled používaných konstant část č. 3.

Název	Konstanta, rovnice	Popis
tau0_n	$\tau_{\text{amin}_n} + ((\tau_{\text{amax}_n} - \tau_{\text{amin}_n}) / (1 + (N_i/N_{\text{ref}_n})^{\gamma_n}))$	Tau0 pro elektrony
tau0_p	$\tau_{\text{amin}_p} + ((\tau_{\text{amax}_p} - \tau_{\text{amin}_p}) / (1 + (N_i/N_{\text{ref}_p})^{\gamma_p}))$	Tau0 pro díry
tau_n	$\tau_{0_n} * (T/T_0)^{\alpha_n} * \exp(T_{\text{coeff}_n} * (T/(T_0 - 1)))$	Taun pro elektrony
tau_p	$\tau_{0_p} * (T/T_0)^{\alpha_p} * \exp(T_{\text{coeff}_p} * (T/(T_0 - 1)))$	Taup pro díry
muconst_n	$\mu_{\text{max}_n} * (T/T_0)^{-\kappa_n}$	Konstantní model mobility pro elektrony
muconst_p	$\mu_{\text{max}_p} * (T/T_0)^{-\kappa_p}$	Konstantní model mobility pro díry
mumasett_i_n	$\mu_{\text{min1}_n} * \exp(-P_{c_n}/(N_i)) + ((\mu_{\text{const}_n} - \mu_{\text{min2}_n}) / (1 + ((N_i)/Cr_n)^{\alpha_n})) - (\mu_{1_n} / (1 + (Cs_n/(N_i))^{\beta_n}))$	Masetti model mobility pro elektrony
mumasett_i_p	$\mu_{\text{min1}_p} * \exp(-P_{c_p}/(N_i)) + ((\mu_{\text{const}_p} - \mu_{\text{min2}_p}) / (1 + ((N_i)/Cr_p)^{\alpha_p})) - (\mu_{1_p} / (1 + (Cs_p/(N_i))^{\beta_p}))$	Masetti model mobility pro díry
Ni	Na+Nd	Totální dotační hustota
m_beta_n	$\beta_{0_n} * (T/T_0)^{\beta_{\text{exp}_n}}$	Výpočet hodnoty
m_beta_p	$\beta_{0_p} * (T/T_0)^{\beta_{\text{exp}_p}}$	Výpočet hodnoty
vsat_n	$v_{\text{sat0}_n} * (T/T_0)^{-v_{\text{satexp}_n}}$	Výpočet hodnoty
vsat_p	$v_{\text{sat0}_p} * (T/T_0)^{-v_{\text{satexp}_p}}$	Výpočet hodnoty
Nc300	$2,89 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	Efektivní hustota stavu konstanta pro vzorec
Nv300	$3,14 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	Efektivní hustota stavu konstanta pro vzorec
ni2	$N_c * N_v * \exp(-E_g/(k * T))$	Výpočet intrinzické hodnoty
ni	$\sqrt{ni2}$	Výpočet intrinzické hodnoty
Eg	1,12 eV	Šířka pásma (Band gap) Si (zakázané pásmo)
Nv2	$1,04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	Efektivní hustota stavu
Nc	$N_{c300} * ((T/T_0)^{(3/2)})$	Efektivní hustota stavu
Nv	$N_{v300} * ((T/T_0)^{(3/2)})$	Efektivní hustota stavu
Nc2	$2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	Efektivní hustota stavu

Velikosti používaných elektronových afinit, pracovní funkce a velikost zakázaného pásu jsou udávány v literatuře v jednotkách eV. V modelu používají jednotku V (voltů).

Dále jsou použity rovnice pro výpočet inicializačních hodnot koncentrací pro rozložení elektrického pole modulu $psi0$ a jejichž výsledkem jsou hodnoty koncentrací $n0$ a $p0$, které jsou použity v modulech konvergence a difúze [14]

$$n = n_i e^{\frac{q\psi + \chi_{Si} + \frac{E_g}{2}}{kT}}, \quad (4.1.4.1)$$

$$p = n_i e^{-\frac{q\psi + \chi_{Si} + \frac{E_g}{2}}{kT}}. \quad (4.1.4.2)$$

Model používá parametrické řešení problému pro nelineární systém. Napětí na hradle gate je možno nastavit na hodnotu 1 V a dále rozmítat napětí na hradle drain. Dále jsou uvedeny příklady používaných rovnicích v aktuálním řešeném modelu. V Tab. 4.4 jsou uvedeny dva druhy rovnic pro psi_{init} . Oba zápisy dávají stejný výsledek.

Tab. 4.4: Přehled používaných vzorců.

Název	Rovnice	Popis
n_init	$\sqrt{((N/2)^2+(ni^2))+N/2}$	Počáteční odhad koncentrace elektronů
p_init	$\sqrt{((N/2)^2+(ni^2))-N/2}$	Počáteční odhad koncentrace děr
psi_init	$Vs+Vt*(-\log(p_init/ni)*(N<0)+\log(n_init/ni)*(N>=0))-X_si-0.5*Eg_si$	Inicializační hodnota
RSRH	$(cn*cp-ni^2)/(\tau_p*(cn+ni*\exp(Etrap_n/k*T))+\tau_n*(cp+ni*\exp(Etrap_p/k*T)))$	SHR funkce
mucanal i_nx	$\text{mun}/(1+(\text{mun}*\text{abs}(\text{psix})/\text{vsat_n})^{\text{m_bet}}\text{a_n})^{(1/\text{m_beta_n})}$	Canali mobility model pro koncentraci elektronů pro složku psix
mucanal i_px	$\text{mup}/(1+(\text{mup}*\text{abs}(\text{psix})/\text{vsat_p})^{\text{m_bet}}\text{a_p})^{(1/\text{m_beta_p})}$	Canali mobility model pro koncentraci děr pro složku psix
muc_nx	$(\text{mucanal_i_nx}*\text{mumasetti_n})/(\text{mucanal_i_nx}+\text{mumasetti_n})$	Celková mobilita elektronů pro složku x
muc_px	$(\text{mucanal_i_px}*\text{mumasetti_p})/(\text{mucanal_i_px}+\text{mumasetti_p})$	Celková mobilita děr pro složku x
mucanal i_ny	$\text{mun}/(1+(\text{mun}*\text{abs}(\text{psiy})/\text{vsat_n})^{\text{m_bet}}\text{a_n})^{(1/\text{m_beta_n})}$	Canali mobility model pro koncentraci elektronů pro složku psiy
mucanal i_py	$\text{mup}/(1+(\text{mup}*\text{abs}(\text{psiy})/\text{vsat_p})^{\text{m_bet}}\text{a_p})^{(1/\text{m_beta_p})}$	Canali mobility model pro koncentraci děr pro složku psiy
muc_ny	$(\text{mucanal_i_ny}*\text{mumasetti_n})/(\text{mucanal_i_ny}+\text{mumasetti_n})$	Celková mobilita elektronů pro složku y
muc_py	$(\text{mucanal_i_py}*\text{mumasetti_p})/(\text{mucanal_i_py}+\text{mumasetti_p})$	Celková mobilita děr pro složku y
psi_init1	$Vs+Vt*(\text{asinh}((n_init-p_init)/(2*ni)))-X_si-0.5*Eg_si$	Inicializační hodnota pro vestavěný potenciál
n0	$ni*\exp((\text{psi}0+X_si+0.5*Eg_si)/Vt)$	Elektronová koncentrace
p0	$ni*\exp(-(\text{psi}0+X_si+0.5*Eg_si)/Vt)$	Děrová koncentrace

V modelu jsou použity rovnice pro rozhraní C-D a G-H mezi materiály kov polovodič v nastavení expression - boundary expression. Proměnné Jn a Jp používají rovnice (využívají se Lagrangeovy multiplifikátory), které jsou uvedeny v Tab. 4.5. Pak v nastavení expression - subdomain expression je nastavená skoková změna dopování funkce N . Pro subdoménu oxidu má funkce N nastavenou 0, pro dvě subdomény polovodiče typu N má funkce dotačního profilu N rovnou hodnotě Nd a subdoména polovodiče typu P má nastavenou funkci N na $-Na$. Tím jsou nastavené špičkové koncentrace pro jednotlivé subdomény. Dále v nastavení integration coupling variables – boundary variables (v nastavení boundary integration variables) pro nastavení pravého rozhraní G-H mezi materiály kov polovodič je proměnná Id , která jejíž funkce se rovná $Jn+Jp$ [14] a je integrována podél rozhraní.

Tab. 4.5: Nastavení rovnic

Proměnná	Rovnice
Jn	$-q \cdot I_m3$
Jp	$q \cdot I_m4$

4.1.5 Nastavení subdomén u modulů

Nastavení subdomén používá rozdílného nastavení permitivity ϵ_r pro Si a SiO₂. V prvním modulu pro řešení elektrostatiky *psi0* je nastaveno pro ρ rovno vzorci v Tab. 4.6 jen pro domény polovodičů [14]. Pro doménu oxidu je ρ rovno 0 (bez náboje). Hodnota *psi0(t0)* je rovna *psi_init* pro všechny domény. Ve druhém modulu *psi* je nastaveno pro ρ rovno rovnici v Tab. 4.6 jen pro domény polovodičů a pro doménu oxidu je ρ rovno 0. Hodnota *psi0(t0)* je rovna *psi0* pro všechny domény. Nastavení subdomén pro moduly konvence a difúze je zobrazeno v následné Tab. 4.7 a 4.8 pro karty *cn* a *cp*. Oba moduly konvence mají zapnutou stabilizační funkci *artificial diffusion – isotropic diffusion* s hodnotou 0,5 (*streamline diffusion*, vybrána funkce *Petrov-Galerkin / Compensated* s nastavenou hodnotou na 0,4). Je nastavena konstantní mobilita parametrem *muconst_n* a *muconst_p* [14] viz Tab. 4.7 a 4.8. Pro nastavení závislé mobility nosičů (elektronů) na dopování a velikosti intenzity elektrického pole je nutné místo parametrů *muconst_n* dosadit *muc_nx* a *muc_ny* dle Tab. 4.9. Nastavení pro modul *cp* zůstává stejné dle Tab. 4.8 (zapnutá konstantní mobilita děr).

