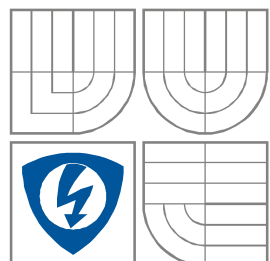


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PLANÁRNÍ PŘENOSOVÉ VEDENÍ NA
POLOVODIČOVÉM SUBSTRÁTU
PLANAR TRANSMISSION LINE ON SEMICONDUCTOR SUBSTRATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Pavel Chára

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Pavel Chára

ID: 98546

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Planární přenosové vedení na polovodičovém substrátu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s typy planárních vedení a diskutujte jejich vlastnosti. Vytvořte reálné modely vybraných typů vedení v programu COMSOL Multiphysics a simulací ověřte jejich vlastnosti. Nahradte dielektrický substrát polovodičovým a modelováním transportních procesů určete jeho elektrické parametry pro různé hodnoty přiloženého stejnosměrného napětí. Výsledky ověřte výpočtem ve specializovaném programu TiberCAD. Vyšetřete vliv přiloženého napětí a vodivosti substrátu na přenosové vlastnosti vybraných vedení.

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: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

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.

Anotace

Cílem této práce bylo seznámit se s typy planárních vedení a diskutovat jejich vlastnosti. Následně pak vytvoření reálných modelů vybraných typů vedení v programu COMSOL Multiphysics a simulací ověřit jejich vlastnosti. Druhá část práce se zabývá modelováním polovodičového substrátu, který nahrazuje dielektrický substrát použitý u vedení v první části práce. Závěrečná část práce se zabývá ověřením dosažených výsledků výpočtem ve specializovaném programu TiberCAD.

Klíčová slova: Planární přenosová vedení, COMSOL, polovodič, TiberCAD.

Annotation

The aim of this thesis is to acquaint with the various types of the planar transmission lines and discuss their properties. Subsequently, the development of the real models of selected lines and verification their properties by simulations using COMSOL Multiphysics. The second part deals with the modeling of the semiconductor substrate, which replacing the dielectric substrate used for the transmission lines in the first part. The final part deals with the verification of calculation results in a specialized program TiberCAD.

Keywords: Planar transmission lines, COMSOL, semiconductor, TiberCAD.

CHÁRA, P. *Planární přenosové vedení na polovodičovém substrátu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 66 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Michal Pokorný, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Planární přenosové vedení na polovodičovém substrátu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 18. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Michalu Pokornému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 18. května 2012

.....
podpis autora

Obsah

Obsah.....	1
Seznam obrázků.....	3
Seznam tabulek.....	6
1 Úvod.....	7
2 Hybridní mikrovlnné integrované obvody.....	8
2.1 Druhy mikropáskových vedení.....	8
2.1.1 Nesymetrické mikropáskové vedení.....	8
2.1.2 Symetrické mikropáskové vedení.....	9
2.1.3 Koplanární třívodičové vedení.....	9
2.1.4 Koplanární dvouodičové vedení.....	10
2.1.5 Štěrbinové vedení.....	10
3 Nesymetrické mikropáskové vedení.....	11
3.1 Efektivní šířka nesymetrického mikropáskového vedení.....	13
3.2 Vliv konečné tloušťky horního pásku.....	14
3.3 Efektivní permitivita.....	14
3.4 Charakteristická impedance.....	15
4 Štěrbinové vedení.....	16
4.1 Vliv konečné tloušťky pásků.....	17
4.2 Efektivní permitivita.....	17
4.3 Charakteristická impedance.....	17
4.4 Aproximace přesného řešení.....	18
5 Koplanární třívodičové vedení.....	20
5.1 Efektivní permitivita.....	21
5.2 Vliv konečné tloušťky horního pásku.....	21
5.3 Charakteristická impedance.....	21
6 Simulace.....	22
6.1 Nesymetrické mikropáskové vedení.....	22
6.2 Štěrbinové vedení.....	25
6.3 Koplanární třívodičové vedení.....	28
7 Modelování polovodičových struktur.....	32
7.1 Základní rovnice polovodičů.....	32

7.2 Fyzikální parametry	33
7.2.1 Dotační profil.....	33
7.2.2 Pohyblivost nosičů	34
7.2.3 Generace rekombinace nosičů	34
7.3 Analýza základních rovnic a okrajové podmínky	35
8 Model planárního přenosového vedení na polovodičovém substrátu	37
8.1 Model polovodičového substrátu v prostředí COMSOL	37
8.2 Model polovodičového substrátu v prostředí TiberCAD.....	41
8.2.1 Geometrie polovodičové struktury a výpočetní síť	42
8.2.2 Konfigurační soubor TiberCADu	42
8.3 Nesymetrické mikropáskové vedení na polovodičovém substrátu.....	44
8.3.1 Srovnání výsledků s programem TiberCAD.....	48
8.4 Koplanární třívodičové vedení na polovodičovém substrátu.....	50
8.4.1 Srovnání výsledků s programem TiberCAD.....	53
8.5 Štěrbínové vedení.....	56
8.5.1 Srovnání výsledků s programem TiberCAD.....	61
9 Závěr	64
Seznam zkratk a použitých symbolů.....	65
Použitá literatura.....	66

Seznam obrázků

Obr. 1: Nesymetrické mikropáskové vedení	8
Obr. 2: Stíněné vedení.....	8
Obr. 3: Překryté vedení.....	8
Obr. 4: Překryté vedení - varianta.....	8
Obr. 5: Vedení pro paralelní spojení.....	8
Obr. 6: Symetrické mikropáskové vedení	9
Obr. 7: Stíněné mikropáskové vedení se zavěšeným substrátem	9
Obr. 8: Koplanární třívodičové vedení	9
Obr. 9: Koplanární třívodičové vedení se zemnicí plochou.....	9
Obr. 10: Koplanární dvouvodičové vedení.....	10
Obr. 11: Štěrbínové vedení.....	10
Obr. 12: Nesymetrické mikropáskové vedení	11
Obr. 13: Průběh siločar vidu kvazi-TEM v příčném řezu.....	13
Obr. 14: Konformní zobrazení nesymetrického mikropáskového vedení.....	13
Obr. 15: Štěrbínové vedení.....	16
Obr. 16: Rozložení elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení	16
Obr. 17: Rozložení elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení – podélný pohled.....	16
Obr. 18: Rozložení elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení – horní pohled	17
Obr. 19: Koplanární třívodičové vedení	20
Obr. 20: Rozložení elektromagnetického pole v koplanárním třívodičovém vedení.	20
Obr. 21: Nesymetrické mikropáskové vedení – rozměry	22
Obr. 22: Profil modelovaného mikropáskového vedení	23
Obr. 23: Vygenerovaná síť konečných prvků.....	23
Obr. 24: Závislost ztrát v nesymetrickém mikropáskovém vedení na frekvenci.....	24
Obr. 25: Závislost normované fázové konstanty šíření v nesymetrickém mikropáskovém vedení na frekvenci.....	24
Obr. 26: Rozložení elektrického pole v průřezu mikropáskového vedení na frekvenci 50 GHz	25
Obr. 27: Štěrbínové vedení – rozměry	25

Obr. 28: Profil modelovaného štěrbinového vedení – výřez	26
Obr. 29: Vygenerovaná síť konečných prvků – výřez	26
Obr. 30: Rozložení elektrického pole v průřezu štěrbinového vedení na frekvenci 50 GHz – výřez.....	27
Obr. 31: Závislost ztrát ve štěrbinovém vedení na frekvenci	27
Obr. 32: Závislost normované fázové konstanty šíření ve štěrbinovém vedení na frekvenci	28
Obr. 33: Koplanární třívodičové vedení – rozměry	28
Obr. 34: Profil modelovaného koplanárního třívodičového vedení	29
Obr. 35: Vygenerovaná síť konečných prvků.....	29
Obr. 36: Rozložení elektrického pole v průřezu štěrbinového vedení na frekvenci 50 GHz	30
Obr. 37: Závislost ztrát v koplanárním třívodičovém vedení na frekvenci.....	30
Obr. 38: Závislost normované fázové konstanty šíření v koplanárním třívodičovém vedení na frekvenci	31
Obr. 39: Dotační profil PN diody	34
Obr. 40: 2D geometrie planárního tranzistoru MOSFET	36
Obr. 41: Závislost vodivosti a ztrát na hodnotě dotací elektronů N_d	38
Obr. 42: Funkce N modelovaného polovodičového přechodu	38
Obr. 43: Struktura polovodiče	39
Obr. 44: Struktura nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu.....	44
Obr. 45: Výpočetní síť nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu.....	44
Obr. 46: Rozložení elektrického pole v průřezu nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu	44
Obr. 47: Závislost ztrát na frekvenci při napětí přiloženém na mikropásek.....	45
Obr. 48: Normovaná fázová konstanta šíření v nesymetrickém mikropáskovém vedení.....	45
Obr. 49: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí 25 V	46
Obr. 50: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí -25 V	46
Obr. 51: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí 25 V	46
Obr. 52: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí -25 V	46

Obr. 53: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí 25 V.....	47
Obr. 54: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí -25 V	47
Obr. 55: Energetický diagram polovodičového substrátu.....	47
Obr. 56: Struktura a výpočetní síť nesymetrického mikropáskového vedení	48
Obr. 57: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – kladné hodnoty napětí.....	48
Obr. 58: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – záporné hodnoty napětí.....	49
Obr. 59: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – kladné hodnoty	49
Obr. 60: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – záporné hodnoty ..	50
Obr. 61: Struktura koplanárního třívodičového vedení na polovodičovém substrátu	50
Obr. 62: Výpočetní síť koplanárního třívodičového vedení polovodičovém substrátu	50
Obr. 63: Rozložení elektrického pole v průřezu nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu	51
Obr. 64: Závislost ztrát na frekvenci při napětí přiloženém na vedení	51
Obr. 65: Normovaná fázová konstanta šíření v koplanárním třívodičovém vedení..	52
Obr. 66: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí 25 V	52
Obr. 67: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí -25 V	52
Obr. 68: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí 25 V	52
Obr. 69: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí -25 V	52
Obr. 70: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí 25 V.....	53
Obr. 71: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí -25 V	53
Obr. 72: Energetický diagram polovodičového substrátu.....	53
Obr. 73: Struktura a výpočetní síť koplanárního třívodičového vedení	54
Obr. 74: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – kladné hodnoty napětí.....	54
Obr. 75: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – záporné hodnoty napětí.....	55
Obr. 76: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – kladné hodnoty	55
Obr. 77: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – záporné hodnoty ..	56
Obr. 78: Struktura šterbinového vedení na polovodičovém substrátu.....	56
Obr. 79: Výpočetní síť šterbinového vedení na polovodičovém substrátu	56

Obr. 80: Rozložení elektrického pole v průřezu štěrbinového vedení na polovodičovém substrátu	57
Obr. 81: Závislost ztrát na frekvenci při napětí přiloženém na štěrbinovém vedení .	57
Obr. 82: Normovaná fázová konstanta šíření v štěrbinovém vedení	58
Obr. 83: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí 15 V	58
Obr. 84: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí -15 V	58
Obr. 85: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí 15 V	59
Obr. 86: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí -15 V	59
Obr. 87: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí 15 V.....	59
Obr. 88: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí -15 V	60
Obr. 89: Energetický diagram polovodičového substrátu.....	60
Obr. 90: Struktura a výpočetní síť štěrbinového vedení.....	61
Obr. 91: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – kladné hodnoty napětí.....	61
Obr. 92: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – záporné hodnoty napětí.....	62
Obr. 93: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – kladné hodnoty	62
Obr. 94: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – záporné hodnoty ..	63

Seznam tabulek

Tab. 1: Okrajové podmínky typických rozhraní polovodičových struktur.....	36
Tab. 2: Konstanty pro modelování gallium arsenidového polovodiče	37

1 Úvod

Tento semestrální projekt se zabývá planárními přenosovými vedeními. V první části práce je stručně shrnuta a popsána většina druhů těchto v současnosti používaných vedení. Dále se práce se zabývá vybranými typy planárních vedení, která jsou následovně podrobněji popsána, včetně jejich návrhových vztahů. Práce se zejména zabývá třemi základními typy planárních vedení. Mezi tyto typy vedení patří nesymetrické mikropáskové vedení, štěrbinové vedení a koplanární třívodičové vedení. Tato část práce je také věnována modelování a simulaci těchto vedení s použitím dielektrického substrátu v programu COMSOL Multiphysics, ve kterém jsou ověřeny jejich vlastnosti.

Druhá část práce se věnuje modelování polovodičového substrátu, který je následně použit na místo dielektrického substrátu použitého při simulacích vedení z první části práce. Nejprve jsou popsány základní teoretické poznatky nutné k modelování polovodičových struktur a následně je vytvořen model polovodičového substrátu, který je posléze použit k simulaci vybraných planárních přenosových vedení. Dále byl na těchto vedeních zkoumán vliv přiloženého napětí a vodivosti substrátu na jejich přenosové vlastnosti.

Závěrečná část práce se zabývá porovnáním výsledků získaných pomocí programu COMSOL Multiphysics pomocí specializovaného programu TiberCAD.

2 Hybridní mikrovlnné integrované obvody

Mikropásková vedení jsou v hybridních mikrovlnných obvodech vytvářena na dielektrických substrátech, zatímco aktivní i pasivní polovodičové prvky se k těmto vedením připojují ve formě zapouzdřených nebo nezapouzdřených prvků pájením nebo ultrazvukovým svářením. To umožňuje optimalizovat aktivní prvky a obvody páskového vedení nezávisle na sobě a plně využít jejich dosažitelných vlastností. Parazitní vlastnosti nezapouzdřených čipů se začínají uplatňovat od 18 GHz výše, což určuje hranici mezi oblastmi optimálního využití hybridních a monolitických mikrovlnných obvodů [1].

2.1 Druhy mikropáskových vedení

2.1.1 Nesymetrické mikropáskové vedení

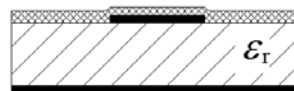
Nesymetrické mikropáskové vedení (Obr. 1) je základním a nejčastěji používaným typem. Pro potlačení některých nežádoucích vlastností tohoto vedení jej můžeme dále upravovat. Pak například stínění na Obr. 2 zabraňuje vyzařování z otevřeného vedení. Zapuštěním vodivého pásku do dielektrika (Obr. 3), odstraníme příčnou nehomogenost původního vedení, což je ale technologicky velice náročné. Je-li mikropáskové vedení vytvořeno na polovodičovém substrátu, je nutná povrchová pasivace například tenkou vrstvou SiO_2 (Obr. 4) [1].



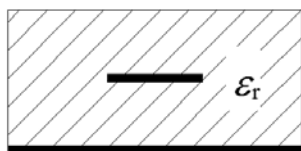
Obr. 1: Nesymetrické mikropáskové vedení



Obr. 2: Stíněné vedení



Obr. 4: Překryté vedení - varianta



Obr. 3: Překryté vedení



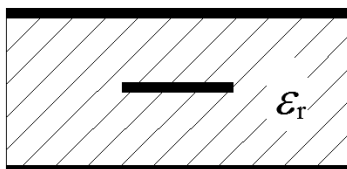
Obr. 5: Vedení pro paralelní spojení

Na Obr. 5 je zobrazeno vedení používané pro spojování se silně tepelně vyzařujícími součástkami, feritovými cirkulátory a rezonátory s vysokým činitelem jakosti. Tyto součásti se k mikropáskovým vedením připojují paralelně, z důvodu

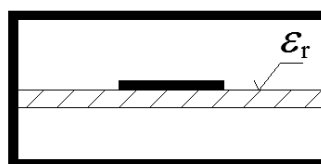
dosažení malého tepelného odporu na dolní vodivé desce a takového paralelní spojení si u mikropáskových vedení vyžaduje vyvrtat do substrátu otvor [1].

2.1.2 Symetrické mikropáskové vedení

Symetrické mikropáskové vedení (Obr. 6) se vyznačuje menším vyzařováním než otevřené nesymetrické mikropáskové vedení, jeho výroba je ale složitější. Od tohoto vedení je odvozeno stíněné mikropáskové vedení se zavěšeným substrátem (Obr. 7), nazývané také symetrické mikropáskové vedení vysoké jakosti. Ve srovnání s klasickým mikropáskovým vedením je u tohoto typu jen menší část elektromagnetického pole obsažena v dielektrickém substrátu. Vedení má proto velmi malé dielektrické ztráty a lze jej použít ke konstrukci mikrovlnných obvodů s vysokým činitelem jakosti. Jeho výroba je jednoduchá, neboť substrát není z jedné strany pokoven [1].



Obr. 6: Symetrické mikropáskové vedení



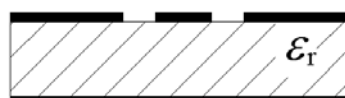
Obr. 7: Stíněné mikropáskové vedení se zavěšeným substrátem

2.1.3 Koplanární třívodičové vedení

V případě koplanárního třívodičového vedení (Obr. 8) se jedná se o typ planárního vedení. Na rozdíl od mikropáskového vedení je tvořeno pouze jednostranně pokoveným dielektrikem. Vlastní vedení zde tvoří středový pásek a za štěrbinami se nalézají zemní plochy. Tento typ vedení se často používá při realizaci monolitických mikrovlnných integrovaných obvodů doplněn zemní rovinou (Obr. 9) [7].



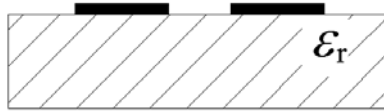
Obr. 8: Koplanární třívodičové vedení



Obr. 9: Koplanární třívodičové vedení se zemnicí plochou

2.1.4 Koplanární dvouvodičové vedení

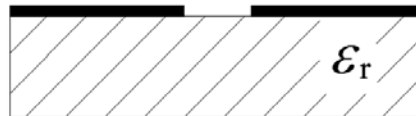
Koplanární dvouvodičová vedení (Obr. 10) mohou být realizována jako symetrická, v tomto případě jsou pásy stejně široké, nebo nesymetrická, kdy pásy nejsou stejně široké.



Obr. 10: Koplanární dvouvodičové vedení

2.1.5 Štěrbínové vedení

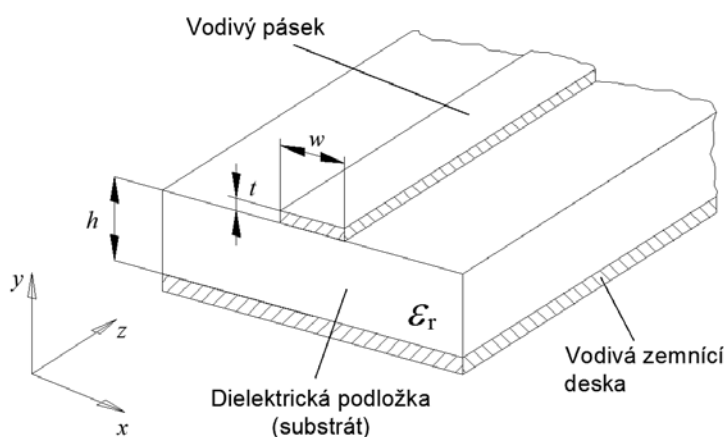
Štěrbínové vedení (Obr. 11) je stejně jako koplanární třívodičové vedení tvořeno jednostranně pokoveným dielektrikem. V současné době je štěrbínové vedení nejpoužívanějším typem koplanárního vedení, zejména pak v kombinaci s nesymetrickým mikropáskovým vedením [1].



Obr. 11: Štěrbínové vedení

3 Nesymetrické mikropáskové vedení

Toto vedení patří v technice hybridních mikrovlnných integrovaných obvodů mezi nejčastěji užívaný typ. Z Obr. 12 je zřejmé, že jde v podstatě o klasické nesymetrické páskové vedení vytvořené na dielektrickém substrátu s relativní permitivitou $\epsilon_r > 1$. Toto mikropáskové vedení je tedy příčně nehomogenní, neboť obsahuje ve svém příčném průřezu dvě různá prostředí, a to pevné dielektrikum s $\epsilon_r > 1$ a vzduch s $\epsilon_r = 1$. Příčná nehomogenost nesymetrického mikropáskového vedení značně komplikuje jeho analýzu.