Tab. 4.6: Nastavení modulů *psi0* a *psi*

Proměnná	Rovnice
ρ (pro modul <i>psi0</i>)	$q \cdot (p0 - n0 + N)$
ρ (pro modul <i>psi</i>)	$q \cdot (cp - cn + N)$

Tab. 4.7: Nastavení modulu *cn*.

Nastavení pro modul <i>cn</i>	
Proměnná	Nastavení
D (isotropic)	$Vt \cdot muconst_n$
R	$-RSRH$
u	$muconst_n \cdot psix$
v	$muconst_n \cdot psiy$
<i>cn(t0)</i>	<i>n0</i>

Tab. 4.8: Nastavení modulu cp.

Nastavení pro modul cp	
Proměnná	Nastavení
D (isotropic)	Vt*muconst_p
R	-RSRH
u	- muconst_p*psix
v	- muconst_p*psiy
cp(t0)	p0

Tab. 4.9: Nastavení modulu cn

Nastavení pro modul cn		
Proměnná	Nastavení	
D (anisotropic)	Vt*muc_nx	0
	0	Vt*muc_ny
R	-RSRH	
u	muc_nx*psix	
v	muc_ny*psiy	
cn(t0)	n0	

Moduly konvence a difúze jsou aktivní jen pro domény polovodičů. Pro doménu oxidu jsou oba moduly vypnuty.

4.1.6 Nastavení okrajových podmínek modulů a parametrických hodnot

Pro oba moduly elektrostatiky je nastavena podmínka elektrického potenciálu hodnotou psi_init pro rozhraní A-J, C-D, a G-H. Ve druhém modulu je nastavena podmínka $psi_init+Vd$ pro elektrodu drain pro rozhraní G-H. Tato podmínka je nastavena pro rozhraní kov polovodič. Tyto rozhraní se nachází v místech spojení kovových elektrod s polovodičem na místech drain G-H, source C-D a substrátové destičky A-J. Rovnice $Vg-X_poly$ je nastavena pro elektrický potenciál připojený na hradlo gate rovněž pro oba moduly elektrostatiky pro rozhraní E-F. Okraje modelu MOS tranzistoru mají nastavenou podmínku zero charge / symetry. V prvním modulu konvence a difúze je nastavena koncentrace n_init v místě drain G-H, source C-D a pro spodní linii substrátové destičky A-J. Ve druhém modulu konvence a difúze je nastavena koncentrace p_init v místě drain, source a pro spodní linii substrátové destičky [14].

Nastavení parametru V_D je v nastavení solve - solver parameters a dále parametric, kde je řešeno nastavení rozmítání od hodnoty napětí 0 V do 2 V po 0,2 V. Řešený problém je vysoce nelineární a je potřeba nastavit počet interací z hodnoty 25 na 50.

4.1.7 Nastavení sítě a výpočetního skriptu

Nastavení se provádí v nabídce mesh – free mesh parameters. Je zvlášť nastavena velikost mřížky pro jednotlivé subdomény v kartě subdomain a zvlášť pro jednotlivé okraje v kartě boundary. Pro subdoménu polovodiče typu P nastavíme vzor sítě triangle a velikost $1 \cdot 10^{-8}$. Pro 2 subdomény polovodiče typu N také nastavíme vzor sítě triangle a velikost $1 \cdot 10^{-8}$. Pro subdoménu oxidu nastavíme velikost $1 \cdot 10^{-9}$ a vzor triangle. Dále nastavíme v nastavení boundary pro vnitřní rozhraní B-K-D a G-L-I velikost sítě na hodnotu $2 \cdot 10^{-9}$.

Poté nastavíme výpočetní skript pro výpočet řešení. V nabídce solve – solver manager a v záložce script je nutné potvrdit solve using a script a vložit text.

```
init = assemnit(fem);
fem.sol = femstatic(fem, ... 'init',init, ...solcomp',{'psi0'},
...outcomp',{'lm3','psi','psi0','cp','cn','lm4'});
fem0 = fem;
init = assemnit(fem,'u',fem0.sol);
fem.sol = femstatic(fem, ... 'init',init, ...u',fem0.sol,
...solcomp',{'lm3','psi','cp','cn','lm4'},
...outcomp',{'lm3','psi','psi0','cp','lm4','cn'}, ...pname','Vd',
... 'plist',[0:0.2:2]);
fem0 = fem;
```

Tento skript zajistí počáteční řešení rozložení elektrostatického potenciálu modulu *psi0* a toto počáteční řešení se použije při dalším řešení potenciálu. Tím se zajistí lepší schopnost konvergence k hodnotě relativní toleranci. Popis je uveden pro verzi programu COMSOL 3.5.

Dále je uvedeno modelování v programu TiberCAD.

4.2 Modelování v programu TiberCAD

Program TiberCAD je multifyzikální simulační nástroj a vychází z profesionálního nástroje ISE-TCAD a jeho modulu DESSIS. Je specializován na řešení problémů driftu a difúze. Dále umožňuje řešit aproximační funkci Schrödingerovy rovnice [13]. Práce s nástrojem je poněkud odlišnější od simulačního nástroje Comsol. Program nepoužívá grafické rozhraní a práce je možná pomocí vstupních textových skriptů.

4.2.1 Postup modelování

V prvním kroku je potřeba simulovanou strukturu nakreslit. K tomu TiberCAD využívá graficko-textový nástroj GMSH, který je obsažen v instalaci. Zde je potřeba vytvořit soubor se strukturou a jeho rozměry, které nejsou uváděny v jednotkách (jednotka rozměrů byla získána experimentálně - μm). Uložením vznikne soubor s příponou *.geo.

Ve druhém kroku je potřeba vytvořit síť konečných prvků ve struktuře. Definovanou síť je opět možno vytvořit v programu GMSH. Tím vznikne nový soubor, který bude mít příponu *.msh.

V posledním kroku je již možno definovat fyzikální vlastnosti vytvořené struktury. Tento soubor bude mít příponu *.tib a budou v něm definovány použité simulační funkce a fyzikální konstanty. Simulační funkce zde nejsou definované vzorcem, jako u programu COMSOL, jsou zde definované slovně. Pod tímto slovem jsou v programu skrytě naprogramované vzorce a jejich podobu je nutné si vyhledat v dokumentaci nástroje TiberCAD nebo v literatuře programu DESSIS. Pro následnou simulaci je nutné mít veškeré vytvořené soubory uložené ve stejné složce.

4.2.2 Struktura simulačního skriptu a nastavení regionů

Zde bude uveden popis simulačního skriptu. Řešené rovnice jsou zde nastaveny klíčovými slovy. Klíčové slova jsou uvedeny v manuálu programu. První část je věnována popisu fyziky regionů. Regiony nazvané substrát a kontakt využívá fyzikálních vlastností materiálu Si. Jsou zde definované koncentrace dopování pro akceptory 10^{18} cm^{-3} a pro donory $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [15]. Region s názvem oxid využívá fyzikálních vlastností a parametrů definované v souboru SiO₂.

```
$Device
{
  Region substrate # Výběr regionu substrátu
  {
    material = Si # Výběr materiálu křemíku
    doping = 1e18 doping_type = akceptor # Nastavení špičkové
koncentrace děr
  }

  Region contact # Výběr regionu kontaktu
  {
    material = Si # Nastavení materiálu křemíku
    doping = 5e19 doping_type = donor # Nastavení špičkové
koncentrace elektronů
  }

  Region oxide # Výběr regionu oxidu
  {
    material = SiO2 # Nastavení materiálu pro oxid
  }
}
```

Používané fyzikální vlastnosti a parametry materiálů jsou uvedeny v textovém souboru Si a SiO₂. Zde jsou uloženy také konstanty, které využívají simulační vzorce.

4.2.3 Nastavení okrajových podmínek pro analýzu

Dále jsou definovány simulační modely. Je zde nastaven model driftu a difúze, který má v sobě zahrnutou Poissonovu rovnici a ta je nastavena pro všechny regiony.

```
$Models
{
  model driftdiffusion # Nastavení simulace driftu a difúze
  {
    options
```

```

{
simulation_name = driftdiffusion # Nastavení jména

physical_regions = all # Nastavení pro jaké regiony se má
simulovat
}

physical_model recombination # Nastavení druhu rozdělovací
funkce
{
model = srh # Nastavení modelu SRH
}

physical_model electron_mobility # Nastavení mobility pro
elektrony
{
model = field_dependent # Nastavení mobility

low_field_model = doping_dependent # Masetti model for Si
!!!
}

```

Pak je zde nastaven typ modelu generace rekombinace, kde *srh* označuje funkci Shockley-Read-Hall. Tato funkce je zde definovaná vzorcem [13] a [15]

$$R_{SRH} = \frac{np - ni^2}{\tau_p (n + n_i e^{E^*/k_B T}) + \tau_n (p + n_i e^{-E^*/k_B T})}, \quad (4.2.3.1)$$

kde $E^* = E_{trap} - (E_C + E_V)/2$ je hladina pasti, která zohledňuje střední energetické pásmo [13]. Rekombinační doby (4.2.3.2) jsou závislé na teplotě a na hustotě dopování [13], kde T_0 je referenční teplota pro 300 K. Ostatní hodnoty parametrů používaných ve vzorcích jsou uvedeny v souboru S_i . Dále jsou využívány vzorce [13]

$$\tau_n = \tau_n^0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha_n} e^{\beta(T/T_0 - 1)}, \quad (4.2.3.2)$$

$$\tau_n^0 = \tau_{\min, n} + \frac{\tau_{\max, n} - \tau_{\min, n}}{1 + (N/N_{ref})^\gamma}. \quad (4.2.3.3)$$

Dále je ve skriptu definovaný model polem závislé pohyblivosti nosičů pro elektrony (field-dependent) (4.2.3.6) a model Masetti (4.2.3.4), který zahrnuje pohyblivost pro nízkou intenzitu elektrického pole (low-field) závislou na dopování [13] a [15]

$$\mu = \mu_{\min, 1} * e^{-P_c / N} + \frac{\mu_{const} - \mu_{\min, 2}}{1 + (N/C_r)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 + (C_r / N)^\beta}, \quad (4.2.3.4)$$

kde N je závislá na (hustotě dopování) koncentraci ionizovaných částí $N = N_A + N_D$ a hodnota konstantní pohyblivosti μ_{const} je definovaná vzorcem (4.2.3.5) [13]

$$\mu_{const} = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\gamma}, \quad (4.2.3.5)$$

kde hodnoty parametrů μ_0 a γ jsou definované v souboru materiálových parametrů a vlastností S_i a v literatuře [13] a [15]. Polem závislý model pohyblivosti definovaný ve skriptu vychází z modelu Canali (4.2.3.6), založeného na modelu Caughey-Thomas [13] a [15]

$$\mu = \frac{\mu_{lowfield}}{\left(1 + \left(\frac{\mu_{lowfield} |F|}{v_{sat}} \right)^\beta \right)^{1/\beta}}, \quad (4.2.3.6)$$

$$\beta = \beta_0 (T/T_0)^b, \quad (4.2.3.7)$$

$$v_{sat} = v_{sat,0} (T/T_0)^{-\gamma}, \quad (4.2.3.8)$$

kde F je modul řídicího pole $F = |\nabla\varphi_F|$, kde φ_F je Fermiho potenciál [13]. Ostatní používané symboly ve vzorcích mají uvedenou svojí hodnotu v literatuře [13]. Při umazání nastavení modelu mobility pro elektrony se použije automaticky konstantní model. Tento konstantní model mobility je nastaven v tomto případě pro díry viz. vzorec (4.2.3.5).