Obr. 12: Nesymetrické mikropáskové vedení

V příčně nehomogenním vedení nemůže existovat čistá vlna TEM a nemohou se v něm samostatně šířit ani vidy TE nebo TM. Tyto dílčí vlny totiž nesplňují samostatně okrajové podmínky na povrchu pásku a na rozhraní dielektrický substrát – vzduch (spojitost tečných složek intenzit elektrického a magnetického pole). Okrajovým podmínkám vyhovuje pouze superpozice vln TE a TM, tedy tzv. hybridní vlny (vlny HEM), mající podélnou složku elektrického i magnetického pole. Složky polí nemohou být proto odvozeny z jediné vlnové rovnice, ale z tolika rovnic, kolik různých dielektrik je obsaženo v příčném průřezu vedení. Vlnové rovnice pro potenciální funkce T_E a T_H budou mít nyní různou podobu v různých oblastech nesymetrického mikropáskového vedení. Bez rozlišení indexů E a H můžeme psát pro vzduch

$$\Delta T + k_0^2 \cdot T = 0 \quad (1)$$

a pro substrát

$$\Delta T + \epsilon_r \cdot k_0^2 \cdot T = 0, \quad (2)$$

kde k_0 je vlnové číslo vzduchového prostoru dané rovnicí

$$k_0 = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0} \quad (3)$$

a $T = T_1 \cdot T_2$, přičemž funkce podélné souřadnice $T_2(z)$ bude i v tomto případě dána vztahem

$$T_2(z) = T_2^+(z) + T_2^-(z) = C_1 \cdot e^{-\gamma z} + C_2 \cdot e^{\gamma z}, \quad (4)$$

který popisuje vlnový charakter elektromagnetického pole ve vlnovodu v podélném směru, kde C_1 a C_2 jsou integrační konstanty a $\gamma = \alpha + j\beta$ je konstanta šíření v podélném směru. Konstanta šíření v podélném směru γ je stejná pro oblast substrátu i pro vzduchové prostředí. Elektromagnetická vlna musí totiž v celém příčném průřezu vedení (v substrátu i nad ním) postupovat stejnou rychlostí. Jen tak mohou být pro libovolnou souřadnici z , stále splněny okrajové podmínky na povrchu substrátu (rovnost tečných složek). Je-li γ pro obě prostředí stejná, musí se mezní vlnové číslo Γ pro obě části vedení naopak lišit. Funkce příčných souřadnic T_1 vyhovuje tedy dvěma rovnicím

$$\Delta T_1 + \Gamma_0 \cdot T_1 = 0 \text{ ve vzduchu} \quad (5)$$

a

$$\Delta T_1 + \Gamma_d \cdot T_1 = 0 \text{ v substrátu,} \quad (6)$$

kde $\Gamma_0^2 = k_0^2 + \gamma^2$ a $\Gamma_d^2 = \varepsilon_r \cdot k_0^2 + \gamma^2$.

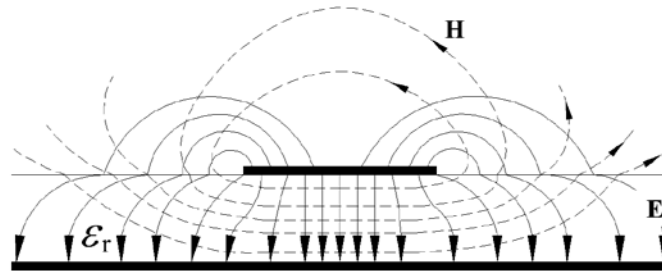
Přesné analytické řešení předchozích vlnových rovnic při splnění příslušných okrajových podmínek je velmi obtížné a lze je provést jen numericky. Je to způsobeno obtížemi při vhodné formulaci okrajových podmínek a nutností uvažovat hybridní vlny, tedy celkové elektromagnetické pole.

Existují dva mezní případy, kdy se řešení naznačeného problému výrazně zjednoduší. Při $\varepsilon_r = 1$ jsou rovnice (1), (2) totožné a dostáváme příčně homogenní nesymetrické páskové vedení se vzduchovým dielektrikem. Řešením nejnižšího řádu rovnic (5), (6) je vlna TEM s $\Gamma_0 = \Gamma_d = 0$. Funkce T_1 splňuje Laplaceovu rovnici a v podélném směru nevznikají složky elektrického ani magnetického pole. Druhým mezním případem je mikropáskové vedení vytvořené na dielektrickém substrátu s velmi vysokou hodnotou relativní permitivity. Při $\varepsilon_r \rightarrow \infty$ je celé elektromagnetické pole soustředěno v substrátu mezi pásky a vůbec neproniká do okolního prostředí. Takové vedení je příčně homogenní, přičemž permitivita prostředí je dána permitivitou substrátu a je tedy velmi vysoká. Elektromagnetické pole je pak popsáno vztahy (2) a (6).

Ve skutečných případech je permitivita substrátu $\varepsilon_r > 1$ a nabývá pouze konečné hodnoty. Vlnové rovnice (1), (2), (5) a (6) lze pak přibližně chápat jako určitou poruchu některého z uvedených stavů. Porucha vůči stavu $\varepsilon_r = 1$ je malá zejména na relativně nízkých kmitočtech, kdy je vlnové číslo k_0 malé. Tato situace nastává na takových kmitočtech, pro něž jsou příčné rozměry substrátu i vodivých pásek mnohem menší než polovina vlnové délky v dielektriku. V těchto případech lze vlastnosti vedení vyšetřovat pomocí tzv. kvazi-TEM aproximace. Podélné složky elektrického a magnetického pole vlny HEM jsou za těchto podmínek zanedbatelně malé ve srovnání s velikostmi příčných složek pole. Na vedení pak pohlížíme jako na vedení s vlnou TEM, přičemž přibližnost takového modelu vyjadřujeme tím, že říkáme, že v mikropáskovém nesymetrickém vedení se šíří vlna kvazi-TEM. Důsledkem přibližnosti aproximace kvazi-TEM je omezení platnosti výsledků pouze na kmitočtové pásmo, kde jsou podmínky pro tuto aproximaci dostatečně splněny, tj. disperze vln a kmitočtová závislost charakteristické impedance vedení jsou zanedbatelně malé. Přesnost aproximace kvazi-TEM lze na vyšších kmitočtech

zlepšit užitím substrátu s vysokou hodnotou ϵ_r . Tím se vlastně přibližujeme druhému meznímu případu homogenního vedení s vlnou TEM. Čím vyšší bude hodnota ϵ_r , tím větší část elektromagnetického pole bude soustředěna v substrátu a tím přesnější bude koncepce vlny kvazi-TEM.

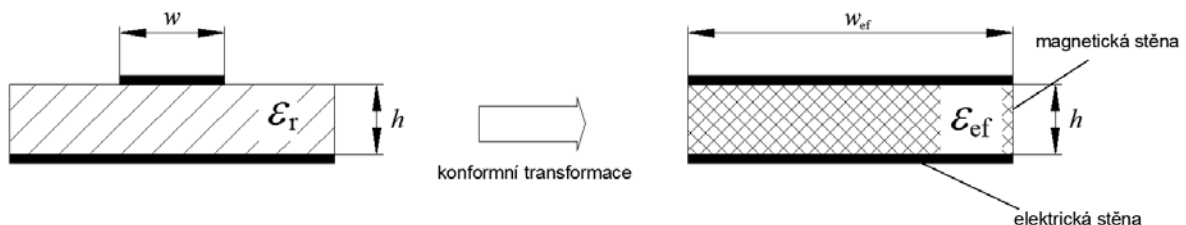
Přiblížení kvazi-TEM se pro řešení příčně nehomogenních mikropáskových vedení v praxi běžně používá, neboť poskytuje poměrně jednoduché a přitom dostatečně přesné výsledky jak pro analýzu, tak i syntézu [1].



Obr. 13: Průběh siločar vidu kvazi-TEM v příčném řezu

3.1 Efektivní šířka nesymetrického mikropáskového vedení

Přesné konformní zobrazení vyřešil Schneider pomocí Schwarzova-Christoffelova integrálu. Rozměry obrazu vedení v rovině z_1 jsou vyjádřeny pomocí úplných eliptických integrálů, Jacobiho eliptických funkcí a tzv. theta funkcí. To je pro technickou praxi nevhodné, proti bylo přesné řešení aproximováno přibližnými vztahy předpokládajícími $t = 0$ [2].



Obr. 14: Konformní zobrazení nesymetrického mikropáskového vedení

Například aproximací přesných vztahů Schneider určil [2]

$$w_{\text{ef}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\ln\left(\frac{8 \cdot h}{w} + \frac{w}{4 \cdot h}\right)} \quad \text{pro úzké vedení } w/h \leq 1, \quad (7)$$

$$w_{\text{ef}} = w + 2,42 \cdot h - 0,44 \cdot \frac{h^2}{w} + h \cdot \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6 \quad \text{pro široké vedení } w/h \geq 1. \quad (8)$$

Chyba aproximace je $\pm 0,25 \%$ pro $w/h < 10$ a $\pm 1 \%$ pro $w/h > 10$. Wheeler podle [2] udává

$$w_{\text{ef}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h'}{\ln\left(\frac{8 \cdot h'}{w}\right)}, \quad h' = h \cdot \left(1 + \frac{w^2}{32 \cdot h^2}\right) \quad \text{pro úzké vedení } w/h \leq 1, \quad (9)$$

$$w_{\text{ef}} = w + \frac{2 \cdot h}{\pi} \cdot \ln\left[17,08 \cdot \left(\frac{w}{2 \cdot h} + 0,85\right)\right] \quad \text{pro široké vedení } w/h \geq 1. \quad (10)$$

3.2 Vliv konečné tloušťky horního pásku

Vliv nenulové tloušťky pokovení $t > 0$ se respektuje ekvivalentním rozšířením pásku z hodnoty w na hodnotu

$$w' = w + \Delta w. \quad (11)$$

Pro korekci Δw se uvádí vztahy

$$\Delta w = 1,25 \cdot \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{2 \cdot h}{t}\right) \quad \text{pro } w/h \geq \frac{1}{2 \cdot \pi}, \quad (12)$$

$$\Delta w = 1,25 \cdot \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{4 \cdot \pi \cdot w}{t}\right) \quad \text{pro } w/h \leq \frac{1}{2 \cdot \pi}. \quad (13)$$

Do všech vztahů pro w_{ef} a dalších se místo w dosazuje korigovaná hodnota w' [2].

3.3 Efektivní permitivita

Při konformním zobrazení (Obr. 14) se rozhraní dielektrikum – vzduch v rovině z transformuje do roviny z_1 a v dielektriku deskového kondenzátoru vytvoří vzduchovou bublinu, která sníží hodnotu relativní permitivity z ε_r na ε_{ref} . Relativní hodnota efektivní permitivity nesymetrického mikropáskového vedení může nabývat pouze hodnot

$$\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \leq \varepsilon_{\text{ref}} \leq \varepsilon_r. \quad (14)$$

Wheeler zavedl koeficient plnění q jako podíl plochy zaplněné dielektrikem a podíl celkové plochy příčného průřezu vedení v rovině z_1 . Pro ε_{ref} pak platí vztah

$$\varepsilon_{\text{ref}} = 1 + q \cdot (\varepsilon_r - 1). \quad (15)$$

Výpočet ε_{ref} - Wheelerův vztah

$$\varepsilon_{\text{ref}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\ln \frac{8 \cdot h}{w}} \quad \text{pro úzké vedení } w/h \leq 1, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\text{ref}} = \varepsilon_r - \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{\ln \left[6,28 \cdot \left(\frac{w}{2 \cdot h} + 0,85 \right) \right]}{\frac{w}{h} + \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w}{2 \cdot h} + 0,85 \right) \right]} \quad \text{pro široké vedení } w/h \geq 1. \quad (17)$$

Pro výpočet efektivní permitivity je možné využít i jiné vztahy – Schneider, Hammerstad [4].

3.4 Charakteristická impedance

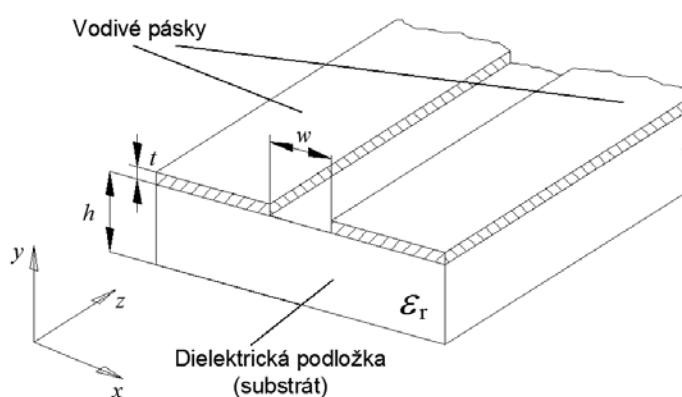
Charakteristická impedance (někdy je také udávána jako vlnová impedance, nebo vlnový odpor) nesymetrického mikropáskového vedení je rovna charakteristické impedanci jeho konformního obrazu v rovině z_1 . To plyne z matematických vlastností konformního zobrazení, kdy měrné kapacity (a tedy i charakteristické impedance) konformně sdružených obrazů jsou stejné, tj. jsou vůči konformní transformaci invariantní. Je určena vztahem

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ref}}}} \cdot \frac{h}{w_{\text{ef}}}, \quad (18)$$

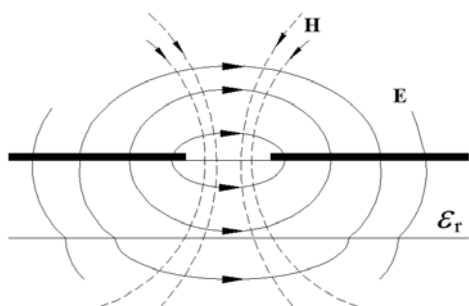
kde ε_{ref} a w_{ef} jsou dány vztahy (7) až (10) a (16), (17) nebo jejich dalšími ekvivalenty [4].

4 Štěrbinové vedení

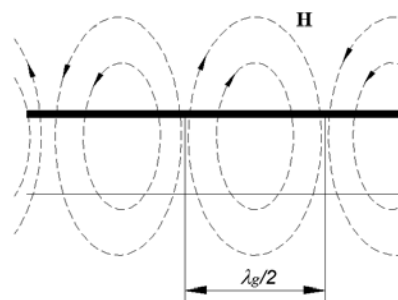
Struktura štěrbinového vedení (Obr. 15) umožňuje šíření téměř TE vlny, přesněji je to však HEM vlna, $H_z \neq 0$. Geometrické uspořádání elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení je naznačeno na Obr. 16 a Obr. 17. V příčné rovině na Obr. 16 odpovídá průběh siločar vidu kvazi-TEM. Víme, že siločáry magnetického pole musí být uzavřeny. Podélný pohled na Obr. 17 ukazuje, že při vysokých frekvencích se siločáry magnetického pole ve vzduchu nad a pod štěrbinou zakřívují a vracejí se zpět ke štěrbině. To se opakuje v intervalech $\lambda_g/2$. Zde se tedy nejedná již ani přibližně o vlnu kvazi-TEM, neboť tu vždy existují podélné složky magnetického pole. Důsledkem toho je, že vlna šířící se podél štěrbinového vedení má elipticky polarizovanou magnetickou složku, což lze technicky využít ke konstrukci feritových nerezipročních obvodů. Aproximace kvazi-TEM je proto u štěrbinového vedení jen velmi hrubým orientačním přiblížením. Čáry vodivých proudů na páscích po obou stranách štěrbině jsou zobrazeny na Obr. 18. Hustota vodivých proudů je největší podél štěrbině a rychle se zmenšuje s rostoucí vzdáleností od štěrbině. Proudové čáry se uzavírají přes štěrbinu, a to formou posuvných (dielektrických) proudů i_p [1].



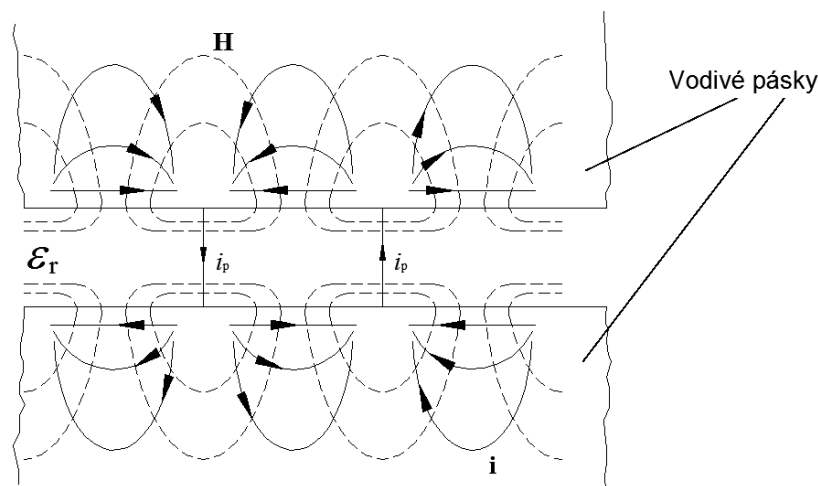
Obr. 15: Štěrbinové vedení



Obr. 16: Rozložení elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení



Obr. 17: Rozložení elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení – podélný pohled



Obr. 18: Rozložení elektromagnetického pole ve štěrbinovém vedení – horní pohled

4.1 Vliv konečné tloušťky pásků

Vztahy pro korekci v důsledku $t > 0$ zatím nebyly publikovány. S rostoucí tloušťkou t klesá efektivní permitivita ϵ_{ref} , roste velikost vlnové délky λ_g a klesá charakteristická impedance Z_0 . Změna proti $t = 0$ je při tloušťkách $5 \div 10 \mu\text{m}$ cca 5 % [2].

4.2 Efektivní permitivita

Relativní hodnota efektivní permitivity štěrbinového vedení je dána následujícím vztahem [2]

$$\epsilon_{\text{ref}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}. \quad (19)$$

4.3 Charakteristická impedance

Charakteristická impedance štěrbinového vedení je určena pomocí vztahu

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}}} \cdot \frac{K(k)}{K'(k)}, \quad (20)$$

kde

$$k = \text{tgh} \left(\frac{\pi \cdot w}{4 \cdot h} \right). \quad (21)$$

Zde $K(k)$ je úplný eliptický integrál I. druhu

$$K(k) = \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{(1-x^2) \cdot (1-k^2x^2)}} \quad (22)$$

a $K'(k)$ je doplňkový úplný eliptický integrál I. druhu

$$K(k) = K(\sqrt{1-k^2}) = K(k'). \quad (23)$$

Aproximace podílu eliptických integrálů je pak

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}}\right)} \quad \text{pro } 0 \leq k \leq 0,707, \quad (24)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right) \quad \text{pro } 0,707 \leq k \leq 1. \quad (25)$$

Výsledky výpočtu Z_0 jsou vždy o 10 ÷ 30 % větší než správné hodnoty [2].

4.4 Aproximace přesného řešení

Přesným numerickým řešením rozložení pole ve šterbinovém vedení se zabývala řada autorů při využití různých numerických metod. Žádná však nevede k výrazům v uzavřeném tvaru vhodným pro výpočet Z_0 a λ_g v technické praxi [2].

Garg a Gupta odvodili aproximační vztahy vycházející z numerického řešení, které navrhl Cohn [2].

Pro $0,02 \leq w/h \leq 0,2$:

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ref}}}} = 0,923 - 0,448 \cdot \log \varepsilon_r + 0,2 \cdot \frac{w}{h} - \left(0,29 \cdot \frac{w}{h} + 0,017\right) \cdot \log\left(100 \cdot \frac{h}{\lambda_0}\right), \quad (26)$$

$$\begin{aligned} Z_0 = & 72,62 - 35,19 \cdot \log \varepsilon_r + 50 \cdot \frac{h}{w} \cdot \left(\frac{w}{h} - 0,02\right) \cdot \left(\frac{w}{h} - 0,1\right) + \log\left(100 \cdot \frac{w}{h}\right) \cdot \\ & \cdot (44,28 - 19,58 \cdot \log \varepsilon_r) - \left[0,32 \cdot \log \varepsilon_r - 0,11 + \frac{w}{h} \cdot (1,07 \cdot \log \varepsilon_r + 1,44)\right] \cdot \\ & \cdot \left(1,4 - 6,07 \cdot \log \varepsilon_r - 100 \cdot \frac{h}{\lambda_0}\right)^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Pro $0,2 \leq w/h \leq 1$:

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ref}}}} = 0,987 - 0,483 \cdot \log \varepsilon_r + \frac{w}{h} \cdot (0,111 - 0,0022 \cdot \varepsilon_r) - \left(0,121 + 0,094 \cdot \frac{w}{h} - 0,0032 \cdot \varepsilon_r \right) \cdot \log \left(100 \cdot \frac{h}{\lambda_0} \right) \quad (28)$$

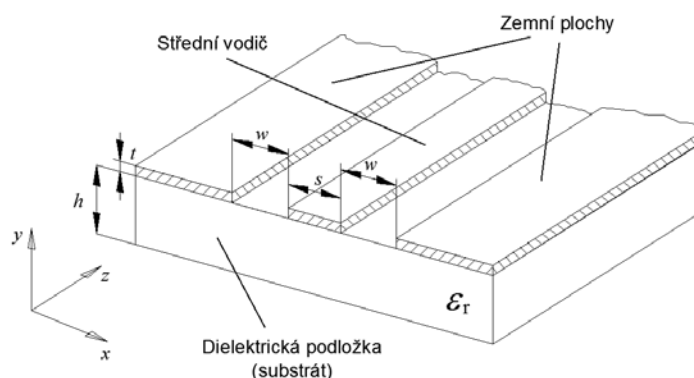
$$Z_0 = 113,19 - 53,55 \cdot \log \varepsilon_r + 1,25 \cdot \frac{h}{w} \cdot (114,59 - 51,58 \cdot \log \varepsilon_r) + 20 \cdot \left(\frac{w}{h} - 0,2 \right) \cdot \left(1 - \frac{w}{h} \right) - \left[0,15 + 0,23 \cdot \log \varepsilon_r + \frac{w}{h} \cdot (-0,79 + 2,07 \cdot \log \varepsilon_r) \right] \cdot \left[10,25 - 5 \cdot \log \varepsilon_r + \frac{w}{h} \cdot (2,1 - 1,42 \cdot \log \varepsilon_r) - 100 \cdot \frac{h}{\lambda_0} \right]^2 \quad (29)$$

Oba vztahy mají chybu $< 2 \%$ pro:

$$9,7 \leq \varepsilon_r \leq 20; 0,02 \leq w/h \leq 1 \text{ a } 0,01 \leq h/\lambda_0 \leq \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_r - 1}}.$$

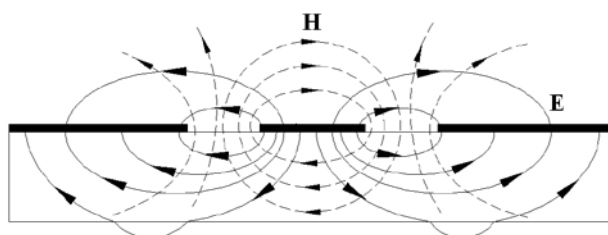
5 Koplanární třívodičové vedení

Koplanární třívodičové vedení, v některé literatuře uváděné také jako koplanární vlnovod bylo navrženo roku 1969 Američanem Chen P. Wenem. Struktura vedení je zřejmá z (Obr. 19).