4.2.4 Nastavení okrajových podmínek jednotlivých regionů

Tato část skriptu se zabývá nastavením okrajových podmínek. Jsou zde nastaveny podmínky pro Schottkyho a ohmický kontakt.

```
BC_Regions # Nastavení okrajových podmínek
{
  BC_Region gate # Nastavení regionu gate
  {
    type = schottky # Nastavení Schottkyho okrajové podmínky
    barrier_height = 3.0 # Nastavení velikosti bariéry na rozhraní
    mezi kovem a oxidem v jednotkách voltů

    voltage = @Vg[0.0] # Nastavení proměnné
  }

  BC_Region source # Nastavení regionu source
  {
    type = ohmic # Nastavení okrajové podmínky

    voltage = 0.0 # Nastavení velikosti napětí
  }
}
```

```

}

BC_Region drain # Nastavení regionu drain
{
  type = ohmic # Nastavení okrajové podmínky

  voltage = @Vd[0.5] # Nastavení proměnné
}

}

}

}

```

Region gate využívá fyziky Schottkyho kontaktu. Tato podmínka je modelována následujícími vzorci [13]

$$\psi = \phi_F - \Phi_B + \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_C}{n_i}\right), \quad (4.2.4.1)$$

$$N_C = \frac{n_0}{e^{\frac{-q\Phi_B}{kT}}}, \quad (4.2.4.2)$$

$$N_V = \frac{p_0}{e^{\frac{-E_g + q\Phi_B}{kT}}}, \quad (4.2.4.2)$$

kde ϕ_F je Fermiho potenciál rovný aplikovanému napětí, n_0 a p_0 je rovnovážná koncentrace elektronů a děr (4.1.3.6) a (4.1.3.7) [13]. Parametr Φ_B označuje šířku bariéry, jako rozdíl funkce práce kovu a oxidu polovodiče na rozhraní [13]. Šířka bariéry je zde nastavena parametrem *barrier heigth*.

Nastavení podmínky ohmického kontaktu vychází z nábojové neutrality, která je definovaná vzorci (4.1.3.4) až (4.1.3.7). Je také využit vzorec pro vestavěný potenciál [1] a [13]

$$\psi = \phi_F + \frac{kT}{q} \cdot a \sinh\left(\frac{N_D - N_A}{2 \cdot n_i}\right). \quad (4.2.4.3)$$

Toto nastavení je pro regiony drain a source.

4.2.5 Nastavení rozmítání a ostatních parametrů

V této části je nastaveny parametry pro rozmítání napětí na elektrodě drain. Počáteční hodnota napětí je nastavena na 0 V a konečná hodnota na 2 V při kroku čtyř hodnot. Hodnota napětí na hradle gate je nastavena na 1 V.

```

$Solver
{
  driftdiffusion
  {
    nonlinear_solver = tiber
    coupling = electrons
    ksp_type = bcgsl
    nonlin_max_it = 10
    nonlin_step_tol = 1e-3
    ls_max_step = 2
  }

  Sweep
  {

    sweep_drain # Nastavení rozmítání hodnoty parametrů
    {
      simulation = driftdiffusion
      variable = Vd # Nastavení rozmítání parametru Vd
      start = 0.0 # Nastavení začátku rozmítání
      stop = 2.0 # Nastavení konečné hodnoty rozmítání
      steps = 10 # Nastavení kroku

      #plot_data = true
    }

    sweep_gate
    {
      variable = Vg # Nastavení rozmítání parametru Vg
      start = 1.0 # Nastavení počáteční hodnoty rozmítání
      stop = 1.0 # 0.5 # Nastavení konce rozmítání
      steps = 1 # 6 # Nastavení kroku
      simulation = sweep_drain
      plot_data = true
    }
  }
}

```

Dále je zde nastavena fyzika transportu nosičů driftu a difúze, která zahrnuje Fermiho-Diracovu statistiku.

```

$Physics
{

  driftdiffusion
  {
    statistics = FD # Nastavení Fermiho-Diracové statistiky
  }

}

```

4.2.6 Nastavení vyhodnocovacích parametrů

V poslední části skriptu je nastavení vyhodnocovacích a ukládaných parametrů. Pro srovnání obou modelů a programů je nejdůležitějším parametrem *Contact Currents* nebo-li proud tekoucí mezi elektrodami.

```

$Simulation

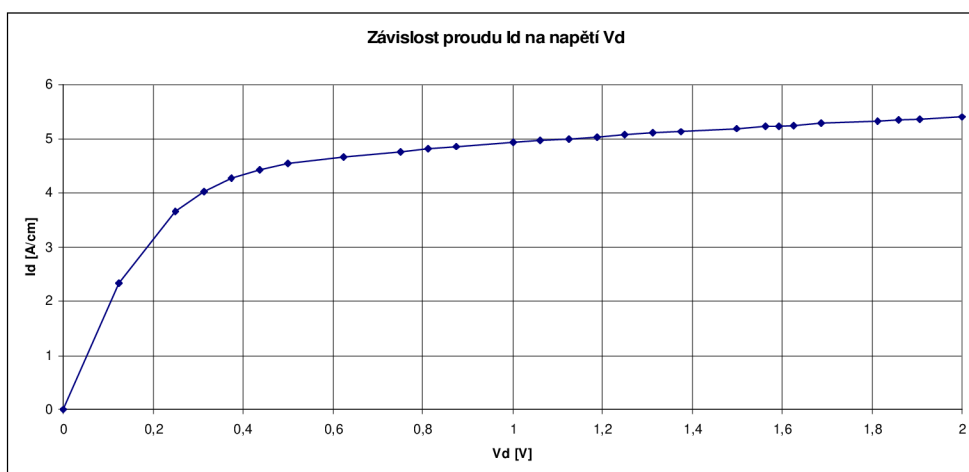
```



```

{
  #searchpath = ../../materials # Nastavení cesty k souborům
materiálů
  meshfile = mosfet.msh # Nastavení souboru sítě
  dimension = 2 # Nastavení počtu dimenzí
  temperature = 300 # Nastavení teploty
  solve = sweep_gate
  resultpath = output_IV_char
  #output_format = gmv
  output_format = vtk # Nastavení formátu
  plot = (Ec, Ev, QFermi_e, eDensity, eCurrent, NetRecombination,
EField, ElPotential, ContactCurrents) # Nastavení řešených a
ukládáných parametrů
}

```



Obr. 4.3: Grafická závislost proudu Id na napětí Vd pro Vg 1 V.

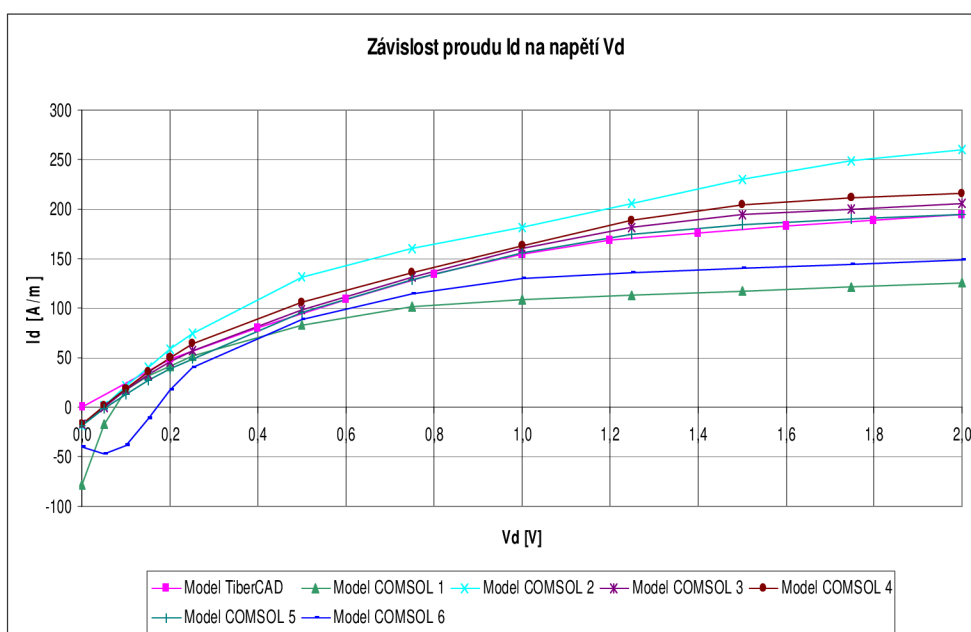
Na obrázku je zobrazen příklad výsledného grafu závislosti proudu Id na nastavovaném napětí Vd při nastaveném napětí 1 V na hradle gate pro uvedený textový skript. Výsledný průběh proudu simulovaného modelu v programu TiberCAD.

4.3 Srovnání modelů

Byly srovnány modely vytvořené v programu COMSOL s modelem vytvořeným v programu TiberCAD, které měly stejnou geometrii, stejné hodnoty dopování špičkové koncentrace elektronů ($5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) a děr (10^{14} cm^{-3}). Dále oba modely měly nastavenou konstantní mobilitu (pohyblivost) nosičů a stejné napětí na hradle gate např. 1 V. Modely jsou trochu rozdílné v rozložení elektrostatického pole. Model v programu COMSOL používá hodnoty napětí vztahené k energií vakua. Model pro program TiberCAD využívá definování velikostí bariér. V konečném důsledku by měl být výsledek ekvivalentní.