Obr. 19: Koplanární třívodičové vedení

Vlastní vedení je umístěno na dielektrickém substrátu a je tvořeno středovým páskem o šířce s a dvěma štěrbinami w , za kterými se nalézají zemní plochy. Šířka zemních ploch na obou stranách vedení by měla být pro potlačení vyšších módů cca $5 \times$ větší než $s + 2w$ a $s + 2w < \lambda/2$. Dominantním videm v tomto vedení je vid HEM, na nízkých kmitočtech se využívá aproximace kvazi-TEM. Průběh elektrického a magnetického pole je znázorněn na (Obr. 20). Na vyšších frekvencích přestává mít způsob šíření pole v koplanárním třívodičovém charakter TEM, protože zde existují podélné složky magnetického pole. V takovém případě má vlna šířící se na štěrbinách elipticky polarizovanou magnetickou složku, čehož lze využít ke konstrukci feritových nerezipročních obvodů [2], [5].



Obr. 20: Rozložení elektromagnetického pole v koplanárním třívodičovém vedení

5.1 Efektivní permitivita

Výpočet efektivní permitivity ε_{ref} vycházející z konformního zobrazení

$$\varepsilon_{\text{ref}} = 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{K(k') \cdot K(k_1)}{K(k) \cdot K(k_1')}, \quad (30)$$

kde

$$k = \frac{s}{(s + 2 \cdot w)}, \quad k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}, \quad k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot s}{4 \cdot h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot (s + 2 \cdot w)}{4 \cdot h}\right)}$$

Tento vztah nemá omezení pro ε_r a platí pro $1,25 \leq (s + 2w)/w \leq 10$, $(s + 2w)/h \leq 20$ a $t = 0$.

Má-li substrát konečnou tloušťku h , vznikne v konformním zobrazení koplanární struktury vzduchová bublina. Efektivní permitivitu je pak nutné řešit pomocí numerických metod [2], [4].

5.2 Vliv konečné tloušťky horního pásku

Podobně jako u mikropáskového vedení se i zde respektuje vliv konečné tloušťky $t > 0$ ekvivalentní změnou šířky středního pásku s a obou mezer w .

$$s_{\text{ef}} = s + \Delta, \quad w_{\text{ef}} = w - \Delta \quad (31)$$

$$\Delta = \frac{1,25}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \frac{t}{\pi} \cdot \left(\ln \frac{4\pi s}{t} + 1 \right). \quad (32)$$

Do všech výpočetních vztahů se pak místo s a w dosazují korigované hodnoty s_{ef} a w_{ef} [2], [4].

5.3 Charakteristická impedance

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ref}}}} \cdot \frac{K'(k)}{K(k)} \quad (33)$$

Pro výpočet podílu eliptických integrálů lze použít aproximaci (25) [2], [4].

6 Simulace

V následujících podkapitolách budou uvedeny simulace dříve popsaných planárních vedení – nesymetrické mikropáskové vedení, štěrbinové vedení a koplanární třívodičové vedení. Všechna vybraná vedení budeme modelovat v prostředí COMSOL Multiphysics ve 2D prostředí a modulu RF.

Všechna vedení jsou navržena pro přizpůsobení impedancí 50Ω . K návrhu vedení lze využít vzorců popsaných v podkapitole 3.1 až podkapitole 3.4 pro nesymetrické mikropáskové vedení, podkapitole 4.1 až podkapitole 4.4 pro štěrbinové vedení a podkapitole 5.1 až podkapitole 5.3 pro koplanární třívodičové vedení, nebo je možné použít některý z mnoha dostupných kalkulátorů určených pro návrh těchto vedení, což návrh vedení značně usnadní. V této práci bylo využito volně dostupného návrhového programu TXLine Calculator 2003 společnosti AWR.

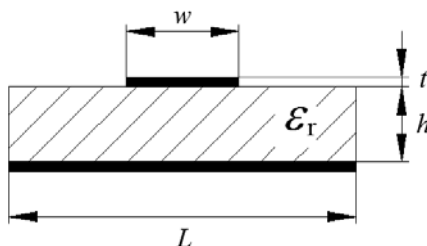
Pro všechna vedení budeme uvažovat, že jsou vyrobená na polovodičovém substrátu z GaAs s relativní permitivitou $\epsilon_r = 12,8$, měrnou elektrickou vodivostí σ závislou na frekvenci

$$\sigma = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (34)$$

a ztrátovým činitelem $\operatorname{tg} \delta = 0,006$ [6]. Mikropásky o tloušťce $t = 4 \mu\text{m}$ jsou vyrobeny ze zlata s měrnou elektrickou vodivostí $\sigma = 4,1 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ [3]. Všechny simulace budou probíhat v rozsahu frekvencí $f = (1 \div 100) \text{ GHz}$.

6.1 Nesymetrické mikropáskové vedení

Jako první je nutné určit rozměry samotného vedení. Z návrhového programu TXLine Calculator 2003 získáme rozměry vedení. Pro vstupní impedanci 50Ω odpovídají rozměry: šířka mikropásku $w = 70 \mu\text{m}$; výška dielektrického substrátu $h = 0,1 \text{ mm}$; šířka substrátu $L = 1 \text{ mm}$.



Obr. 21: Nesymetrické mikropáskové vedení – rozměry

V grafickém prostředí COMSOL byl nejprve ze získaných rozměrů nakreslen průřez modelovaného mikropáskového vedení (Obr. 22). Program COMSOL používá k řešení zadaného problému metodu konečných prvků, a proto není možné analyzovat uzavřené struktury. Z tohoto důvodu byl model uzavřen do stínícího vlnovodu, který obklopuje analyzovanou oblast. Velikost stínícího vlnovodu byla zvolena alespoň desetinásobek tloušťky substrátu, zde tedy $1 \times 1 \text{ mm}^2$ [3].

Dalším krokem bylo nastavení materiálových vlastností subdomén (oblastí), kde byla zvolené doméně substrátu přiřazena relativní permitivita $\epsilon_r = 12,8$ a měrná elektrická vodivost vyjádřená jako proměnná pomocí vzorce (34). Doméně mikropásku byla přiřazena měrná elektrická vodivost charakteristická pro zlato $\sigma = 4,1 \cdot 10^7$ S/m. Na celé oblasti modelu budeme řešit vlnovou rovnici ve tvaru

$$\nabla \cdot (\mu_r^{-1} \nabla \cdot \mathbf{E}) - (\epsilon_r - j\sigma / \omega \epsilon_0) \cdot k_0^2 \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (35)$$

Dále budeme pokračovat nastavením okrajových podmínek, kde byla všem obrysovým hranicím stínícího vlnovodu přiřazena podmínka typu dokonalý elektrický vodič (perfect electric conductor – PEC) formulovaná jako

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (36)$$

a vnitřním hranicím podmínka spojitosti pole

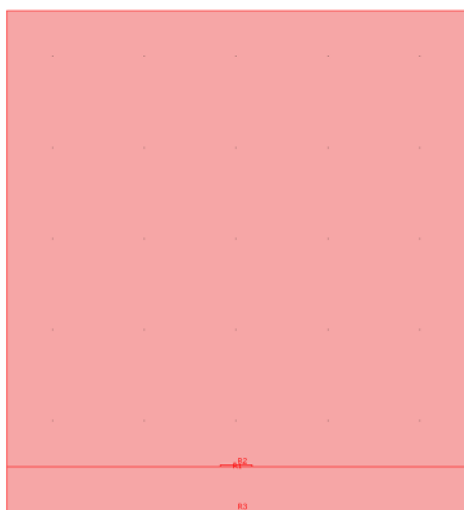
$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0, \quad \mathbf{n} \cdot (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0, \quad (37)$$

kde index u vektorů pole značí příslušnost k jednotlivým sousedícím doménám.

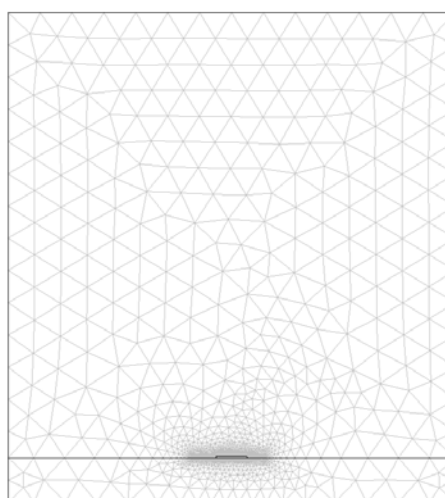
Tím byly všechny okrajové podmínky nastaveny a může následovat simulace. Před spuštěním samotné simulace bylo nutné ještě nastavit parametry řešiče. Zde byl nastaven počet hledaných módů (pro nesymetrické mikropáskové vedení 1) a odhad fázové konstanty šíření β , která byla dosazena jako proměnná ze vzorce

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{ref}}} \cdot f, \quad (38)$$

kde ϵ_{ref} je relativní efektivní permitivita, kterou lze pro jednotlivá vedení určit pomocí vzorců (16), (19) a (30), nebo použít program TXLine Calculator 2003.



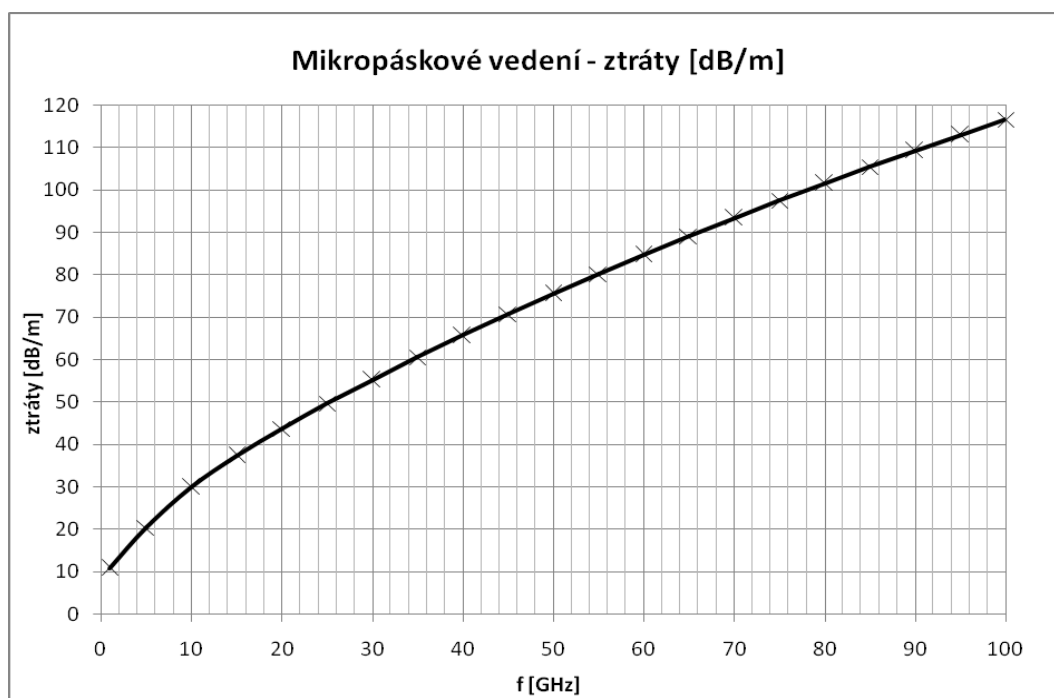
Obr. 22: Profil modelovaného mikropáskového vedení



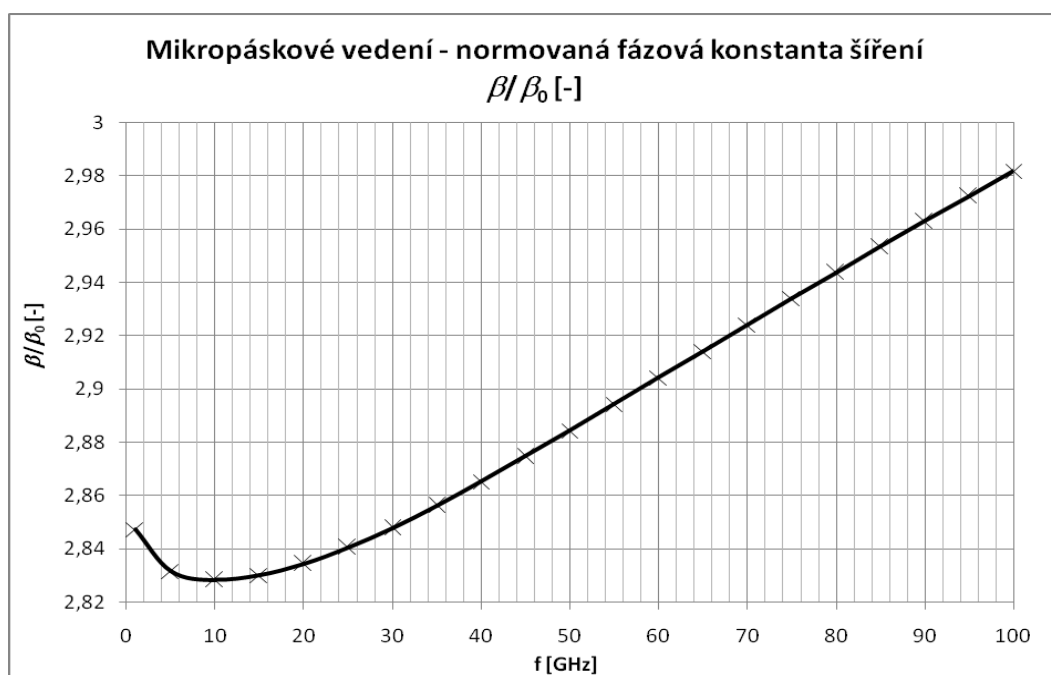
Obr. 23: Vygenerovaná síť konečných prvků

Poté bylo zadáno vytvoření automaticky generované sítě konečných prvků (Obr. 23). Pouze u samotného mikropásku byla pro přesnější výpočet sítě zjemněna manuálně na hodnotu 10^{-6} m. Poté byla spuštěna samotná simulace.

V mikropásku byly dále určeny ztráty pro všechny frekvence, na kterých bylo vedení simulováno pomocí vnitřní proměnné `dampzdB_rfwv` programu COMSOL, vyjadřující měrný útlum v jednotkách dB/m. Závislost ztrát na frekvenci je uvedena v následujícím grafu (Obr. 24). Závislost normované fázové konstanty šíření na frekvenci je uvedena na Obr. 25.

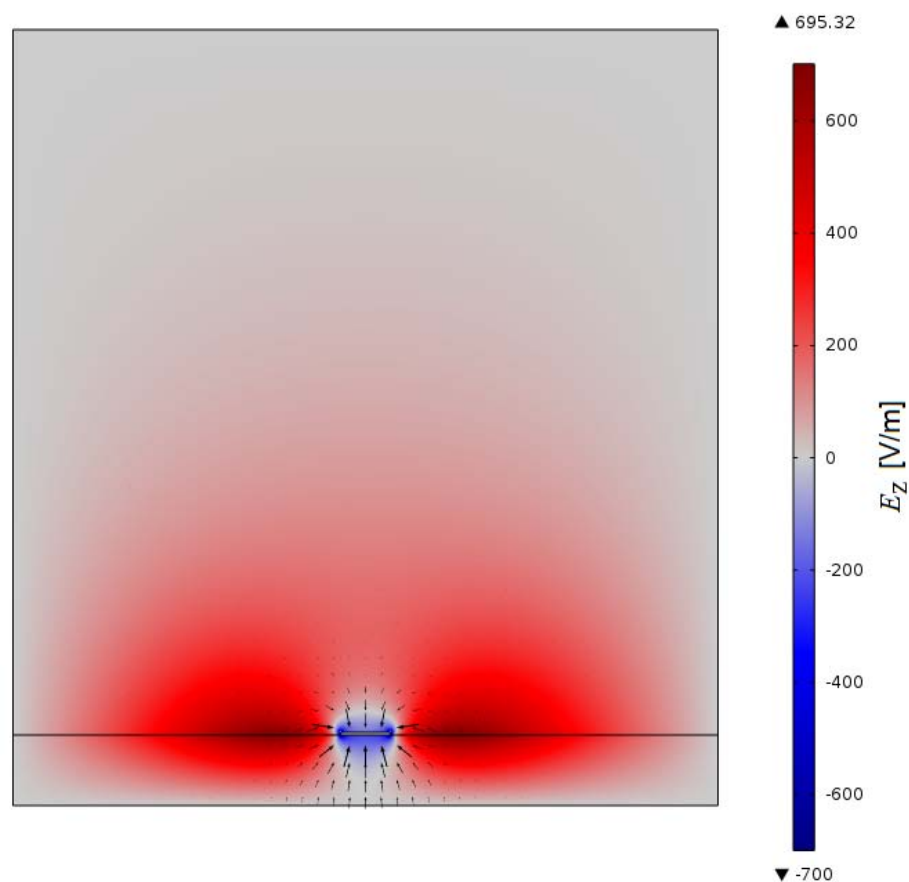


Obr. 24: Závislost ztrát v nesymetrickém mikropáskovém vedení na frekvenci



Obr. 25: Závislost normované fázové konstanty šíření v nesymetrickém mikropáskovém vedení na frekvenci

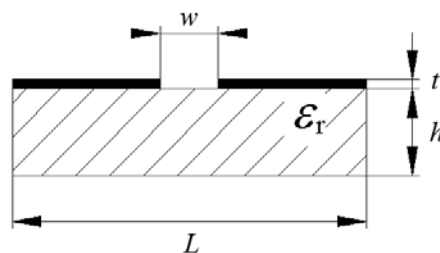
Výsledkem simulace bylo rozložení elektrického pole na nesymetrickém mikropáskovém vedení (Obr. 26), ve kterém je zobrazena barevnou škálou jeho složka E_z kolmá k nákresně a šipkami vektorové pole se složkami E_x a E_y .



Obr. 26: Rozložení elektrického pole v průřezu mikropáskového vedení na frekvenci 50 GHz

6.2 Štěrbínové vedení

Při návrhu štěrbinového vedení se postupuje obdobně jako v předchozí kapitole. Opět je nutné určit rozměry samotného vedení, které získáme z návrhového programu TXLine Calculator 2003. Pro impedanci 50Ω odpovídají rozměry: šířka štěrbiny $w = 87 \mu\text{m}$; výška dielektrického substrátu $h = 0,635 \text{ mm}$; šířka substrátu $L = 1 \text{ mm}$.



Obr. 27: Štěrbínové vedení – rozměry

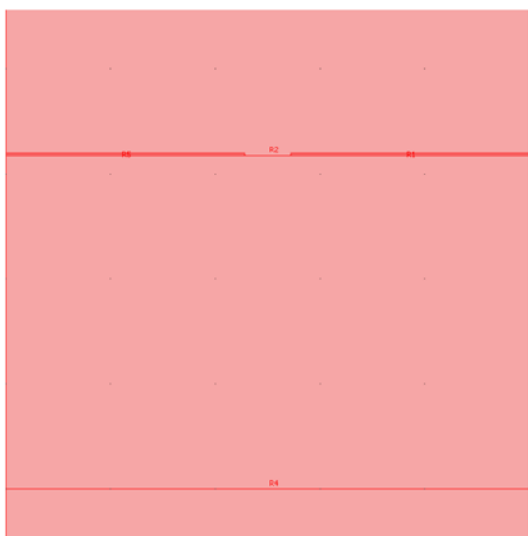
V grafickém prostředí COMSOL byl ze získaných rozměrů nakreslen průřez modelovaného štěrbinového vedení (Obr. 28), umístěný do stínícího vlnovodu, který uzavírá analyzovanou oblast. Velikost stínícího vlnovodu byla zvolena $6 \times 6 \text{ mm}^2$, simulacemi bylo ale zjištěno, že stínící vlnovod pro simulaci tohoto vedení může mít rozměry menší, konkrétně byly použity rozměry $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Vzhledem k tomu, že u štěrbinového vedení neexistuje zemní rovina substrátu, bylo nutné tento stínící vlnovod použít i na spodní straně vedení.

Dalším krokem bylo nastavení materiálových vlastností subdomén. Postup je podobný jako v kapitole 6.1, pouze při nastavování okrajových podmínek, byla všem obrysovým hranicím stínícího vlnovodu přiřazena podmínka typu dokonalý magnetický vodič (Perfect Magnetic Conductor) s rovnicí

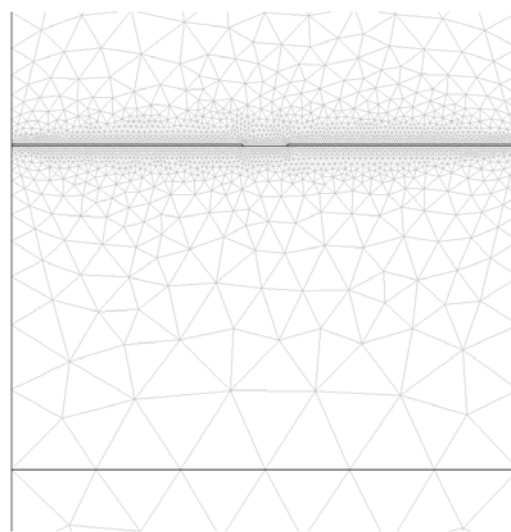
$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{H} = 0. \quad (39)$$

V nastavení parametrů řešiče, byl nastaven počet hledaných módů (na vyšších frekvencích až 8, většina těchto módů je ale nepodstatná, což bylo dáno zřejmě vlivem vlastností stínícího vlnovodu) a fázová konstanta šíření β dosazená jako proměnná ze vzorce (38).

Poté bylo zadáno vytvoření automaticky generované sítě konečných prvků (Obr. 29). U obou mikropásků byl pro přesnější výpočet zjemněna síť manuálně na hodnotu 10^{-5} m . Následně byla spuštěna simulace.



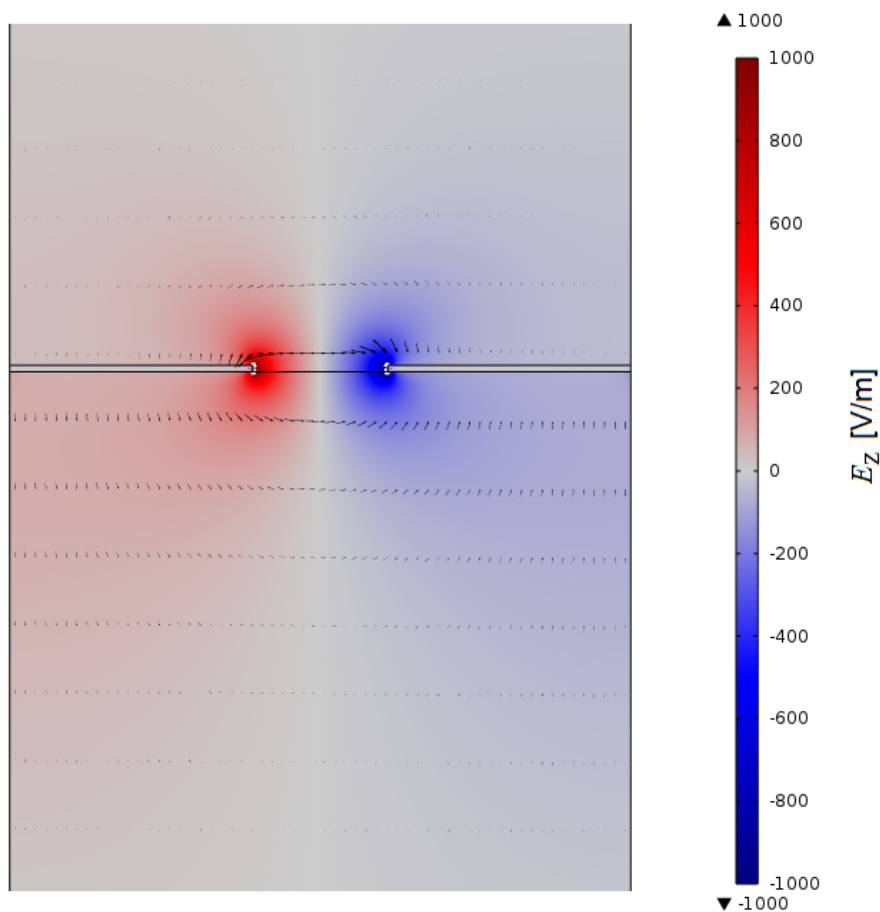
Obr. 28: Profil modelovaného štěrbinového vedení – výřez



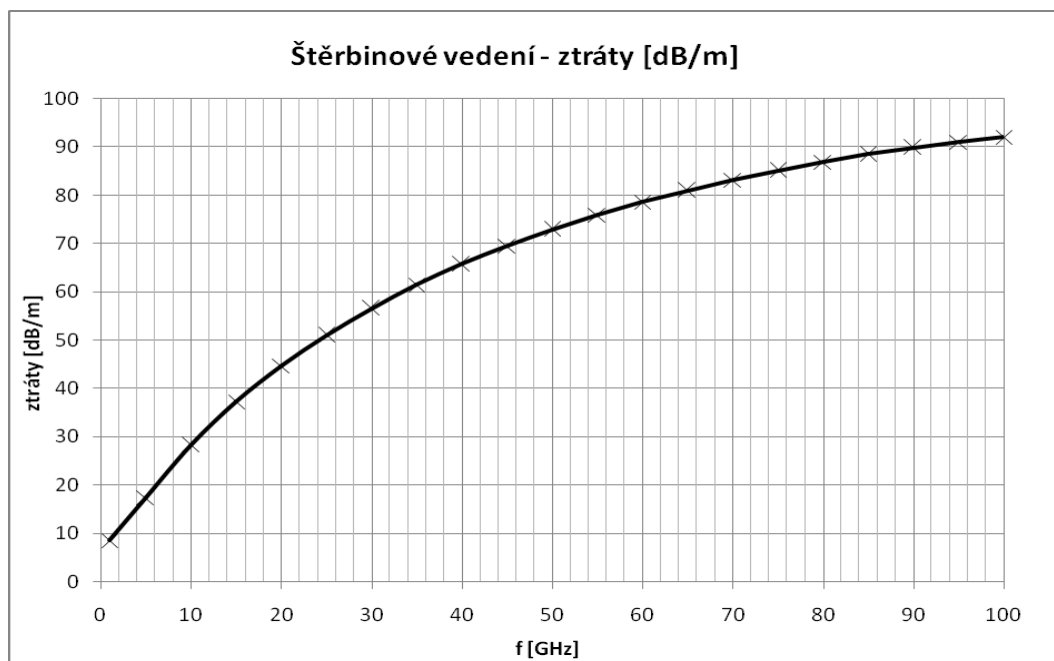
Obr. 29: Vygenerovaná síť konečných prvků – výřez

Výsledkem simulace bylo rozložení elektrického pole na štěrbinovém vedení (Obr. 30), ve kterém je zobrazena barevnou škálou jeho složka E_z kolmá k nákresně a šipkami vektorové pole se složkami E_x a E_y .

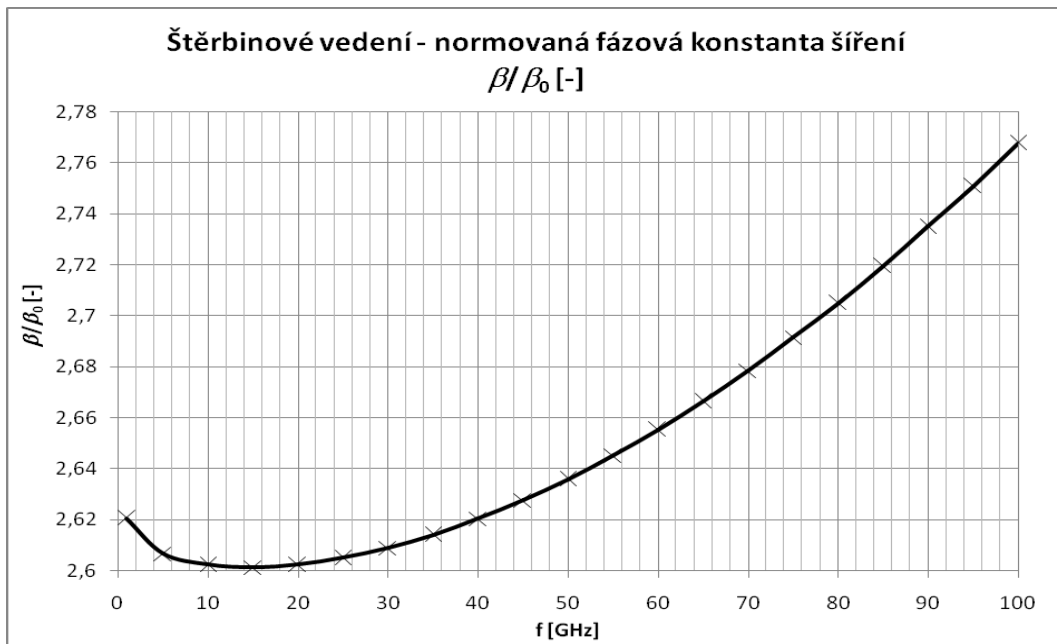
Výsledná závislost ztrát na frekvenci ve štěrbinovém vedení je uvedena v příslušném grafu (Obr. 31). Na štěrbinovém vedení byla dále odsimulována závislost normované fázové konstanty šíření na frekvenci (Obr. 32).



Obr. 30: Rozložení elektrického pole v průřezu štěrbinového vedení na frekvenci 50 GHz – výřez



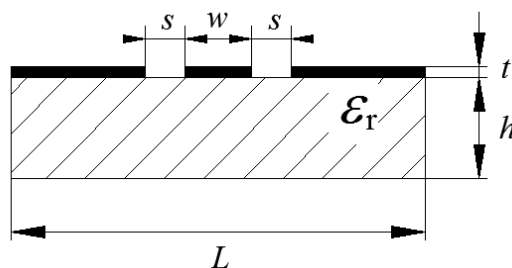
Obr. 31: Závislost ztrát ve štěrbinovém vedení na frekvenci



Obr. 32: Závislost normované fázové konstanty šíření ve štěrbinovém vedení na frekvenci

6.3 Koplanární třívodičové vedení

Při návrhu štěrbinového vedení se opět postupuje obdobně jako v předchozích kapitolách. Opět je nutné určit rozměry vedení, které získáme z návrhového programu TXLine Calculator 2003. Pro 50Ω přizpůsobení vyhovují následující rozměry: šířka středového mikropásku $w = 70 \mu\text{m}$; šířka štěrbin $s = 50 \mu\text{m}$; výška dielektrického substrátu $h = 0,1 \text{ mm}$. V praxi se pro potlačení nežádoucích vidů u koplanárních třívodičových vedení používá tzv. zkrácení substrátu, realizované prokovením v zemnicích mikropáscích podél obou štěrbin w , čehož bylo využito i při realizaci tohoto vedení. Šířka dielektrického substrátu byla z původní délky $L = 1 \text{ mm}$ zkrácena na $L = 0,410 \text{ mm}$.



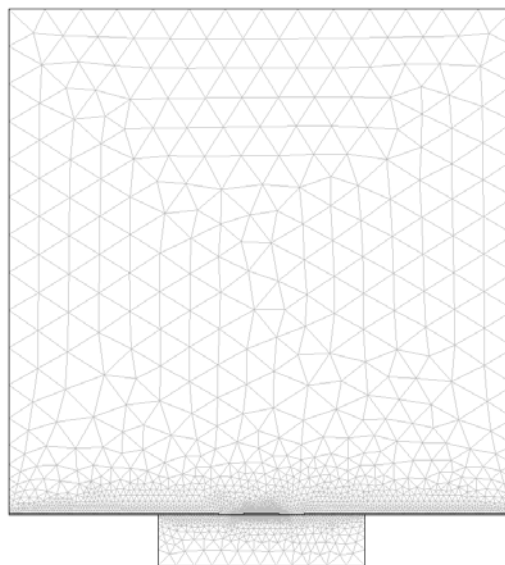
Obr. 33: Koplanární třívodičové vedení – rozměry

Ze získaných rozměrů byl nakreslen průřez modelovaného koplanárního třívodičového vedení (Obr. 34). Okolo samotného vedení byl dále vytvořen stínící vlnovod, který uzavírá analyzovanou oblast. Velikost tohoto vlnovodu byla zvolena jako desetinásobek tloušťky substrátu, v tomto případě tedy $1 \times 1 \text{ mm}^2$. I přes fakt,

že koplanární třívodičové vedení nemá zemní rovinu substrátu, nebylo nutné z důvodu zkrácení substrátu tento stínící vlnovod použít i na spodní straně vedení.



Obr. 34: Profil modelovaného koplanárního třívodičového vedení



Obr. 35: Vygenerovaná síť konečných prvků

Dalším krokem bylo nastavení materiálových vlastností subdomén. Zde se postupuje stejně v kapitole 6.2, pouze hranicím zkráceného dielektrického substrátu byla přiřazena okrajová podmínka impedance (impedance boundary condition)

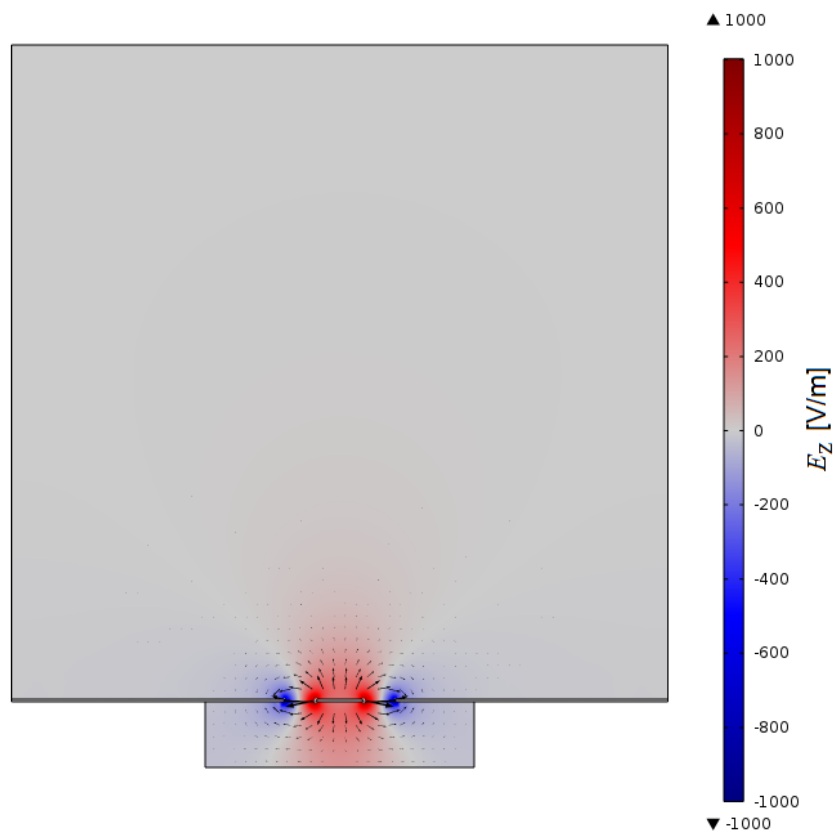
$$\mu^{\frac{1}{2}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{H} + \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) = - \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} - \mathbf{n} \cdot (\mathbf{E}_s \cdot \mathbf{n}). \quad (40)$$

Při nastavení parametrů řešiče byl nastaven počet šířících se módů (pro koplanární třívodičové vedení jsou typické 2, ale z důvodu zkrácení substrátu se na vedení v simulovaném rozsahu frekvencí objevil pouze jeden) a fázová konstanta šíření β dosazená jako proměnná ze vzorce (38).

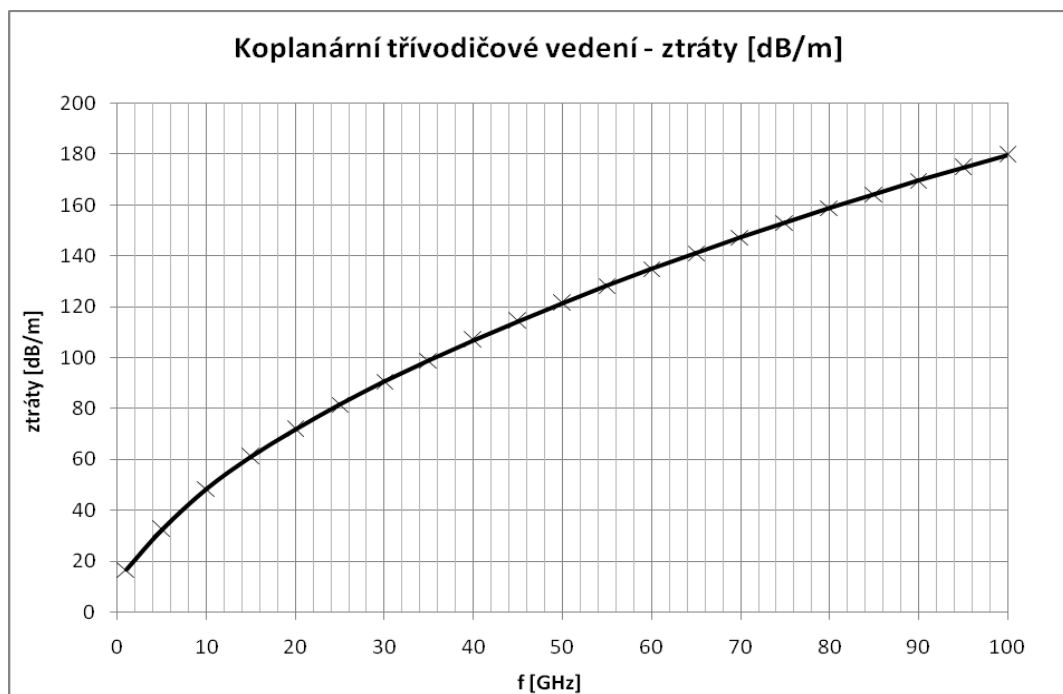
Následně bylo zadáno vytvoření sítě konečných prvků, která byla automaticky vygenerována programem COMSOL (Obr. 35). Pouze střednímu mikropásku byla pro přesnější výpočet zjemněna síť manuálně na hodnotu 10^{-6} m a byla spuštěna simulace.

Dalším krokem bylo určení ztrát v koplanárním třívodičovém vedení na všech frekvencích, na kterých bylo vedení simulováno. Závislost ztrát na frekvenci je uvedena v grafu na Obr. 37. Nakonec byla ještě odsimulována závislost fázové konstanty šíření na frekvenci. Výsledná charakteristika normované fázové konstanty šíření je uvedena na Obr. 38.

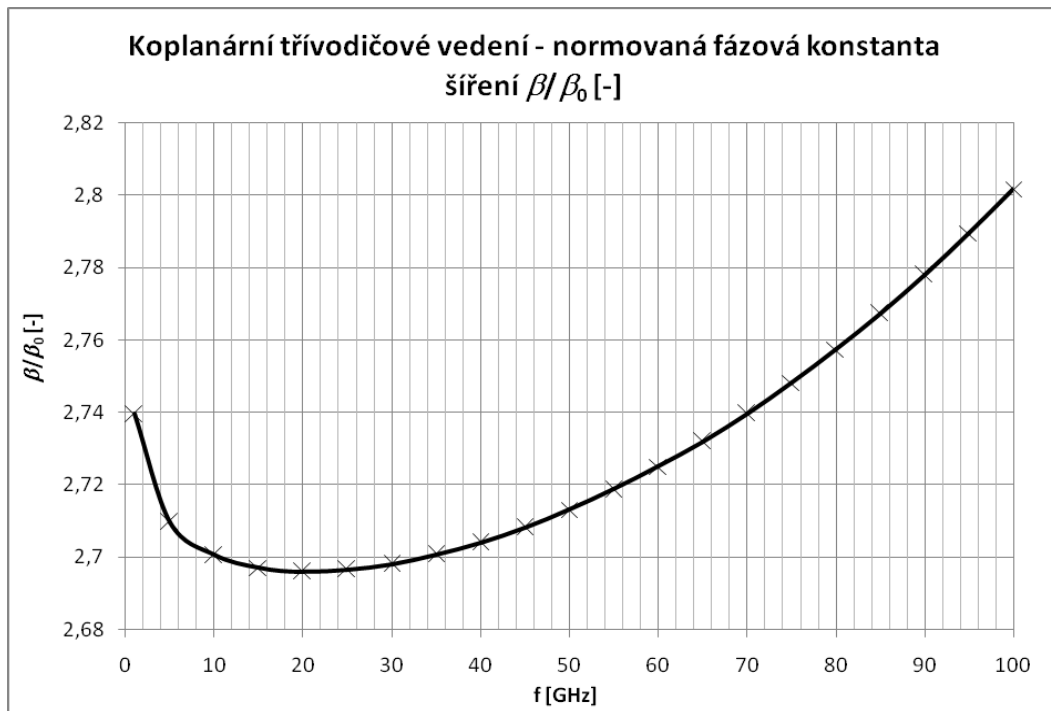
Výsledkem simulace bylo rozložení elektrického pole na koplanárním třívodičovém vedení (Obr. 36), ve kterém je zobrazena barevnou škálou jeho složka E_z kolmá k nákresně a šipkami vektorové pole se složkami E_x a E_y .



Obr. 36: Rozložení elektrického pole v průřezu štěrbinového vedení na frekvenci 50 GHz



Obr. 37: Závislost ztrát v koplanárním třívodičovém vedení na frekvenci



Obr. 38: Závislost normované fázové konstanty šíření v koplanárním třívodičovém vedení na frekvenci

7 Modelování polovodičových struktur

7.1 Základní rovnice polovodičů

Modelování polovodičových prvků a součástek v praxi představuje problém transportu částic v makroskopickém měřítku. V takovém případě uvažujeme popis pohybu nosičů náboje (např. elektronu) mezi jednotlivými interakcemi s atomovou mřížkou polovodiče Newtonovými zákony a samotné interakce popisujeme statisticky nástroji kvantové fyziky. Takový systém můžeme popsat Boltzmanovou kinetickou rovnicí, jejímž řešením je distribuční funkce nosičů náboje v objemu polovodiče. Takové řešení ale vyžaduje náročný matematický aparát, proto byla zavedena řada zjednodušení, které takový systém redukuje v jednoduchou soustavu parciálních diferenciálních rovnic (41) až (45), které tvoří matematický popis polovodičů nazývaný model driftu a difuze. Jejich forma vychází z Maxwellových rovnic, ze kterých se dají pomocí idealizujících předpokladů snadno odvodit.

$$\nabla \cdot (\nabla \Psi) = \frac{q}{\varepsilon} (n - p - C), \quad (41)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{J}_n) - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR, \quad (42)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{J}_p) + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR, \quad (43)$$

$$\mathbf{J}_n = qn\mu_n \mathbf{E} - qD_n \nabla n, \quad (44)$$

$$\mathbf{J}_p = qp\mu_p \mathbf{E} - qD_p \nabla p, \quad (45)$$

Rovnice (41) představuje Poissonovu rovnici pro elektrický potenciál Ψ , kde volná hustota náboje je rozepsána pomocí elementárního náboje q a koncentrace záporně nabitých elektronů n , koncentrace kladně nabitých děr p a koncentrace pevného náboje příměsí C . Symbol ε v této rovnici značí permitivitu použitého polovodiče.