Tab. 4.10: Zobrazení příkladu laděných parametrů.

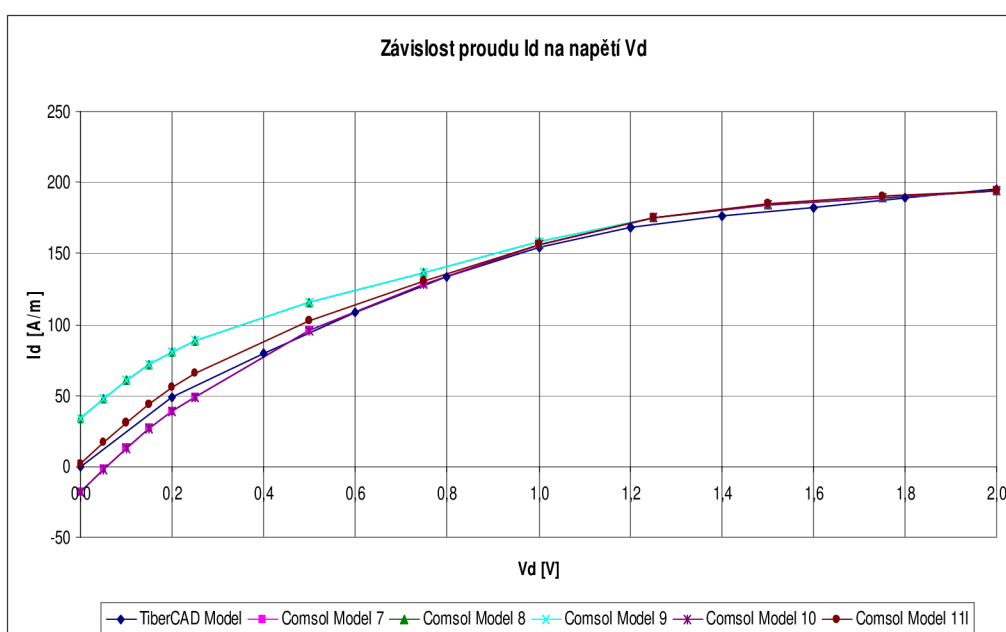
Model COMSOL 1	První nastavení simulace a srovnání
Model COMSOL 2	Nastavené hodnoty X_{poly} 3 V a X_{si} 4 V.
Model COMSOL 3	Nastavené hodnoty X_{poly} 3 V a X_{si} 3,5 V.
Model COMSOL 4	Nastavené hodnoty X_{poly} 3 V a X_{si} 3,6 V.
Model COMSOL 5	Nastavené hodnoty X_{poly} 3 V a X_{si} 3,4 V.
Model COMSOL 6	Nastavené hodnoty X_{poly} 3 V a X_{si} 3,0 V.



Obr. 4.4: Příklad grafického srovnání průběhů při ladění parametrů.

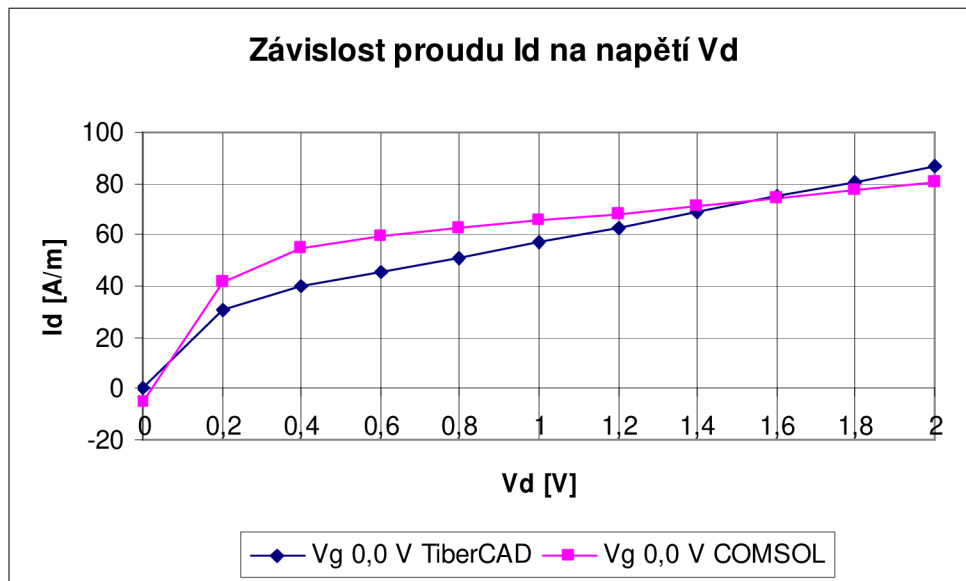
Tab. 4.11: Příklad nastavení a laděných parametrů.

COMSOL Model 7	Nastavené hodnoty X_{poly} 3 V a X_{si} 3,4 V.
COMSOL Model 8	Mobilita anisotropní u obou modulů – stejná konstantní hodnota, velikost sítě pro rozhraní B-K-D a G-L-I (mesh) $1 \cdot 10^{-9}$.
COMSOL model 9	Nastavení jemné sítě pro rozhraní B-K-D a G-L-I $1 \cdot 10^{-9}$, isotropní konstantní mobilita.
COMSOL Model 10	Nastavení sítě pro rozhraní B-K-D a G-L-I na $5 \cdot 10^{-9}$.
COMSOL Model 11	Nastavení sítě pro rozhraní B-K-D a G-L-I na $4 \cdot 10^{-9}$.

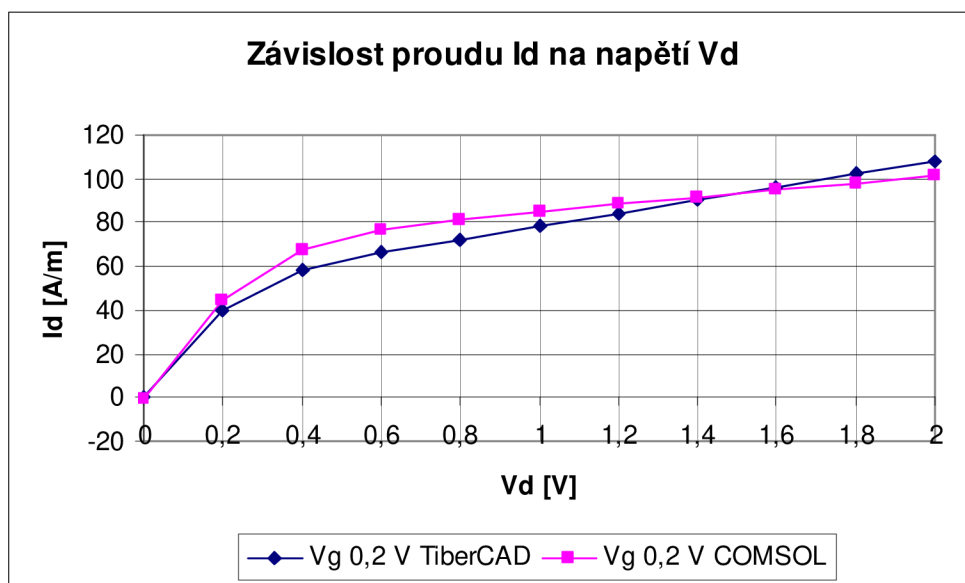


Obr. 4.5: Příklad grafické srovnání modelů při ladění parametrů.

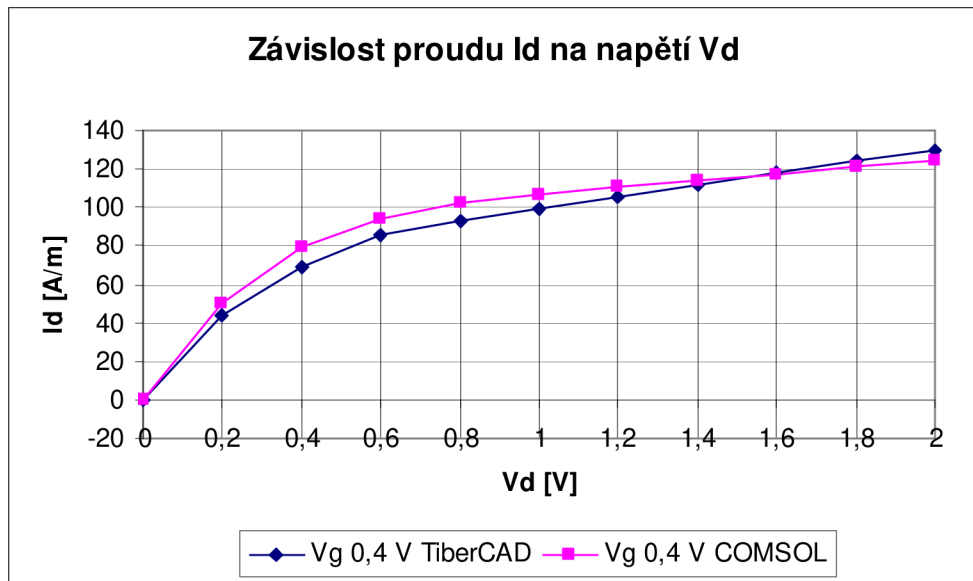
Srovnání finálního modelu s vyladěnými parametry při různém nastavení napětí na hradle gate (V_g).