Rovnice kontinuity (42) a (43) vyjadřují, že zřídlové oblasti proudové hustoty jsou plně kompenzovány časovou změnou volného náboje a společnou funkcí R , která vyjadřuje četnost generace a rekombinace elektronů a děr. Dále \mathbf{J}_n značí proudovou hustotu způsobenou elektrony, \mathbf{J}_p proudovou hustotu způsobenou dírami a t je čas. Vyjádření četnosti R vyžaduje dobrou znalost fyzikálních mechanismů generace a rekombinace v polovodičových materiálech a je jedním z klíčových parametrů pro získání relevantních výsledků simulací polovodičových struktur.

U obou rovnic proudových hustot (44) a (45) první člen na pravé straně představuje složku proudové hustoty způsobenou Lorenzovou silou s uvážením vlivu pouze elektrického pole \mathbf{E} (vliv magnetické indukce je zanedbán) a zavádí efektivní pohyblivost elektronů μ_n a děr μ_p , které jsou funkcí průměrné četnosti kolize nosičů, a jejich hodnota je zpravidla definována empirickými vztahy. Pohyblivost nosičů

náboje je veličina, která má velký vliv na vlastnosti polovodičových součástek, a proto je její správná formulace velmi důležitá. Druhý člen na pravé straně rovnic (44) a (45) představuje vliv difúze nosičů ve směru gradientu jejich koncentrace a zavádí Einsteinovy difúzní konstanty

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}, \quad (46)$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q}, \quad (47)$$

kde k je Boltzmanova konstanta a T je teplota [8].

7.2 Fyzikální parametry

Uvedené rovnice (41) až (45) tvoří základní rovnice umožňující analýzu a simulaci většiny polovodičových prvků. Avšak mohou nastat případy, kdy nabývají na významu fyzikální jevy, které nejsou dostatečně těmito rovnicemi podchyceny. Tak je tomu v případě tunelových proudů skrz velmi tenké vrstvy, které mají významný vliv na vlastnosti prvku. V praxi se ukázalo efektivnější aplikovat v těchto případech empirické korekce, než daný systém rovnic dále rozšiřovat.

Fyzikální parametry v těchto rovnicích definují geometrii prvku, druh polovodičového materiálu a technologii použitou při jeho výrobě [8].

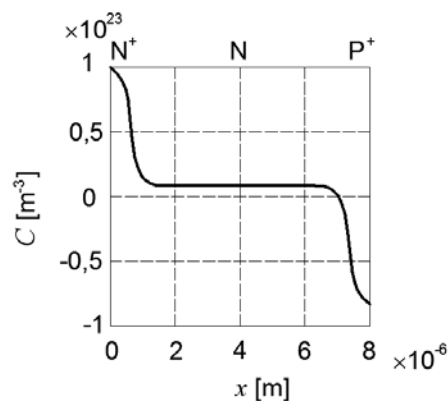
7.2.1 Dotační profil

Distribuce příměsí v objemu polovodiče, mající za následek nevlastní vodivost typu N nebo P, určuje geometrii a funkci polovodičového prvku. Proto je to naprosto zásadní vstupní informace a tudíž je pochopitelné, že pro přesné výsledky simulací je zapotřebí věrné modelování používaných výrobních procesů, jako jsou iontová implantace, difúze, tepelná oxidace, epitaxní narůstání a jiné, které tuto distribuci (dotační profil) vytvářejí. My se omezíme pouze na procesy iontové implantace a difúze atomů příměsí do objemu polovodičového substrátu. Výsledné profily těchto procesů jsou nejčastěji modelovány Gaussovou funkcí

$$G(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (48)$$

kde x představuje prostorovou souřadnici, a , b a c jsou reálné konstanty a e je Eulerovo číslo. Gaussova funkce je sudá (souměrná podle osy y) a má tvar „zvonu“, kterému přisuzujeme charakter distribuce příměsí v objemu polovodiče jako důsledek lokálně aplikovaných uvedených technologických procesů. Potom konstanta a určuje špičkovou koncentraci příměsí (výšku „zvonu“), b pozici aplikace technologického

procesu (souřadnici vrcholu „zvonu“) a c je úměrná difuzi příměsí do substrátu (šířce „zvonu“). Příklad dotačního profilu P-N diody je zobrazený na Obr. 39 [8].



Obr. 39: Dotační profil PN diody

7.2.2 Pohyblivost nosičů

Pohyb nosičů v polovodiči je narušen kolizemi s krystalovou mřížkou, příměsemi a defekty, tudíž dráha pohybu nosiče mezi dvěma body není přímka. Z důvodu snadnější představitelnosti tohoto jevu se zavedla právě veličina pohyblivosti, která se modeluje s ohledem na mechanismy, které ovlivňují kolize nosičů. Tyto mechanismy mohou být způsobeny například:

- atomovou mřížkou materiálu
- ionizovanými nečistotami
- kolizí nosič-nosič
- neutrálními nečistotami
- intenzitou elektrického pole

Často si vystačíme pouze s tabulkovou hodnotou $\mu_{n,p}^{300}$, udávanou pro daný materiál při teplotě 300 K. Avšak při tvorbě věrného modelu polovodičové struktury je formulace pohyblivosti nosičů klíčová, protože podchycuje fyzikální jevy, které mají zásadní vliv na vlastnosti polovodičových prvků [8].

7.2.3 Generace rekombinace nosičů

V předchozích odstavcích byla zmíněna funkce R , která popisuje četnost generace a rekombinace elektronů a děr. Dominantním mechanismem je funkce tzv. Shockley – Read – Hall, která je vyjádřena následujícím vztahem

$$R^{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + p_i)}, \quad (49)$$

kde τ_n a τ_p jsou doby života nosičů a n_i je hodnota intrinsické koncentrace [8].

7.3 Analýza základních rovnic a okrajové podmínky

V kapitole 7.1 byl uveden soubor základních rovnic (41) až (45). Je důležité zmínit, že ve vztazích proudových hustot (44) a (45) byly opomenuty složky proudu způsobené zúžením zakázaného pásma a teplotním gradientem, protože jsou vlivy těchto efektů považovány za zanedbatelné. Je nutné si však uvědomit, že vztahy pro proudy se tímto mohou stát nekorektní, pokud některý ze zmíněných efektů zásadně nabude na významu.

Použitím rovnice (41) a substitucí rovnic proudové hustoty (44) a (45) do rovnic kontinuity (42) a (43) dostáváme systém tří parciálních diferenciálních rovnic (50) až (52) s proměnnými Ψ , n a p .

$$\nabla \cdot (\nabla \Psi) - \frac{q}{\varepsilon} (n - p - C) = 0 \quad (50)$$

$$\nabla \cdot (D_n \nabla n - n \mu_n \nabla \Psi) - R = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (51)$$

$$\nabla \cdot (D_p \nabla p - p \mu_p \nabla \Psi) - R = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (52)$$

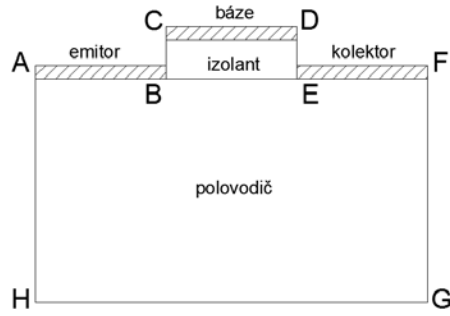
Pro matematickou analýzu je třeba znát počáteční odhad proměnných Ψ , n a p v doméně, ve které jsou tyto rovnice platné a okrajové podmínky. Tato ohraničená doména D je obecně trojrozměrná, tak jako prakticky všechny polovodičové struktury. Avšak v mnoha případech můžeme tuto doménu považovat za dvojrozměrnou, či dokonce za jednorozměrnou, čímž se analyzovaný problém zásadně zjednoduší.

Nechť ∂D , značí dílčí hranice domény D , která může být z principu rozdělena na dvě části

$$\partial D = \partial D_p \cup \partial D_A, \quad (53)$$

kde ∂D_p značí části hranice představující skutečné fyzické hranice, jako jsou kontakty a rozhraní. Naopak ∂D_A , značí umělé rozhraní, které se zavádí například za účelem vyčlenění dílčí struktury z rozměrného substrátu nebo oddělení sousedních prvků na jednom substrátu, tudíž nepředstavují fyzickou hranici.

Zmíněné rozdělení hranic je možné ilustrativně popsat na idealizované geometrii 2D planárního MOS tranzistoru (Obr. 40). Celá doména je zde reprezentována mnohoúhelníkem $A-B-C-D-E-F-G-H-A$.



Obr. 40: 2D geometrie planárního tranzistoru MOSFET

Rovnice (50) až (52) platí pouze v subdoméně $A-B-E-F-G-H-A$, izolant ohraničený body $B-C-D-E-B$, můžeme charakterizovat buď Laplaceovou rovnicí pro elektrostatický potenciál

$$\nabla \cdot \nabla(\Psi) = 0, \quad (54)$$

nebo předpokladem absence nosičů náboje

$$n = p = C = 0. \quad (55)$$

Avšak použití těchto rovnic znemožňuje určení proudu procházejícího bází a vlivu náboje izolační vrstvy oxidu.

Hranice $A-B$, $E-F$, $C-D$ a $B-E$ interpretují fyzické hranice představující tři kontakty a jedno rozhraní mezi polovodičem a izolantem. Hranice $A-H$, $B-C$, $D-E$, $F-G$ a $G-H$ pokládáme za umělé hranice. Tyto hranice sice v reálné struktuře neexistují, ale usnadňují simulaci tím, že strukturu separují od okolního prostředí. Fyzické hranice mohou být rozděleny do tří kategorií

$$\partial D_p = \partial D_o \cup \partial D_s \cup \partial D_I, \quad (56)$$

kde ∂D_o značí ohmický kontakt, ∂D_s Schottkyho kontakt a ∂D_I rozhraní s izolantem [8].

V následující tabulce Tab.1 je uveden přehled okrajových podmínek pro všechny tři závislé proměnné soustav rovnic (50) až (52), kde \mathbf{n} značí normálový vektor kolmý na ∂D a v_n , v_p značí rychlosti tepelné rekombinace [8].

Tab. 1: Okrajové podmínky typických rozhraní polovodičových struktur

	Ohmický kontakt	Schottkyho kontakt	Polovodič - izolant	Umělé rozhraní
Elektrický potenciál	$\Psi_b = \frac{kT}{q} \operatorname{arcsin} h \left(\frac{C}{2n_i} \right)$	$\Psi_b = \frac{kT}{q} \operatorname{arcsin} h \left(\frac{C}{2n_i} \right)$	$\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{n}} = 0$	$\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{n}} = 0$
Koncentrace elektronů	$n = \frac{\sqrt{C^2 + 4n_i^2} + C}{2}$	$\mathbf{J}_n \mathbf{n} = -qv_n \left(n - \frac{\sqrt{C^2 + 4n_i^2} + C}{2} \right)$	$\mathbf{J}_n \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial n}{\partial \mathbf{n}} = 0$
Koncentrace děr	$p = \frac{\sqrt{C^2 + 4n_i^2} - C}{2}$	$\mathbf{J}_p \mathbf{n} = -qv_p \left(p - \frac{\sqrt{C^2 + 4n_i^2} - C}{2} \right)$	$\mathbf{J}_p \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0$

8 Model planárního přenosového vedení na polovodičovém substrátu

8.1 Model polovodičového substrátu v prostředí COMSOL

V následujícím textu bude popsána tvorba modelu polovodičového substrátu, který bude dále využit při simulacích planárních vedení. Model byl vytvořen ve 2D prostředí programu COMSOL Multiphysics s použitím modulů Electrostatics a Transport of Diluted Species.

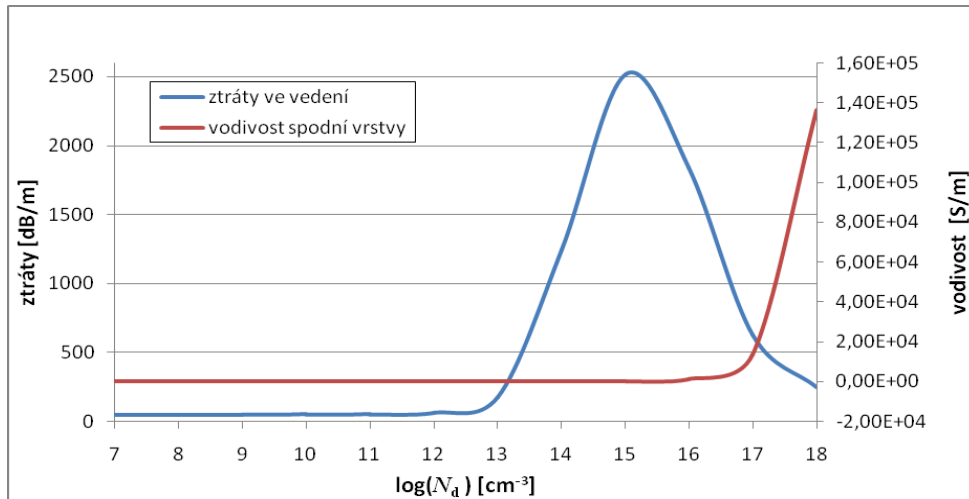
Materiál, ze kterého je tvořen modelovaný polovodič je gallium arsenid GaAs, je složen ze dvou vrstev dotovaných pouze elektrony, v tabulce Tab. 2 jsou uvedeny nejdůležitější konstanty potřebné k jeho realizaci.

Tab. 2: Konstanty pro modelování gallium arsenidového polovodiče

q	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	elementární náboj
T	300 K	počáteční teplota
k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	Boltzmannova konstanta
ϵ_r	12,93	relativní permitivita GaAs
μ_n^{300}	$0,85 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	pohyblivost elektronů v GaAs
c	$38,7 \text{ s}^3 \cdot \text{A}/(\text{m}^2 \cdot \text{kg})$	převrácená hodnota teplot. napětí
N_d	$1,0 \cdot 10^{22} \text{ 1/m}^3$	Zvolená špičková koncentrace donorů
N_{di}	$2,1 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$	Zvolená minimální koncentrace donorů
χ_{GaAs}	$4,05 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	elektronová afinita
E_g	$1,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	zakázaný pás GaAs
n_i	$2,1 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^3$	intrinsická konstanta [10]

Rozměr polovodičové struktury, která bude použita při dalších simulacích planárních vedení na polovodičovém substrátu, souhlasí s rozměry získanými v předchozích kapitolách, konkrétně $0,1 \times 1 \text{ mm}$. Hodnoty N_d a N_{di} byly zvoleny jako maximální možné s ohledem na omezení ve výpočetních možnostech programů COMSOL a TiberCAD. Vysoká hodnota $N_d = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve spodní silně dotované vrstvě byla stanovena z důvodu požadované vyšší vodivosti s ohledem na výsledné ztráty ve vedení. Vodivost spodní vrstvy byla experimentálně určena pomocí vzorce (59), do kterého byly na místo c_n dosazovány příslušné hodnoty koncentrace donorů N_d v rozsahu $1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$ až $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Ze závislosti vodivosti a ztrát na hodnotě dotací elektronů N_d v mikropáskovém vedení na polovodičovém substrátu (Obr. 41) je zřejmé, že pro nižší ztráty by bylo vhodné volit hodnotu dotací vyšší než $N_d = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. V těchto případech ale již polovodič vykazuje znaky degenerovaného polovodiče. Hodnota horní méně dotované vrstvy byla stanovena $N_{di} = 2,1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$, tato hodnota byla původně stanovena jako hodnota intrinsické koncentrace v GaAs ($2,1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$). V průběhu simulací bylo ale zjištěno, že tato hodnota se pohybuje na hranici použitelnosti a nelze s ní zároveň úspěšně realizovat simulace modelovaného polovodiče.



Obr. 41: Závislost vodivosti a ztrát na hodnotě dotací elektronů N_d

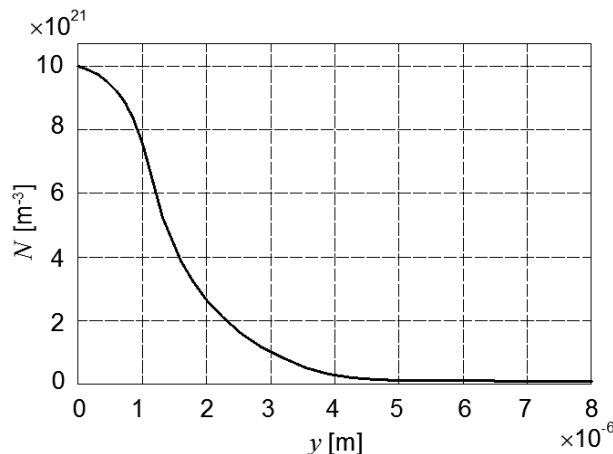
Polovodičový přechod byl modelován s využitím Gaussovy funkce, výsledná funkce N popisující tento přechod je vyjádřena pomocí rovnice

$$N = N_{di} + N_d e^{-\frac{(y-y_1)^2}{2c^2}} \cdot (y \geq y_1) + N_d \cdot (y < y_1), \quad (57)$$

kde C je vyjádřeno jako

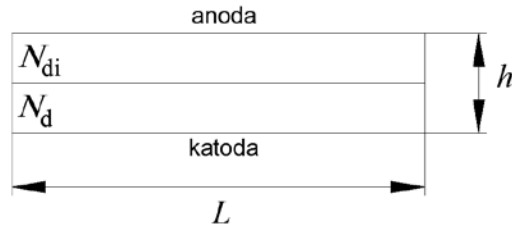
$$C = \frac{L_j}{\sqrt{2 \cdot \ln \frac{N_d}{N_{di}}}} \quad (58)$$

a L_j je šířka PN přechodu, konkrétně $L_j = 8 \cdot 10^{-6}$ m. Funkce N je vykreslena na Obr. 42.



Obr. 42: Funkce N modelovaného polovodičového přechodu

Nejprve byl v grafickém prostředí COMSOL nakreslen průřez modelovaného křemíkového polovodiče (Obr. 43). Struktura je složena ze dvou vrstev se stejnými rozměry, celková výška polovodičové struktury h je 0,2 mm a šířka L 1 mm.



Obr. 43: Struktura polovodiče

Doménám polovodiče byl z knihovny materiálů přiřazen gallium arsenid, kde na místo vodivosti byla vložena proměnná σ_m ze vzorce

$$\sigma_m = q \cdot c_n \cdot \mu_n^{300} \quad (59)$$

Pro simulaci dějů probíhajících v polovodiči v prostředí COMSOL Multiphysics je nutné provést v prvním kroku simulace předvýpočet pro počáteční odhad proměnných elektrického toku ψ_{init} a koncentrace elektronů n_{init} , který se následně použije v druhém kroku a tím i v samotné simulaci zahrnující termodynamické vlastnosti polovodičové struktury.

V samotné simulaci byly použity tři moduly zahrnující vlastnosti pro řešení dějů probíhajících v polovodičích. Jedná se o elektrostatický modul (electrostatics), který je použit dvakrát (předvýpočet / samotná simulace) a modul zahrnující transport elektronů (transport of diluted species).

Nejprve byly nastaveny vlastností subdomén (oblastí) a okrajových podmínek v elektrostatickém modulu (electrostatics) pro předvýpočet. Elektrostatické vlastnosti modelu byly řešeny pomocí rovnic

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v, \quad \mathbf{E} = -\nabla \cdot \psi_0. \quad (60)$$

Na celé subdoméně modelu, byla řešena podmínka zachování elektrického náboje (charge conservation), definovaná rovnicemi

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}) = \rho_v, \quad \mathbf{E} = -\nabla \psi_0, \quad (61)$$

kde za hodnotu elektrického potenciálu ψ_0 byla vložena hodnota ψ_{init} definovaná v parametrech simulace pomocí rovnice

$$\psi_{init} = \frac{1}{c \cdot \arcsin h \left(\frac{N}{2 \cdot n_i} \right)} - \frac{\chi_{GaAs}}{q} - \frac{E_g}{2} \quad (62)$$

a dále podmínka elektronové hustoty (space charge density)

$$\rho_v = q \cdot (N - n_0), \quad (63)$$

kde N je vyjádřeno pomocí rovnice (57) a n_0 pomocí (64) vložených do parametrů simulace.

$$n_0 = n_i \cdot e \frac{\Psi_0 + \frac{\chi_{\text{GaAs}}}{q} + \frac{E_g}{q}}{\frac{kT}{q}} \quad (64)$$

Hranicím modelu, které nepředstavují elektrický kontakt, byla přidělena okrajová podmínka nulového náboje (zero charge)

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (65)$$

a hranicím představující elektrický kontakt byla přidělena okrajová podmínka elektrického potenciálu (electric potential) řešená rovnicí

$$\psi_0 = V_0, \quad (66)$$

kde hodnotě V_0 byla přidělena hodnota ψ_{init} je definovaná v parametrech simulace rovnicí (62).