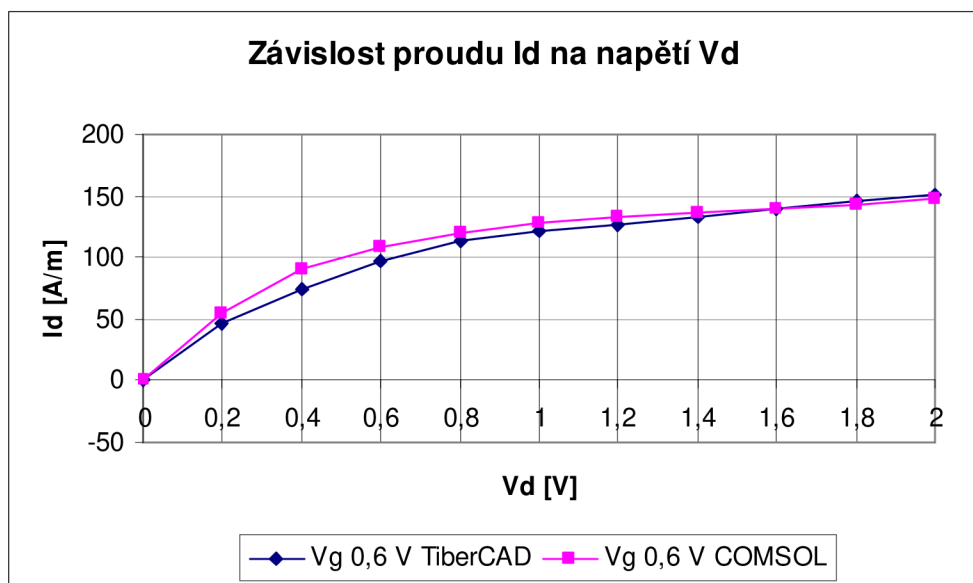
Obr. 4.6: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0 V.



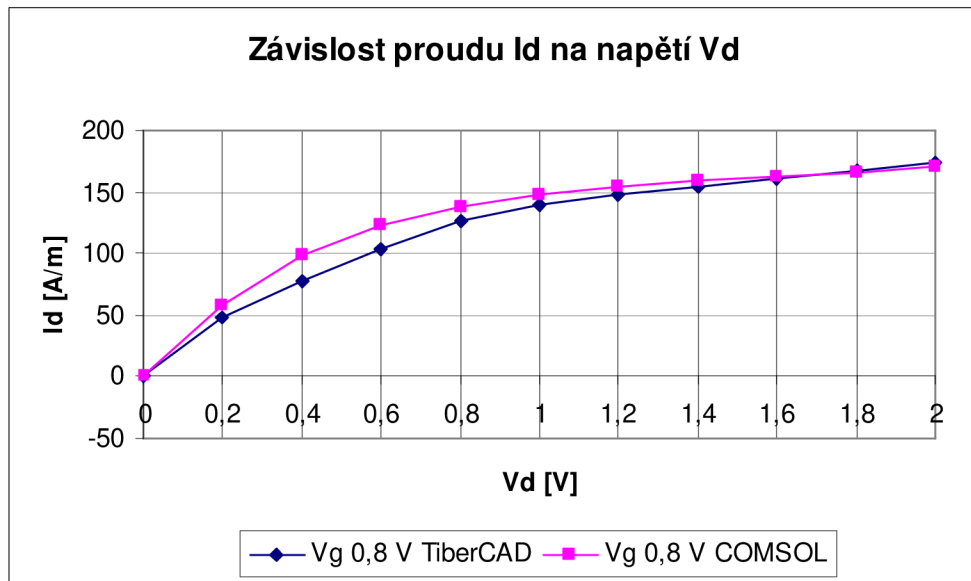
Obr. 4.7: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,2 V.



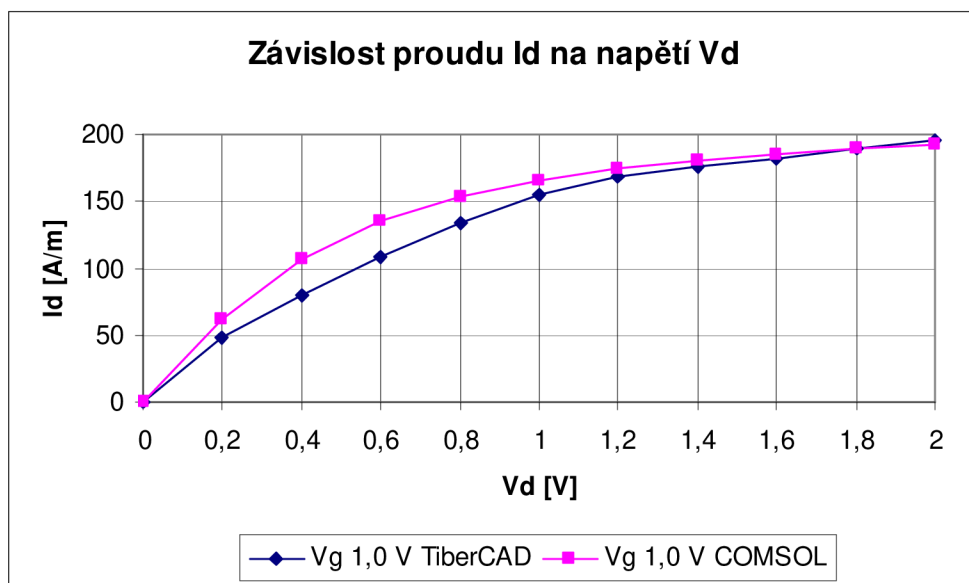
Obr. 4.8: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,4 V.



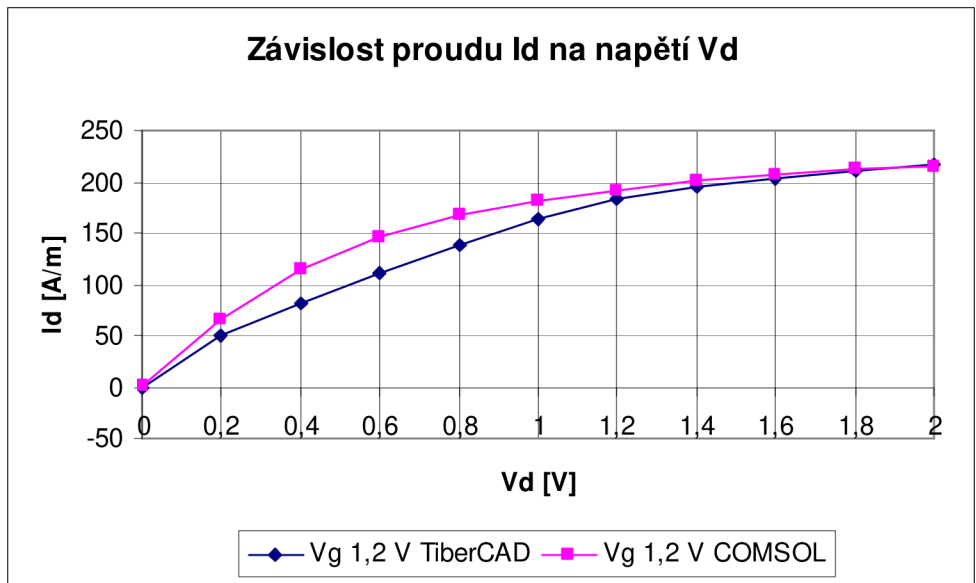
Obr. 4.9: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,6 V.



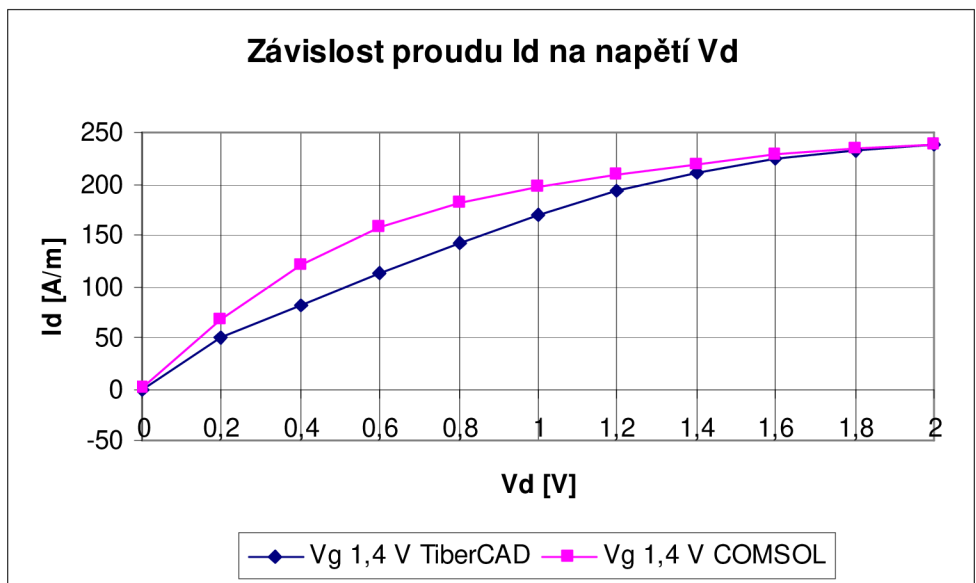
Obr. 4.10: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 0,8 V.



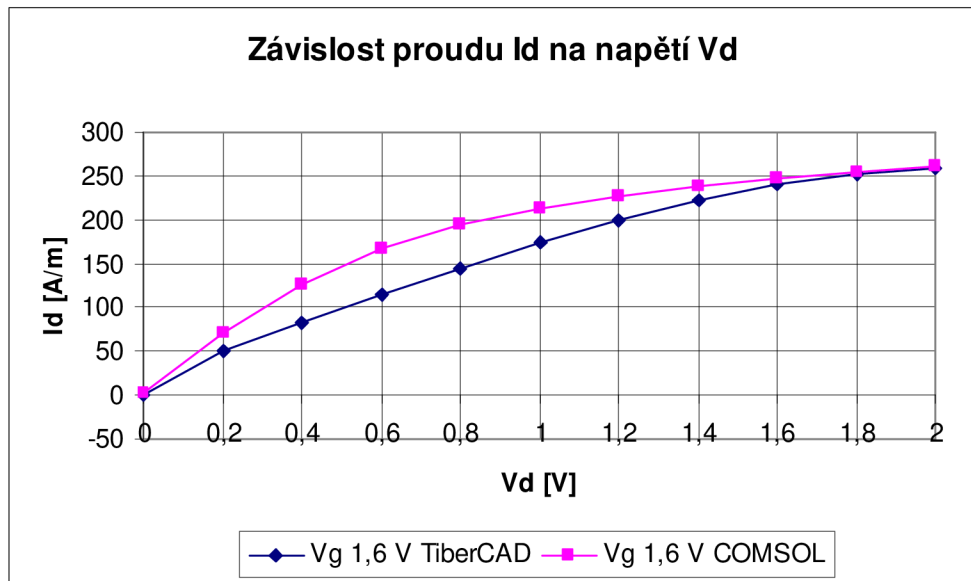
Obr. 4.11: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1 V.