Následujícím krokem bylo nastavení vlastností subdomén a okrajových podmínek pro druhý krok simulace. Opět se jedná o elektrostatický modul (electrostatics) a nastavení jeho parametrů je obdobné jako v předchozím kroku s využitím těchto hodnot.

Odlišnosti mezi oběma nastaveními byly pouze v indexacích proměnných, kdy místo původních hodnot ψ_0 bylo dosazeno ψ a následně za hodnotu ψ dosazena proměnná ψ_0 získaná z předvýpočtu.

Dále pak v podmínce elektronové hustoty (space charge density) subdomény byla vložena rovnice

$$\rho_v = q \cdot (N - c_n). \quad (67)$$

Anodě polovodičové struktury byla přiřazena okrajová podmínka elektrického potenciálu (electric potential)

$$\psi = V_0, \quad V_0 = \psi_{init} + V_a, \quad (68)$$

kde V_a je napětí přivedené do struktury. Katodě polovodičové struktury pak podmínka

$$\psi = V_0, \quad V_0 = \psi_{init}. \quad (69)$$

Nakonec bylo ještě nutné nastavit vlastnosti subdomén a okrajové podmínky v modulu zahrnujícím transport elektronů (transport of diluted species) řešený pomocí rovnic

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + \mathbf{u} c_i) = R_i \quad (70)$$

a

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i + \mathbf{u} c_i, \quad (71)$$

zde byla ještě na místě závisle proměnných dosazena za koncentraci proměnná c_n .

Dále byla v celé subdoméně nastavena podmínka konvekce a difuze (convection and diffusion) definovaná rovnicemi (70), (71) a doplněn difuzní koeficient D_n vyjádřený rovnicí (72) vložené do parametrů simulace

$$D_n = \frac{k \cdot T}{q \cdot \mu_n^{300}}. \quad (72)$$

Poslední nastavení vlastností subdomén zahrnovalo podmínky nastavení počátečních hodnot (initial values), kde hodnotě c_n byla přiřazena proměnná n_0 definovaná rovnicí (64).

Při nastavení okrajových podmínek byla nastavena podmínka nulového toku (no flux) všem hranicím, které nepředstavují elektrické kontakty řešená rovnicí

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0 \quad (73)$$

a hranicím zahrnujícím elektrické kontakty podmínka koncentrace (concentration) řešená rovnicí

$$c_i = c_{0,i} \quad (74)$$

a na místo koncentrace c_{0,c_n} byla vložena proměnná n_{init} definovaná rovnicí (75) vloženou v parametrech simulace

$$n_{init} = \frac{\left(\sqrt{N^2 + 4 \cdot n_i^2}\right) + N}{2}. \quad (75)$$

Tímto byly všechny vlastnosti subdomén a okrajové podmínky nastaveny, v následující podkapitole bude tento model použit k realizaci nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu.

8.2 Model polovodičového substrátu v prostředí TiberCAD

Program TiberCAD je specializovaný program určený primárně pro modelování dějů a vlastností polovodičových struktur. Modelování polovodičových struktur v programu TiberCAD je specifické tím, že TiberCAD postrádá jakékoli grafické rozhraní. Nastavení a specifikace simulací probíhá pomocí konfiguračního skriptu TiberCADu označeného *.tib. Geometrii a výpočetní síť struktury polovodiče je nutné vytvořit samostatně pomocí programu Gmsh. Z programu Gmsh získáme soubor *.geo popisující geometrii polovodičové struktury a soubor *.msh nesoucí informace o výpočetní síti. Oba dva skripty *.geo i *.msh se poté přidají do složky se spouštěcím souborem TiberCADu. Následně je TiberCAD využívá k výpočtu.

8.2.1 Geometrie polovodičové struktury a výpočetní síť

Geometrie byla vytvořena pomocí programu Gmsh. Po spuštění programu pomocí nabídky *Geometry a Edit*, byly zadány parametry polovodičové struktury. Polovodičová struktura byla popsána pomocí bodů definovaných pomocí `Point(.)={x,y,z,m}`, kde x , y , z , jsou prostorové souřadnice a m definuje velikost rozměru sítě. Takto definované body struktury, byly dále pospojovány do úseček pomocí definice `Line(.)={P1,P2}`, kde $P1$ a $P2$ udávají definované body, ze kterých bude výsledná úsečka tvořena. Z takto vzniklých úseček, byly následně vytvořeny smyčky definující plošný povrch `Line Loop(.)={.,.,.,.}`; `Plane Surface(.)={.}`. Výsledným útvarům definujícím plošný povrch a úsečkám popisujícím kontakty bylo ještě přiděleno fyzické označení definované `Physical Surface(" ")={.}` a `Physical Line(" ")={.}`. V nabídce programu Gmsh byla následně vybrána položka *Mesh* a generována výpočetní síť.

8.2.2 Konfigurační soubor TiberCADu

Nejdříve bylo nutné nadefinovat fyzikální parametry polovodičové struktury, a to použitý materiál gallium arsenid a koncentrace nosičů zadávané v cm^{-3} , v jednotlivých strukturách. Struktury jsou zde popsány definicí `Region` a její názvy musí odpovídat názvům definovaným v souboru *.geo.

```
Region substrat_h                                Název regionu 1 (horní vrstva)
{
  material = GaAs                                Definice použitého materiálu
  doping = 2.1e7 doping_type = donor             Definice koncentrace nosičů náboje
}

Region substrat_s                                Název regionu 2 (spodní vrstva)
{
  material = GaAs
  doping = 1e16 doping_type = donor
}
```

Dále byly definovány simulační a okrajové podmínky modelu.

```
model driftdiffusion                             Nastavení simulace driftu a difuze
{
  options
  {
    simulation_name = dd                         Nastavení názvu simulace
    physical_regions = all                       Nastavení regionů
  }

  physical_model electron_mobility              Nastavení mobility pro elektrony
  {
    model = constant
    low_field_model = constant
  }

  physical_model hole_mobility                  Nastavení mobility pro díry
  {
    model = constant
  }
}
```

```

    low_field_model = constant
}

physical_model recombination          Nastavení typu rekombinace
{
    model = srh
}

```

V nastavení okrajových podmínek byly definovány ohmické kontakty na anodě a katodě, na katodu je přivedeno nulové napětí a na anodu napětí definované jako proměnná @Vb.

```

BC_Regions
{
    BC_Region anode
    {
        type = ohmic
        voltage = @Vb[0.0]
    }

    BC_Region cathode
    {
        type = ohmic
        voltage = 0.0
    }
}

```

Posledním bodem byla definice parametrů řešení simulace složená z následujících kroků

```

sweep
{
    variable = Vb          Proměnná Vb
    start = 0              Počáteční napětí
    stop = 25              Konečné napětí
    steps = 50             Počet kroků v rozsahu napětí
    plot_data = true
    simulation = dd
}

```

Pro úspěšnou realizaci, bylo ještě nutné doplnit informace o vstupních souborech simulace a zejména jaké parametry chceme uložit do výstupních souborů.

```

#searchpath = ../../materials
meshfile = mikropasek.msh          Název vstupního souboru početní sítě
dimension = 2                      Definice 2D simulace
verbose = 2
temperature = 300                  Teplota
solve = sweep                      Definice parametrické simulace
resultpath = out_mikropasek        Název složky s výstupními soubory
output_format = vtk                Formát výstupních souborů

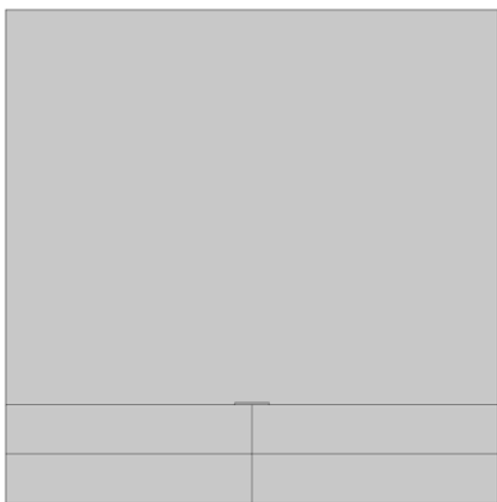
plot = (Ec, Ev, QFermi_e, QFermi_h, eDensity, hDensity, eCurrent,
hCurrent, CurrentDensity, ContactCurrents, eMob, hMob)
Definice parametrů ukládaných do výstupních souborů

```

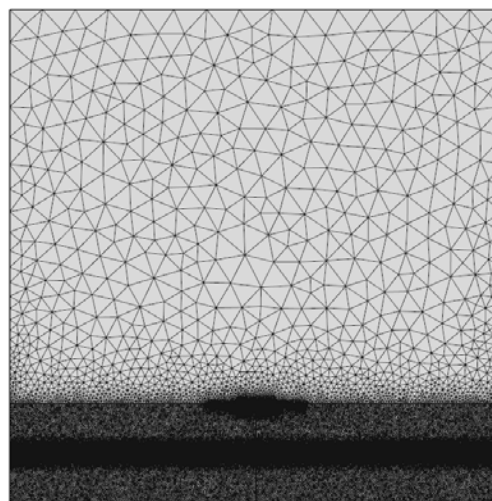
Tímto je skript pro modelování polovodiče v programu TiberCAD hotov. Tento skript bude brán jako výchozí a pro jednotlivá vedení se bude lišit pouze ve vstupních souborech obsahujících informace o geometrii a výpočetní síti.

8.3 Nesymetrické mikropáskové vedení na polovodičovém substrátu

Pří řešení modelu nesymetrického mikropáskového vedení byl využit model vedení z kapitoly 6.1, pouze dielektrický substrát byl nahrazen polovodičovým substrátem připraveným v kapitole 8.1. Výsledná struktura nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu je zobrazena na Obr. 44, jeho výpočetní síť pak na Obr. 45.

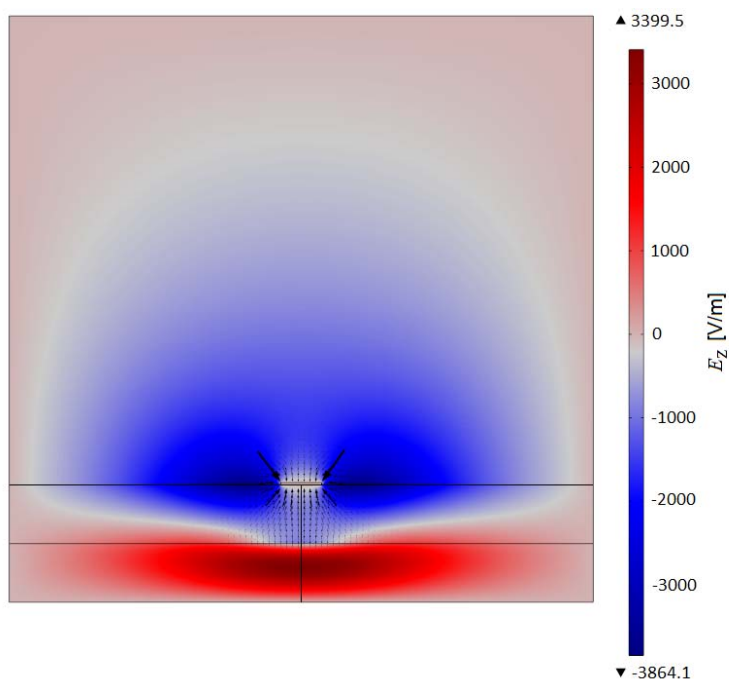


Obr. 44: Struktura nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu



Obr. 45: Výpočetní síť nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu

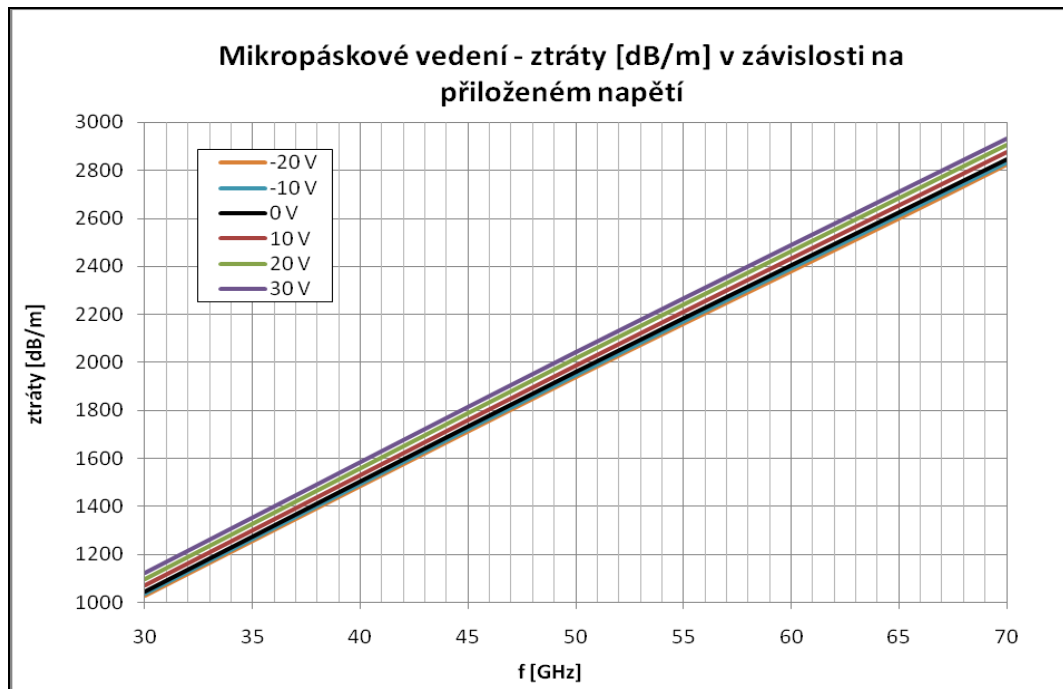
Dále bylo v nastavení řešiče přivedeno na mikropásek napětí V_a vyjádřené parametricky od -30 V do 30 V.



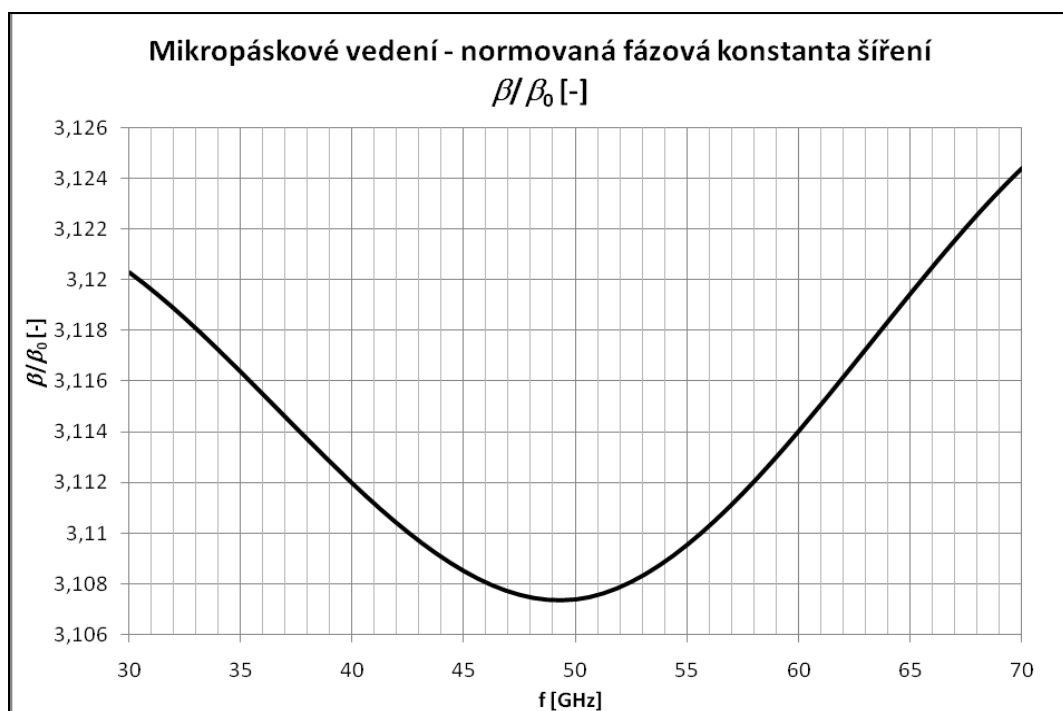
Obr. 46: Rozložení elektrického pole v průřezu nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu

Rozložení elektrického pole na nesymetrickém mikropáskovém vedení s polovodičovým substrátem na frekvenci 50 GHz, je zobrazeno na Obr. 46, barevnou škálou je zobrazena složka E_z elektrického pole kolmá k nákrešně a šipkami vektorové pole se složkami E_x a E_y .

V mikropáskovém vedení byly určeny také ztráty a normovaná fázová konstanta šíření. Obě hodnoty byly zjišťovány na frekvencích 30, 50 a 70 GHz, při napětích přivedených na mikropásek (-20 až 30 V). Závislosti ztrát na frekvenci při napětí přivedeném na mikropásek jsou uvedeny na Obr. 47 a normovaná fázová konstanta šíření na Obr. 48.



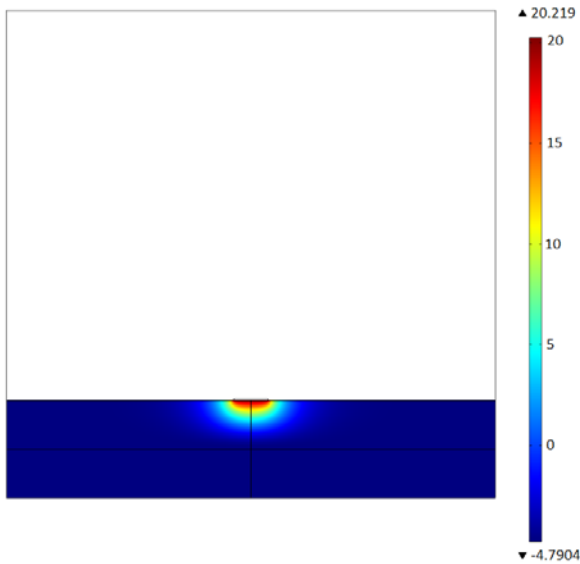
Obr. 47: Závislost ztrát na frekvenci při napětí přiloženém na mikropásek



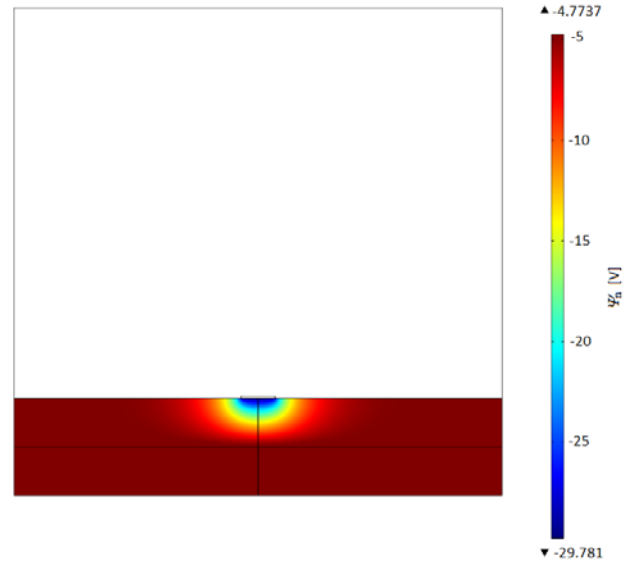
Obr. 48: Normovaná fázová konstanta šíření v nesymetrickém mikropáskovém vedení

Na průřezu struktury vedení bylo dále zobrazeno rozložení elektrického potenciálu Ψ_n (Obr. 49) a (Obr. 50) získaného pomocí rovnice

$$\Psi_n = \Psi - \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{c_n}{n_i} \quad [9], \quad (76)$$

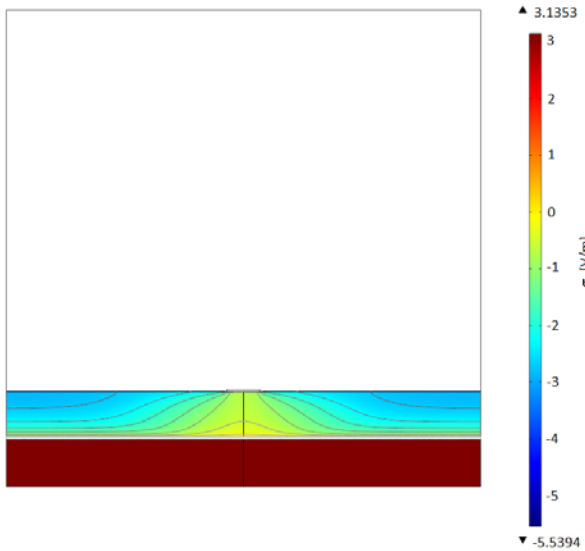


Obr. 49: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí 25 V

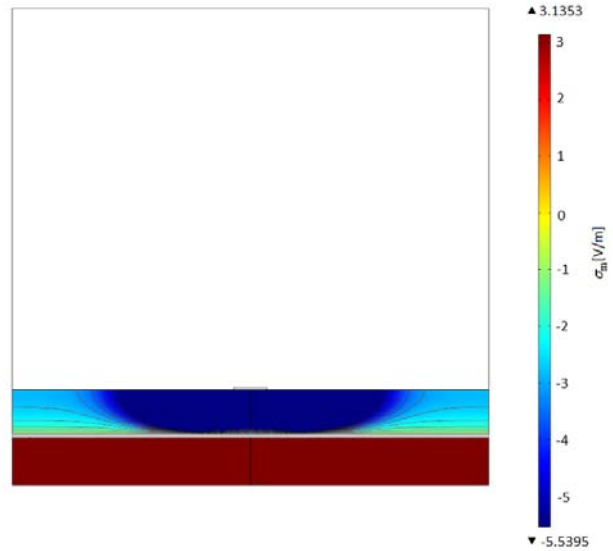


Obr. 50: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí -25 V

také bylo v logaritmicke míře zobrazeno rozložení elektrické vodivosti σ_m (Obr. 51) a (Obr. 52) definované rovnicí (59) a závislost vodivosti na přiloženém napětí (viz. kapitola 8.3.1 Obr. 59 a Obr. 60).