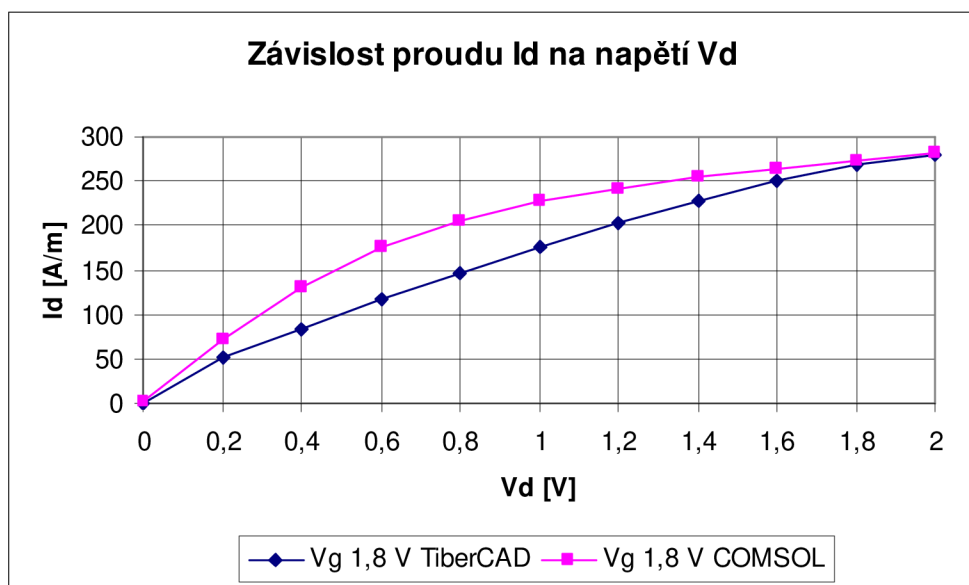
Obr. 4.12: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,2 V.



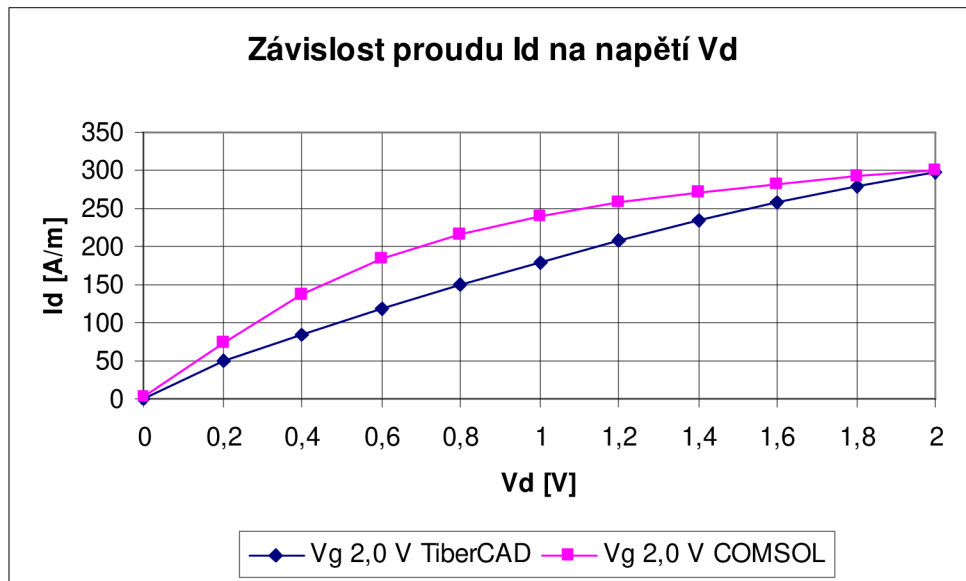
Obr. 4.13: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,4 V.



Obr. 4.14: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,6 V.

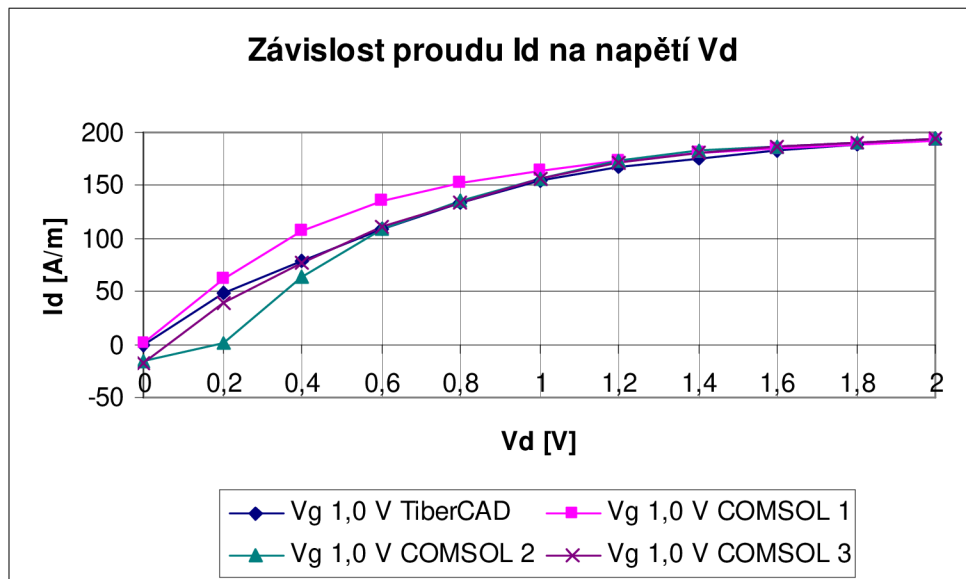


Obr. 4.15: Grafická závislost proudu I_d na napětí V_d pro napětí V_g 1,8 V.



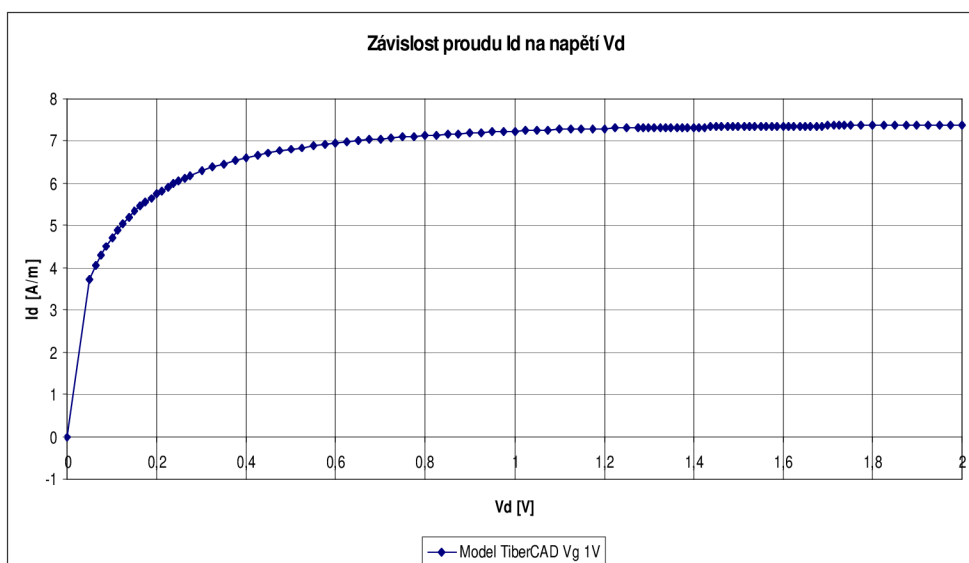
Obr. 4.16: Grafická závislost proudu Id na napětí Vd pro napětí Vg 2 V.

V grafech (Obr. 4.4 a 4.5) je naznačen příklad postupu ladění parametrů a je ukázán vliv jednotlivých laděných parametrů na výsledný průběh proudu. Laděné parametry jsou zobrazeny v Tab. 4.10 a 4.11. V ostatních grafech pro srovnání průběhu proudu mezi modely v programu COMSOL a v programu TiberCAD jsou pozorovatelné rozdíly v hodnotách proudu mezi jednotlivými průběhy. Velký vliv na tvar i velikost průběhu proudu pro model v programu COMSOL mělo nastavení velikostí jednotlivých prvků sítě. Při zvětšení elementů sítě na rozhraní B-K-D a G-L-I (viz. Obr. 4.2) na hodnotu $5 \cdot 10^{-9}$ a u subdomény polovodiče typu P na hodnotu $5 \cdot 10^{-8}$ se hodnoty proudu mírně snížily (viz. Obr. 4.17 model COMSOL 3). Při nulovém rozmítaném napětí na hradle drain vznikl záporný proud. Výsledné nastavení sítě popisované v textu je kompromisem mezi téměř nulovým proudem, celkovým tvarem průběhu, hodnotami proudu pro jednotlivá nastavovaná napětí a výpočetní náročností. K dalšímu ovlivnění průběhu, především v záporných hodnotách, přispěla zapnutá stabilizační funkce artificial diffusion. Další vliv má druh zapnuté stabilizační funkce na tvar průběhu proudu pro nastavovaná napětí od 0 V do 0,6 V (viz. Obr. 4.17 model COMSOL 2 – zapnutá stabilizační funkce streamline diffusion, vybrána funkce Petrov-Galerkin / compensated s nastavenou hodnotu na 0,4) a na velikost hodnot průběhu. Bez zapnutí této funkce nebyl schopen program COMSOL najít výsledné řešení. Nalezení řešení bez zapnuté stabilizační funkce nebyl program COMSOL ani u jednoduché struktury PN přechodu. Program COMSOL má také problém s nalezením řešení pro vysoké hodnoty dopovaných špičkových koncentrací.



Obr. 4.17: Grafická závislost proudu Id na napětí Vd pro napětí Vg 1 V.

Příklad závislosti proudu na nastavovaném napětí na hradle drain se zapnutou pohyblivostí nosičů závislou na velikosti dopování a na elektrickém poli je na obr. 4.18 pro model v programu TiberCAD.



Obr. 4.18: Grafická závislost proudu Id na napětí Vd pro napětí Vg 1 V.

Program COMSOL pro vytvořený model se závislou mobilitou nosičů nenašel řešení v ustáleném stavu. Řešení bylo natolik pro program COMSOL složité, že jej nebylo možné srovnat s funkčním modelem programu TiberCAD. Nepodařilo se nalézt postup, který by vedl k funkčnosti modelu a k výslednému řešení.

5 ZÁVĚR

V uvedeném textu je ukázán způsob modelování polovodičových struktur s využitím rovnic polovodičů, driftu a difúze. Uvedené vzorce se používají pro simulaci a analýzu polovodičů. Tyto vzorce využívá také program COMSOL Multiphysics a program TiberCAD. S využitím uvedených vzorců byly prováděny simulace řešení rozložení elektrického potenciálu v polovodiči a byla zjišťována závislost proudu (tekoucího mezi elektrodami drain a source u MOSFET tranzistoru) na nastavovaném napětí. V obou programech byla simulována jednoduchá struktura PN přechodu a MOSFET tranzistoru. Jako první bylo nutné se seznámit s možnostmi a problémy při modelování jednoduchých PN přechodů v programu COMSOL a potom byla simulována struktura MOSFET tranzistoru a byla porovnávána se strukturou modelovanou v programu TiberCAD pomocí závislosti proudu, kde program TiberCAD je specializovaný na simulace polovodičových struktur.

Pro přesné srovnání obou modelů bylo nutné veškeré konstanty a rovnice používané v modelu pro program TiberCAD vyhledat v literatuře a implementovat do modelu pro program COMSOL. Po implementaci všech rovnic opět nastal známý problém se stabilizací a konvergencí, který se musel vyřešit.

Jeden z problémů při modelování tranzistoru v programu COMSOL činí schopnost konvergence a stabilizace k hodnotě relativní toleranci při skokové funkci vlastností. Možnost stabilizace byla částečně vyřešena v modelu s konstantní mobilitou nosičů zapnutím stabilizační funkce v nastavení artificial diffusion, úpravou sítě a dalším nastavením konstant (např. hodnot špičkových koncentrací).

V textu byly srovnány struktury MOSFET tranzistorů s konstantní pohyblivostí nosičů pro různá nastavovaná napětí na hradle gate. V popisu textového skriptu modelu pro program TiberCAD je zobrazen popis závislých mobilit nosičů na parametrech, používaných v modelu. Příklad průběhu proudu pro model se závislou pohyblivostí nosičů zobrazuje Obr. 4.18. Tyto rovnice pro závislou mobilitu jsou také zobrazeny v Tab. 4.4 pro model v programu COMSOL. Nastavení modulu, využívající uvedené rovnice, se závislou mobilitou nosičů jsou v Tab. 4.9 u modelu pro program COMSOL. Program COMSOL pro vytvořený model se závislou pohyblivostí nosičů nenašel řešení ani se zapnutou stabilizační funkcí.

Program COMSOL je dobrý univerzální multifyzikální simulační nástroj, ale s určitými polovodičovými strukturami se závislou pohyblivostí nosičů má větší problémy, které se i přes hledání postupů vedoucích k nalezení řešení, různého nastavení a zkoušení obměňování hodnot parametrů, nepodařily odstranit. Nebylo možno model se závislou pohyblivostí nosičů v programu COMSOL srovnat s funkčním modelem s programem TiberCAD.

LITERATURA

- [1] SELBERHERR, S. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. [s.l.] : Hiedelberg: Springer-Verlag, 1984. 293 s. ISBN 0387818006
- [2] KRAMER, K. M.; HITCHON, W. N. G. *Semiconductor Devices a Simulation Approach*. [s.l.] : Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1997. 704 s. ISBN 013614330X
- [3] SZE, Simon M.; NG, Kwok K. *Physics of Semiconductor Devices*. [s.l.] : Wiley-Interscience, 2006. 832 s. ISBN 0471143235.
- [4] COLINGE, Jean-pierre; COLINGE, Cynthia A. *Physics of Semiconductor Devices*. [s.l.] : Kluwer Academic Publishers, 2002. 436 s. ISBN 1402070187.
- [5] LI, Sheng S. *Semiconductor Physical Electronics : Second Edition*. [s.l.] : Springer, 2006. 697 s. ISBN 0387288937.
- [6] MISHRA, Umesh; SINGH , Jasprit. *Semiconductor Device Physics and Design*. [s.l.] : Springer, 2008. 560 s. ISBN 1402064802.
- [7] BHATTACHARYYA, A. B. . *Compact MOSFET Models for VLSI Design*. [s.l.] : Wiley-IEEE Press, 2009. 512 s. ISBN 0470823429.
- [8] GALUP-MONTORO, Carlos; SCHNEIDER, Márcio Cherem. *Mosfet Modeling for Circuit Analysis And Design*. [s.l.] : World Scientific Publishing Company, 2007. 448 s. ISBN 9812568107.
- [9] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. [s.l.] : IDEA SERVIS, 2002. 328 s. ISBN 8085970422.
- [10] BRZOBOHATÝ, Jaromír, et al. *Elektronické součástky* [online]. Brno : [s.n.], 15. 11. 2002 [cit. 2010-11-18]. Dostupné z WWW: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/Elektronicke_soucastky_aktualni.pdf>.
- [11] RAIDA, Zbyněk, et al. *Elektromagnetické vlny Mikrovlnná technika : Multimediální učebnice* [online]. Brno : [s.n.], 2010 [cit. 2010-11-18]. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/cz/multimedia_textbook_cz.pdf>.
- [12] VASILESKA, Dragica. *Drift-Diffusion Model: Introduction* [online]. Arizona State University : [s.n.], 2006 [cit. 2010-11-18]. Dostupné z WWW: <http://nanohub.org/resources/1545/download/ddmodel_introductory_part_word.pdf>.
- [13] *ISE TCAD Release 10.0 : DESSIS* [online]. Switzerland : ISE Integrated Systems Engineering AG, 1995 - 2004 [cit. 2010-11-18]. Dostupné z WWW: <<https://nanohub.org/tools/nanowireclassic/raw-attachment/wiki/ProPhet/dessis-1.pdf>>.
- [14] *COMSOL Multiphysics Model Library : VERSION 3.5 COMSOL 3.5*. [s.l.] : COMSOL AB., 2008 [cit. 2010-11-25].
- [15] SACCONI, Fabio, et al. *TiberCAD User Manual* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-12-30]. Dostupné z WWW: <http://www.tiberCAD.org/files/tiberCAD_manual.pdf>.
- [16] MOSFET. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 29. 6. 2006, 16:15 , last modified on 23. 9. 2010 v 09:17 [cit. 2010-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/MOSFET>>.
- [17] *COMSOL Multiphysics Modeling Guide : VERSION 3.5 COMSOL 3.5*. [s.l.] : COMSOL AB., 2008 [cit. 2010-11-25].

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

D	Elektrická indukce
D_n	Difúzní konstanta elektronů
D_p	Difúzní konstanta děr
E	Elektrické pole
E_g	Energetická šířka zakázaného pásma pro křemík
F	Řídící pole
H	Magnetické pole
I	Proud (skalární veličina)
$I_{n,drift}$	Driftový proud
J	Proudová hustota (vektorová veličina)
J_n	Proudová hustota elektronů
J_p	Proudová hustota děr
k	Boltzmanova konstanta
m_e^*	Efektivní hmotnost elektronů
m_p^*	Efektivní hmotnost děr
n	Koncentrace elektronů
n_i	Intrinsická koncentrace
n_l	Koncentrace elektronů vztažená k energetické hladině
N	Koncentrace pevného náboje příměsí
N_A	Ionizované akceptory
N_D	Ionizované donory
p	Koncentrace děr
p_l	Koncentrace děr vztažená k energetické hladině
q	Elementární náboj
R	Četnost výskytu generace a rekombinace elektronů a děr
R_{SRH}	Shockley-Read-Hall rozdělovací funkce
S	Plocha
v_d	Driftová rychlost
T	Teplota
T_0	Referenční teplota

V_D	Napětí na hradle drain
ϵ	Permitivita
μ_n	Pohyblivost elektronů
μ_p	Pohyblivost děr
τ_n	Doby života elektronů (nosičů)
τ_p	Doby života děr (nosičů)
ψ	Elektrický potenciál
ρ	Hustota volného náboje
χ_{Si}	Elektronová affinita
ϕ_F	Fermiho potenciál
ϕ_F	Fermiho potenciál
Φ_B	Energetická šířka bariéry
ψ_b	Vestavěný potenciál
ψ_D	Aplikované napětí
PDE	Parciální diferenciální rovnice
SRH	Funkce Shockley-Read-Hall, rozdělovací funkce

SEZNAM PŘÍLOH

A	Simulační skripty	54
A.1	Simulační skript MOSFET tranzistoru v programu TiberCAD	54
A.2	Geometrie MOSFET tranzistoru.....	57
A.3	Maxwellovy rovnice	59

A SIMULAČNÍ SKRIPTY

A.1 Simulační skript MOSFET tranzistoru v programu TiberCAD

V této kapitole je ukázán příklad simulačního skriptu MOSFET tranzistoru.

```
# Description of the device physical regions
$Device
{
  Region substrate
  {
    material = Si
    doping = 1e18 doping_type = acceptor
  }

  Region contact
  {
    material = Si
    doping = 5e19 doping_type = donor
  }

  Region oxide
  {
    material = SiO2
  }
}

# Definition of Simulation Models and associated Boundary
Conditions
$Models
{
  model driftdiffusion
  {
    options
    {
      simulation_name = driftdiffusion

      physical_regions = all
    }

    physical_model recombination
    {
      model = srh
    }

    physical_model electron_mobility
    {
```



```

        model = field_dependent

        low_field_model = doping_dependent    #Masetti model for Si
!!!
    }

BC_Regions
{
    BC_Region gate
    {
        type = schottky
barrier_height = 3.0

        voltage = @Vg[0.0]
    }

    BC_Region source
    {
        type = ohmic

        voltage = 0.0
    }

    BC_Region drain
    {
        type = ohmic

        voltage = @Vd[0.5]
    }

}

}

# Definition of Model-dependent Solver parameters
$Solver
{
    driftdiffusion
    {
        nonlinear_solver = tiber
        coupling = electrons
        ksp_type = bcgsl
        nonlin_max_it = 10
        nonlin_step_tol = 1e-3
        ls_max_step = 2
    }

    Sweep