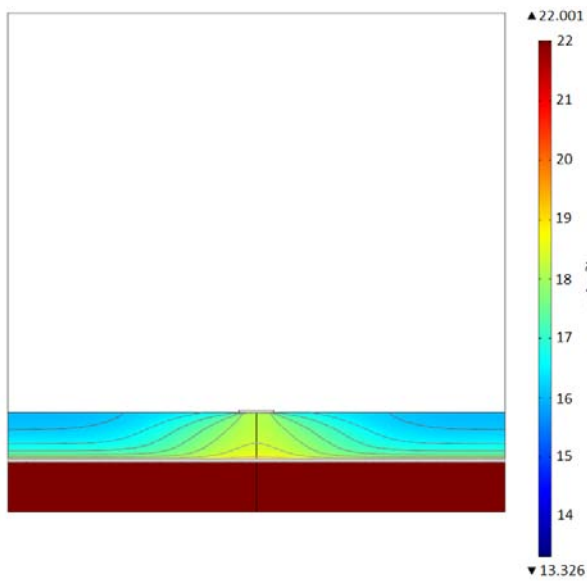


Obr. 51: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí 25 V

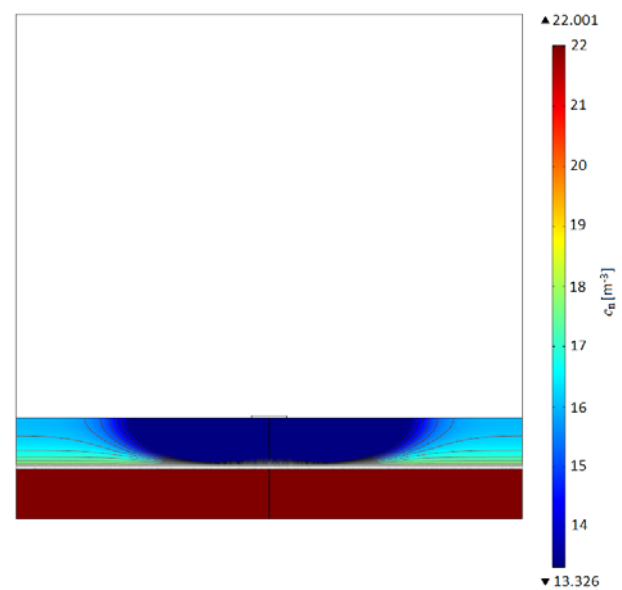


Obr. 52: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí -25 V

Následně bylo v logaritmické míře zobrazeno rozložení koncentrace nosičů náboje c_n (Obr. 53) a (Obr. 54). Závislost koncentrace nosičů na přiloženém napětí (viz. kapitola 8.3.1 Obr. 57 a Obr. 58).

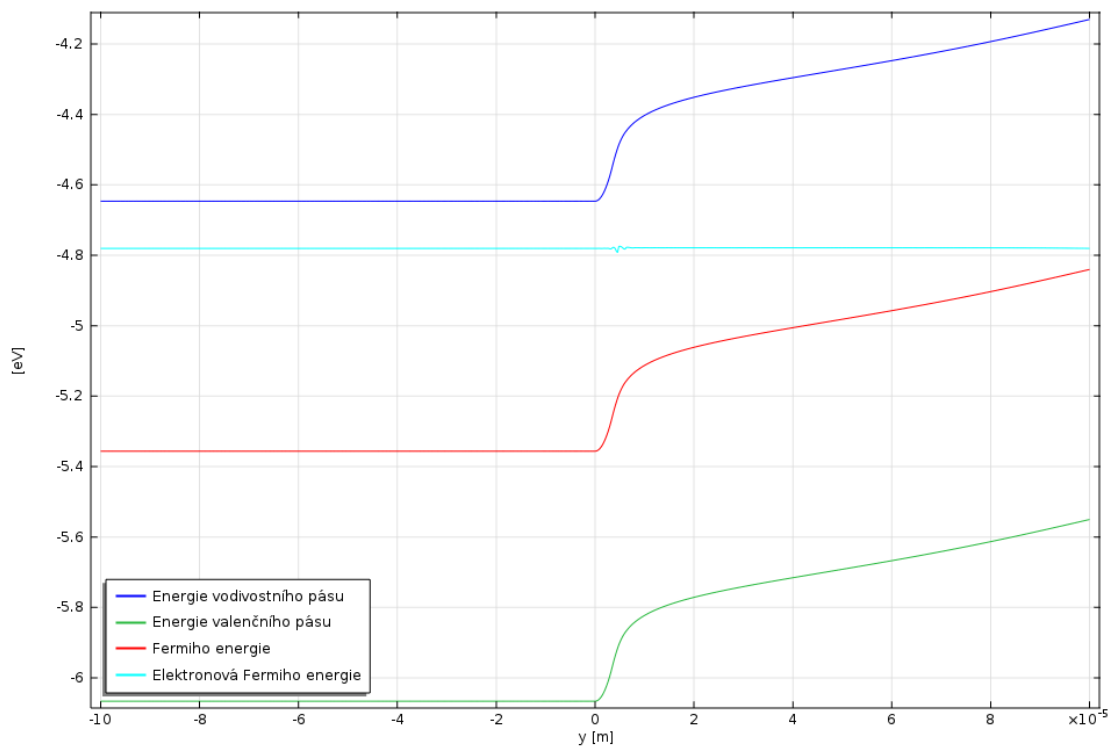


Obr. 53: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí 25 V



Obr. 54: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí -25 V

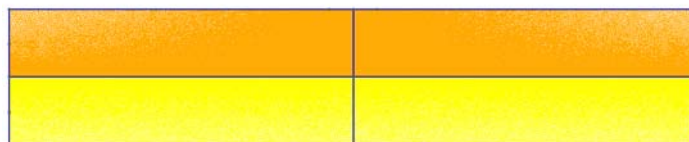
Nakonec byl ještě zobrazen energetický diagram polovodičového substrátu (Obr. 55), vztažený k pomocné středové úsečce rozdělující vertikálně strukturu polovodiče.



Obr. 55: Energetický diagram polovodičového substrátu

8.3.1 Srovnání výsledků s programem TiberCAD

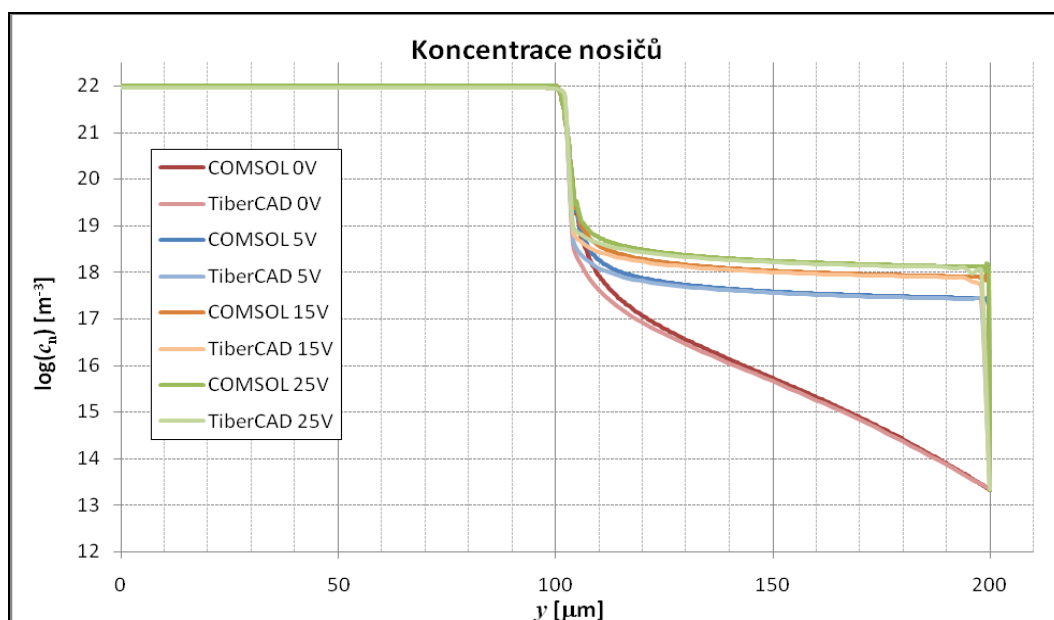
Pomocí programu Gmsh a s využitím postupu v kapitole 8.2.1 byla pro simulace v programu TiberCAD vytvořena struktura nesymetrického mikropáskového vedení a její výpočetní síť (Obr. 56). Příslušný skript popisující geometrii nesymetrického mikropáskového vedení je uveden na přiloženém CD.



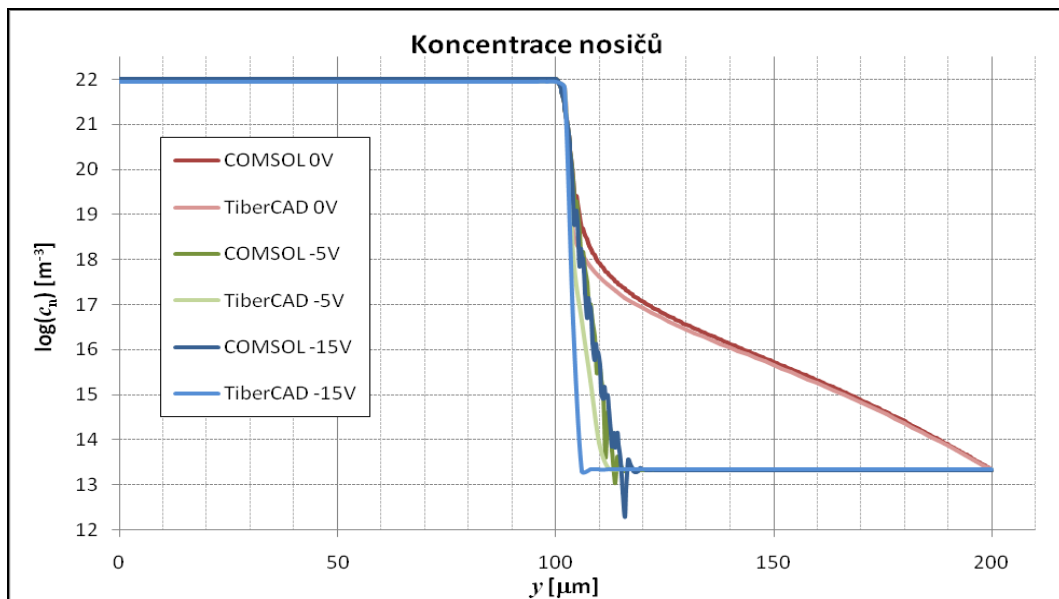
Obr. 56: Struktura a výpočetní síť nesymetrického mikropáskového vedení

Nesymetrické mikropáskové vedení by mělo být programem TiberCAD pro srovnání s programem COMMSOL simulováno ideálně v rozsahu napětí -25 V až 25 V. Vzhledem k situaci, kdy programu TiberCAD dělaly problémy výpočty v záporných napětích, byl tento rozsah napětí omezen na hodnotu, kterou byl TiberCAD ještě schopen spočítat, konkrétně tedy -15 V až 25 V. Mezi oběma programy byly porovnávány výsledky závislosti koncentrace nosičů náboje c_n a vodivosti σ_m vyjádřené v logaritmické míře na přiloženém napětí (Obr. 57 až Obr. 60).

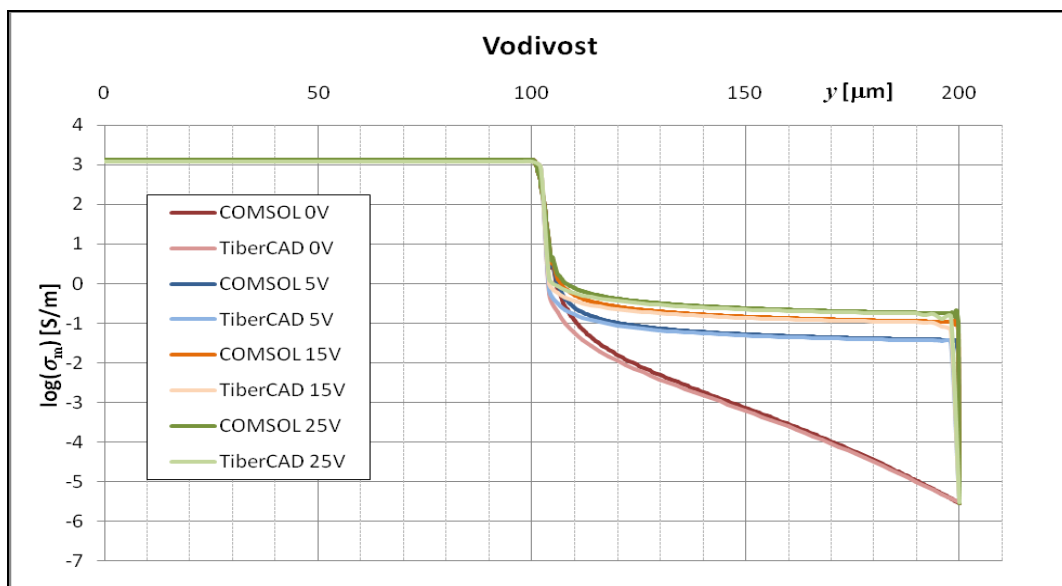
Výsledná odchylka výpočtů v programu COMSOL od programu TiberCAD je dána použitou funkcí N definovanou v kapitole 8.1, charakterizující plynulý polovodičový přechod. V programu TiberCAD je polovodičový přechod realizován skokovou funkcí.



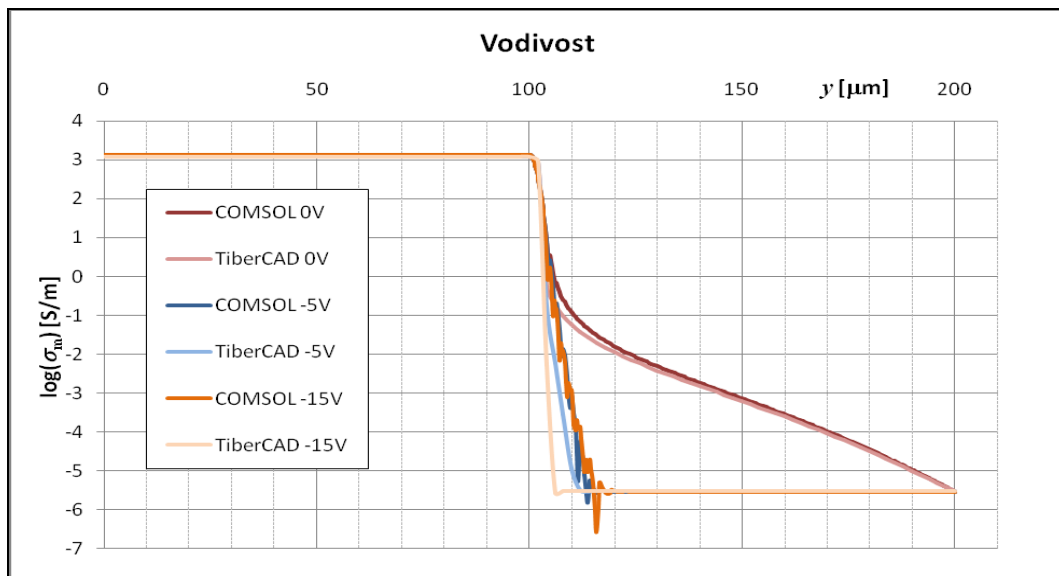
Obr. 57: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – kladné hodnoty napětí



Obr. 58: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – záporné hodnoty napětí



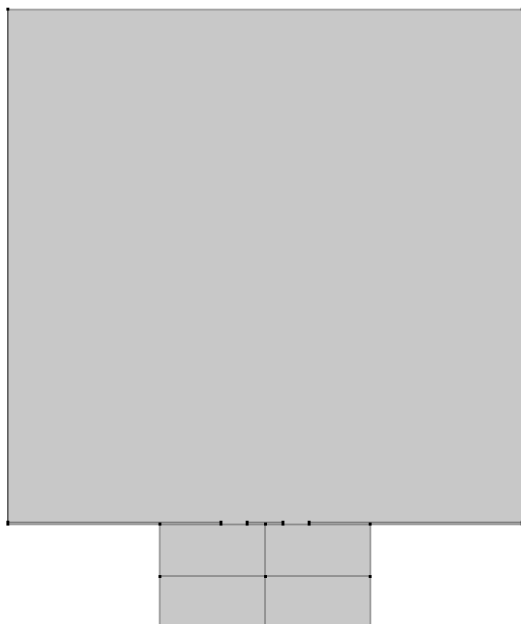
Obr. 59: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – kladné hodnoty



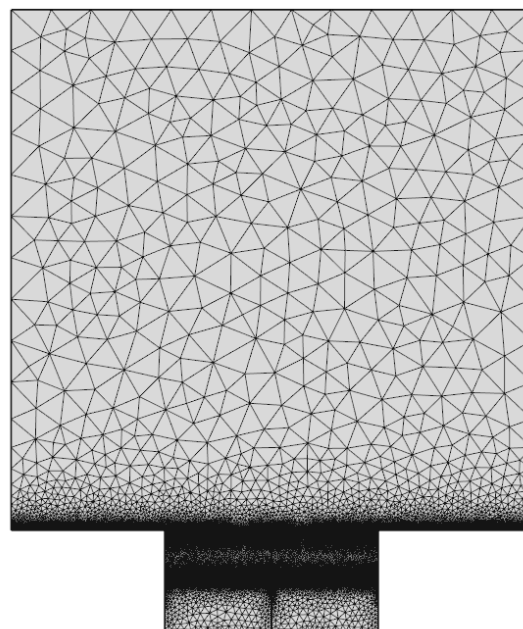
Obr. 60: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – záporné hodnoty

8.4 Koplanární třívodičové vedení na polovodičovém substrátu

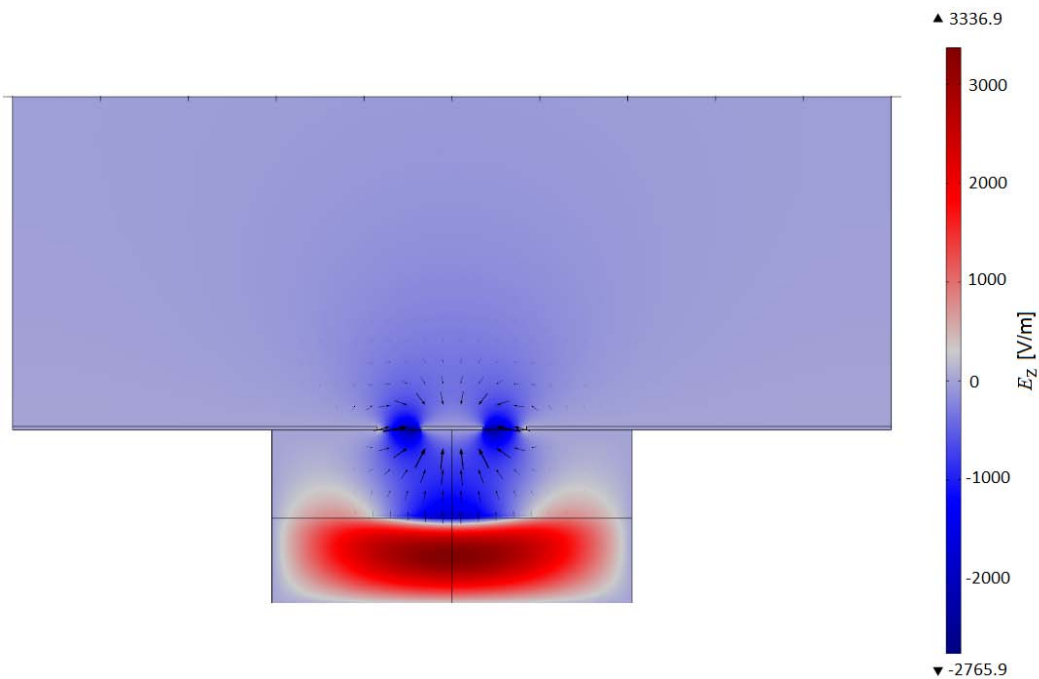
U modelu koplanárního třívodičového vedení se postupovalo obdobně jako v kapitole 8.3. V modelu vedení z kapitoly 6.3 byl dielektrický substrát nahrazen polovodičovým substrátem a byl přizpůsoben rozměrům koplanárního třívodičového vedení. Dále bylo nutné ještě pozměnit rozmístění ohmických kontaktů anoda - katoda, aby odpovídaly tomuto simulovanému vedení. Výsledná struktura koplanárního třívodičového vedení je zobrazena na Obr. 61, výpočetní síť pak na Obr. 62.