```

```

{
    sweep_drain
    {
        simulation = driftdiffusion
        variable = Vd
        start = 0.0
        stop = 2.0
        steps = 4

        #plot_data = true
    }

    sweep_gate
    {
        variable = Vg
        start = 1.0
        stop = 1.0 #0.5
        steps = 1 # 6
        simulation = sweep_drain
        plot_data = true
    }
}

# Definition of Model dependent physical parameters
$Physics
{
    driftdiffusion
    {
        statistics = FD
    }
}

# Definition of model-independent parameters of the Simulation

$Simulation
{
    #searchpath = ../../materials
    meshfile = mosfet.msh
    dimension = 2
    temperature = 300
    solve = sweep_gate
    resultpath = output_IV_char
    #output_format = gmv
    output_format = vtk
    plot = (Ec, Ev, QFermi_e, eDensity, eCurrent, NetRecombination,
EField, ElPotential, ContactCurrents)
}

```

A.2 Geometrie MOSFET tranzistoru

Geometrie rozměrů je zde udávána v μm .

```
lsub=0.03;
lacc=0.002;
lct=0.0005;
lg=0.0015;
lh=0.01;
lc=0.0005;

Lg_2 = 0.0375;
d = 0.01;
Ls = 0.1;
h = 0.25;
b = 0.0025;
o = 0.005;

xd = Lg_2 + d;
xd2 = Lg_2 + d / 2;
xmax = xd + Ls - d;

Point(1) = {0, -h, 0, lsub};
Point(2) = {0, 0, 0, lc};
Point(3) = {xmax, -h, 0.0, lsub};
Point(4) = {-xmax, -h, 0.0, lsub};
Point(5) = {xmax, 0, 0.0, lh};
Point(6) = {-xmax, 0, 0.0, lh};
Point(7) = {-xd, 0, 0.0, lct};
Point(8) = {-Lg_2 - o, 0, 0.0, lc};
Point(9) = {Lg_2 + o, 0, 0.0, lc};
Point(10) = {xd, 0, 0.0, lct};
Point(11) = {-Lg_2, 0, 0, lc};
Point(12) = {Lg_2, 0, 0, lc};
Point(13) = {xmax, -0.02, 0, lh};
Point(14) = {-xmax, -0.02, 0, lh};
Point(15) = {-Lg_2, -0.02, 0.0, lacc};
Point(16) = {Lg_2, -0.02, 0.0, lacc};
Point(17) = {-Lg_2 - o, b, 0, lg};
Point(18) = {Lg_2 + o, b, 0, lg};
Point(19) = {0, b, 0, lg};

Line(1) = {4, 1};
Line(2) = {3, 13};
Line(6) = {4, 14};
Line(7) = {10, 9};
Line(8) = {12, 2};
Line(9) = {8, 7};
Line(10) = {11, 8};
Line(11) = {9, 12};
Line(13) = {7, 6};
Line(19) = {5, 10};
Line(28) = {1, 3};
Line(29) = {2, 11};
Line(30) = {14, 15};
Line(31) = {15, 11};
Line(32) = {14, 6};
Line(33) = {16, 12};
```

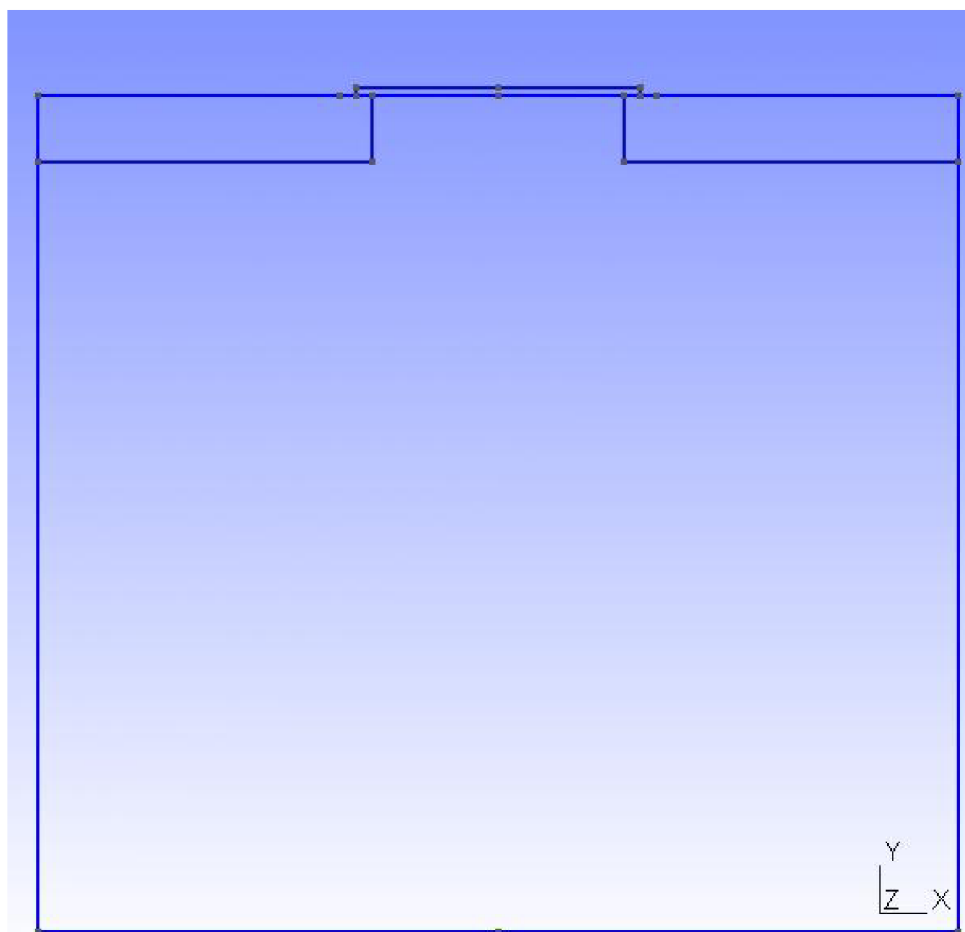
```

Line(34) = {16,13};
Line(35) = {13,5};
Line(36) = {8,17};
Line(37) = {9,18};
Line(38) = {18,19};
Line(39) = {19,17};

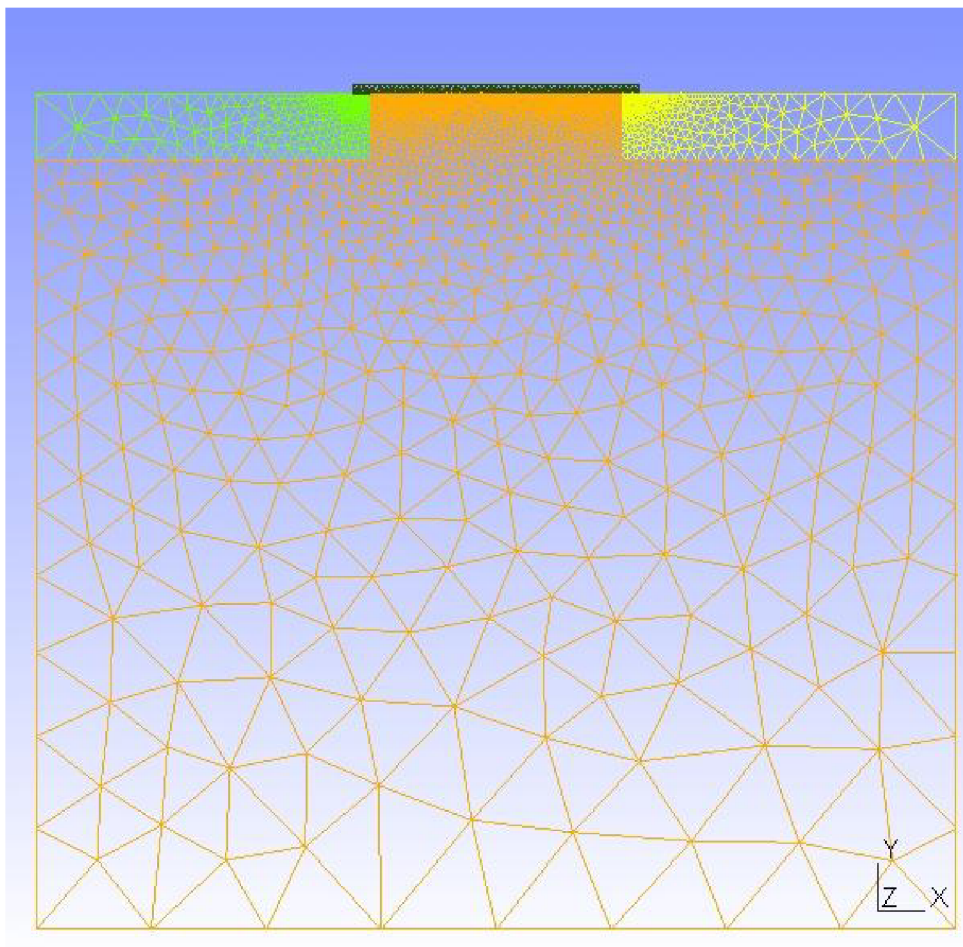
Line Loop(40) = {28,2,-34,33,8,29,-31,-30,-6,1};
Plane Surface(41) = {40};
Line Loop(42) = {30,31,9,10,13,-32};
Plane Surface(47) = {42};
Line Loop(43) = {34,35,7,11,19,-33};
Plane Surface(44) = {43};
Line Loop(45) = {8,29,36,10,-39,-38,-37,11};
Plane Surface(46) = {45};

Physical Surface("substrate") = {41}; // n-Si
Physical Surface("contact") = {44,47}; // n+-Si
Physical Surface("oxide") = {46}; // SiO2
Physical Line("source") = {13}; // source
Physical Line("gate") = {39,38}; // gate
Physical Line("drain") = {19}; // drain

```



Obr. 5.1: Příklad geometrie.



Obr. 5.2: Příklad meshové mřížky.

A.3 Maxwellovy rovnice

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{A.3.1})$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{A.3.2})$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{A.3.3})$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{A.3.4})$$

$$D = \epsilon E \quad (\text{A.3.5})$$

$$D = \mu H \quad (\text{A.3.6})$$