Obr. 61: Struktura koplanárního třívodičového vedení na polovodičovém substrátu



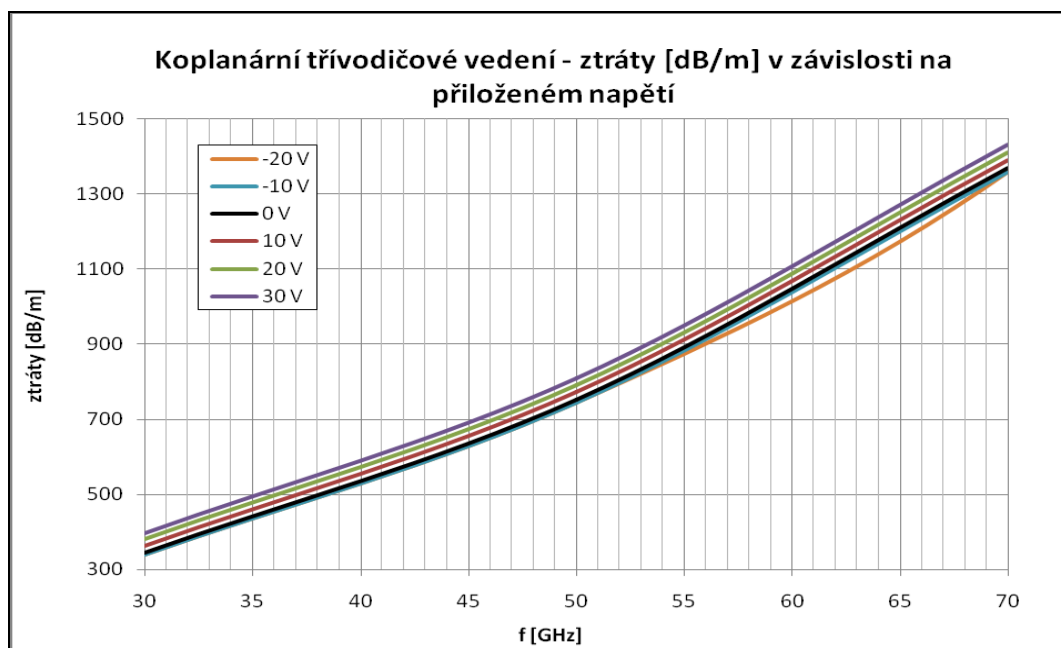
Obr. 62: Výpočetní síť koplanárního třívodičového vedení polovodičovém substrátu



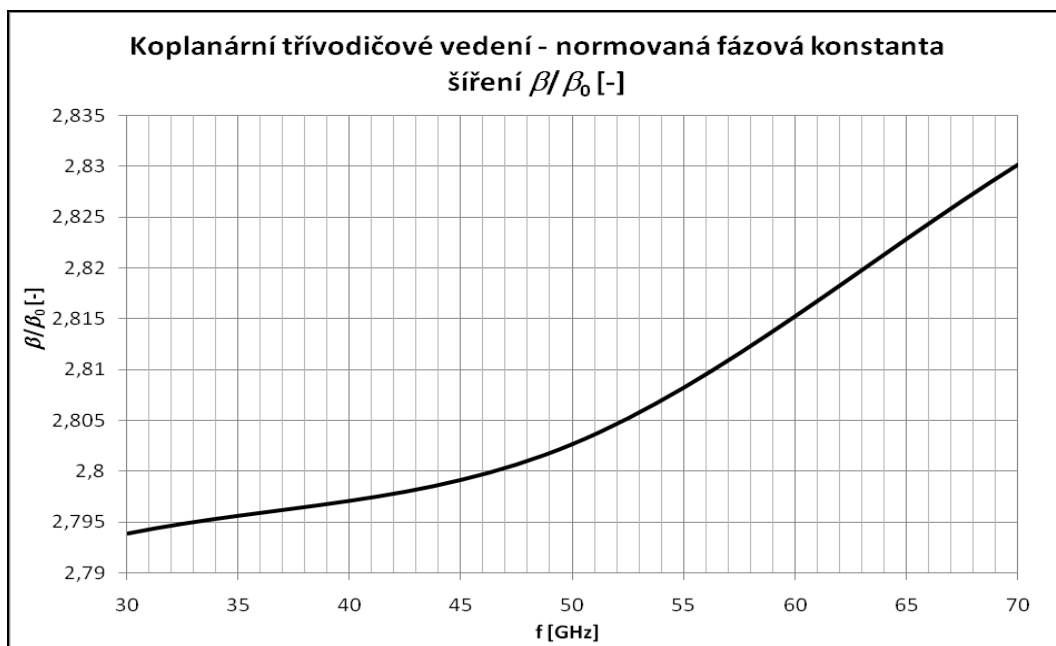
Obr. 63: Rozložení elektrického pole v průřezu nesymetrického mikropáskového vedení na polovodičovém substrátu

Na Obr. 63 je zobrazen výřez koplanárního třívodičového vedení na polovodičovém substrátu se zobrazením rozložení elektrického pole na frekvenci 50 GHz, barevnou škálou je zobrazena složka E_z elektrického pole kolmá k nákrešné a šipkami vektorové pole se složkami E_x a E_y .

Na frekvencích 30, 50 a 70 GHz, při napětích přivedených na vedení (-20 až 30 V) byly určeny ztráty a normovaná fázová konstanta šíření. Závislosti ztrát na frekvenci při napětí přivedeném na koplanární třívodičové vedení jsou uvedeny na Obr. 64 a normovaná fázová konstanta šíření na Obr. 65.

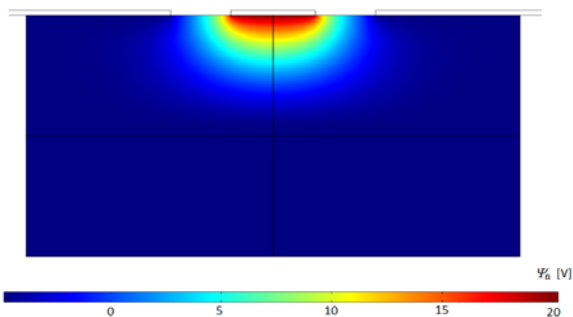


Obr. 64: Závislost ztrát na frekvenci při napětí přiloženém na vedení

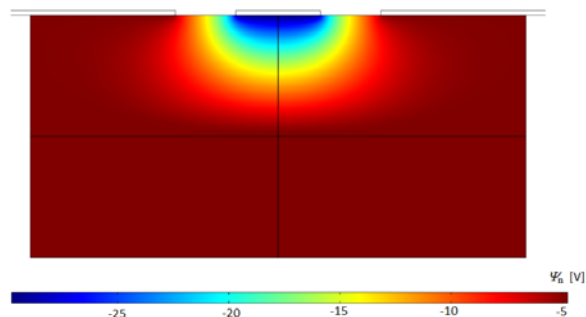


Obr. 65: Normovaná fázová konstanta šíření v koplanárním třívodičovém vedení

Na průřezu struktury koplanárního třívodičového vedení bylo zobrazeno rozložení elektrického potenciálu Ψ_n (Obr. 66) a (Obr. 67) získaného pomocí rovnice (76),

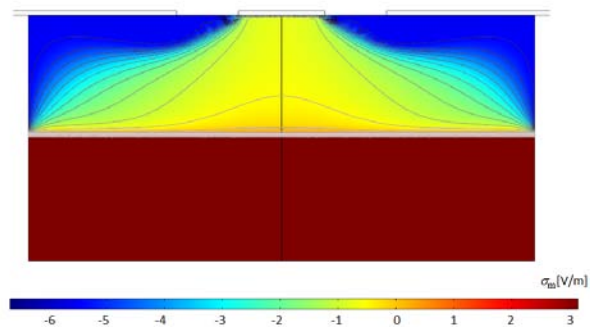


Obr. 66: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí 25 V

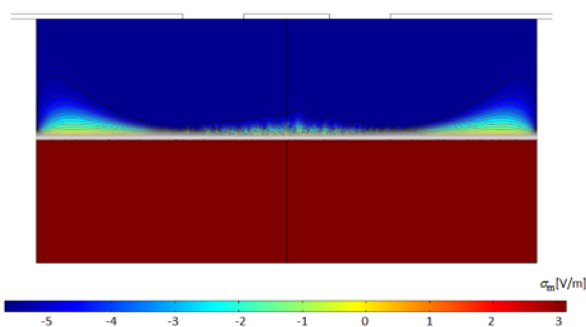


Obr. 67: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí -25 V

dále bylo v logaritmicke míře zobrazeno rozložení elektrické vodivosti σ_m (Obr. 68) a (Obr. 69) definované rovnicí (59) a závislost vodivosti na přiloženém napětí (viz. kapitola 8.4.1 Obr. 76 a Obr. 77).

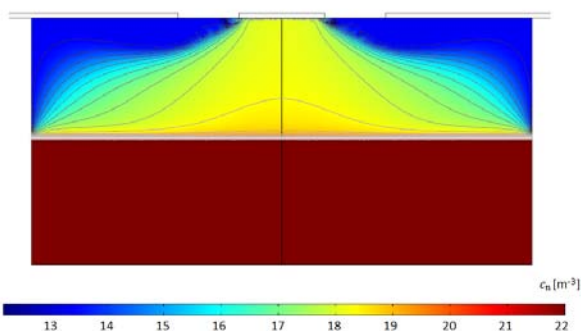


Obr. 68: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí 25 V

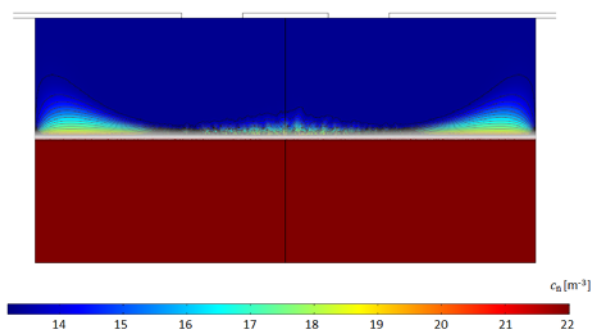


Obr. 69: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí -25 V

Obdobně bylo v logaritmické míře zobrazeno rozložení koncentrace nosičů náboje c_n (Obr. 70) a (Obr. 71). Závislost koncentrace nosičů na přiloženém napětí (viz. kapitola 8.4.1 Obr. 74 a Obr. 75).

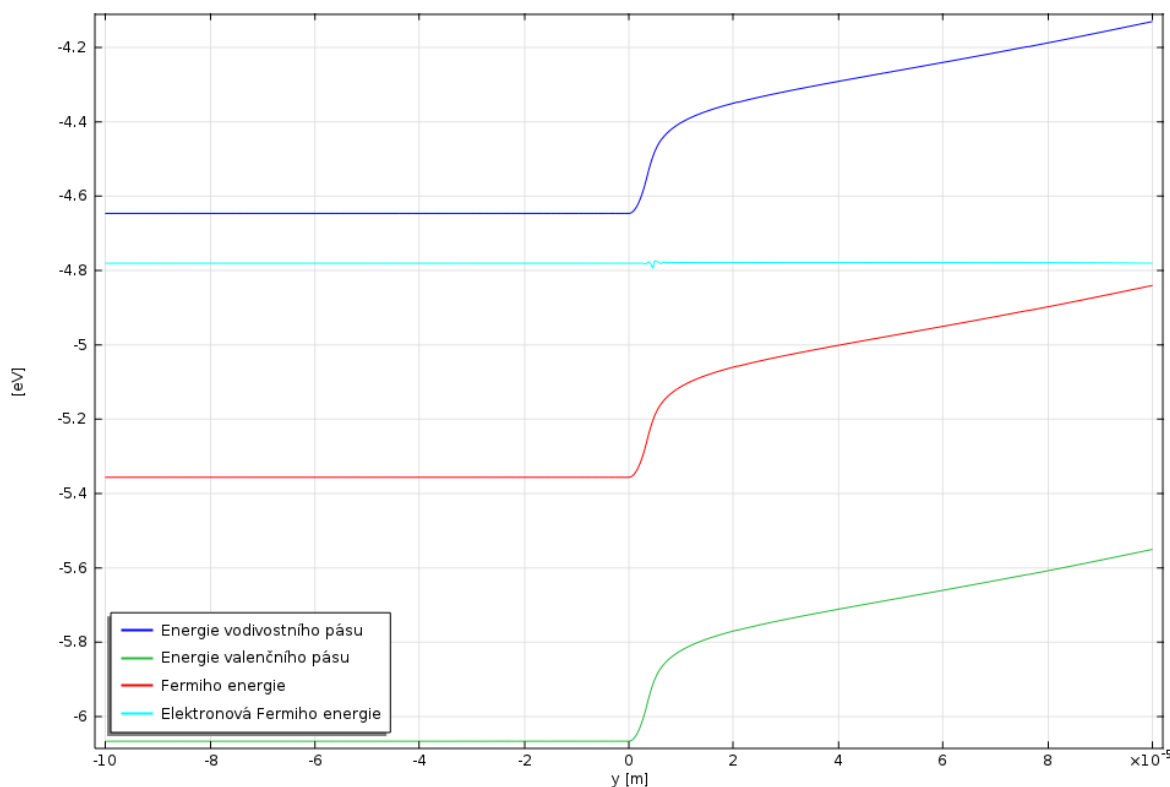


Obr. 70: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí 25 V



Obr. 71: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí -25 V

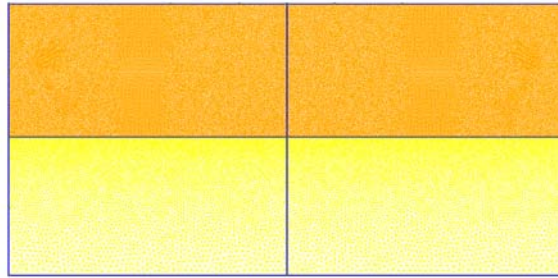
Nakonec byl ještě zobrazen energetický diagram polovodičového substrátu (Obr. 72), vztažený k pomocné středové úsečce rozdělující vertikálně strukturu polovodiče.



Obr. 72: Energetický diagram polovodičového substrátu

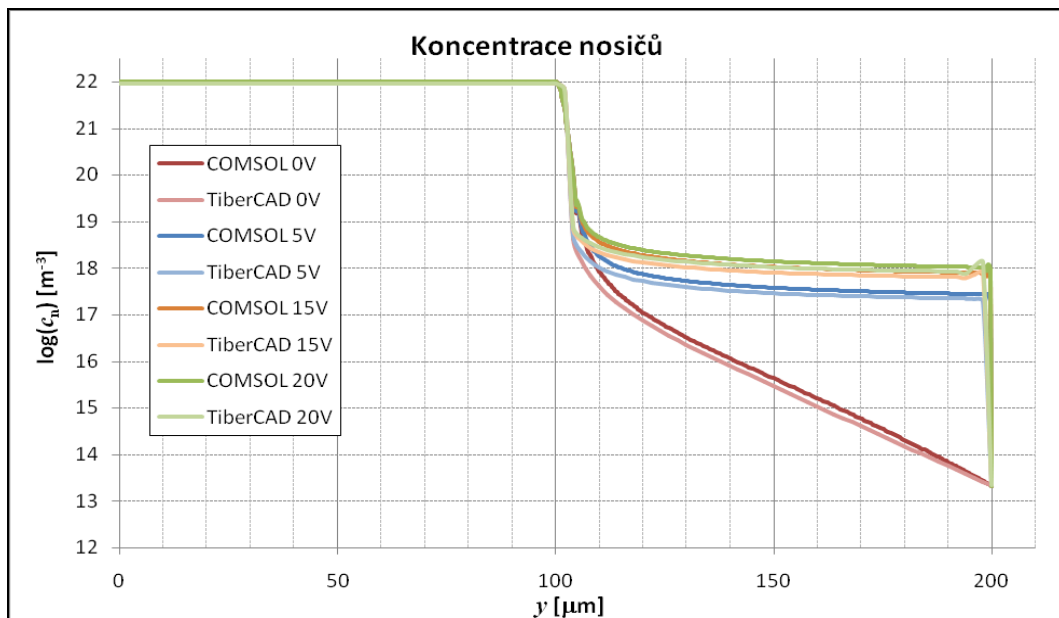
8.4.1 Srovnání výsledků s programem TiberCAD

Při realizaci návrhu koplanárního třívodičového vedení v programu TiberCAD bylo postupováno obdobně jako v kapitole 8.3.1. Byla vytvořena struktura koplanárního třívodičového vedení a její výpočetní síť (Obr. 73).

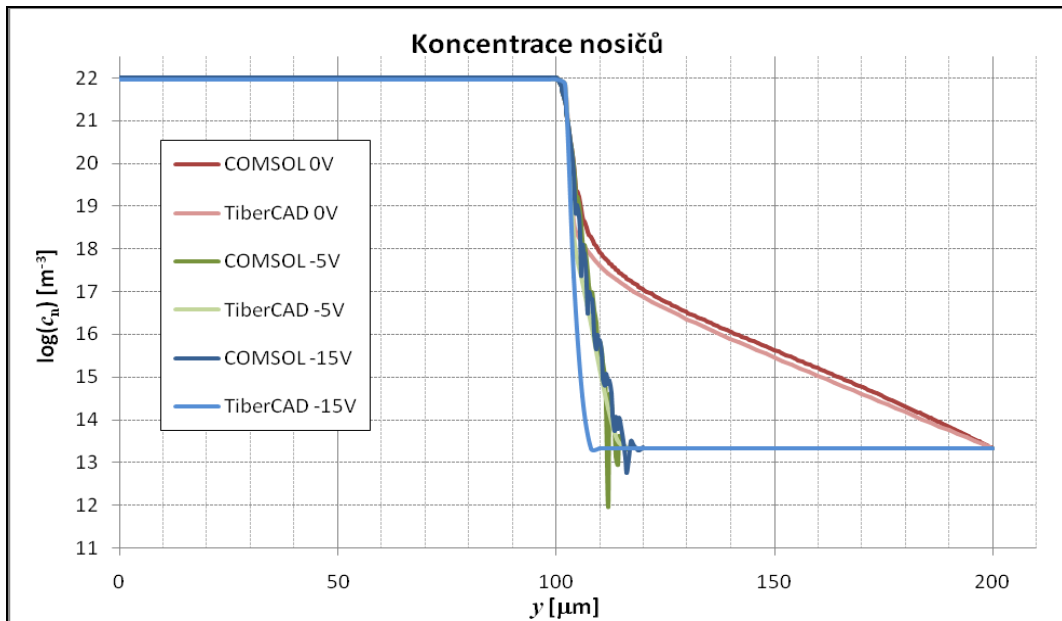


Obr. 73: Struktura a výpočetní síť koplanárního třívodičového vedení

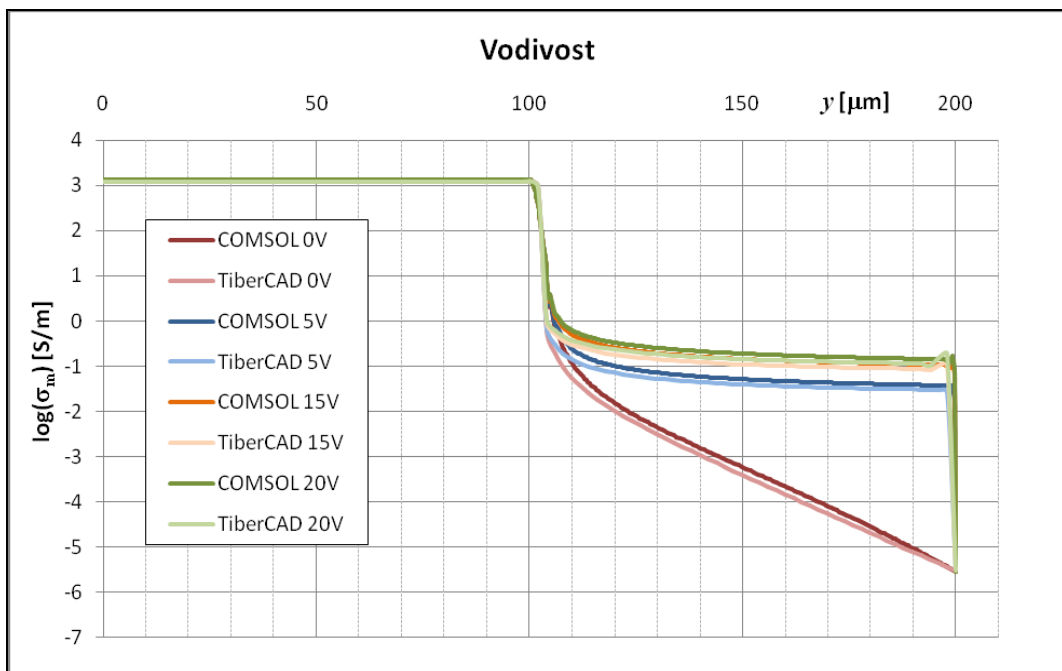
Při simulaci koplanárního třívodičového vedení v programu TiberCAD byl opět vzhledem k problému s výpočty v záporných napětích, rozsah napětí omezen na hodnotu -15 V až 25 V. Mezi oběma programy byly porovnávány výsledky závislosti koncentrace nosičů náboje c_n a vodivosti σ_m vyjádřené v logaritmické míře na přiloženém napětí (Obr. 74 až Obr. 77).



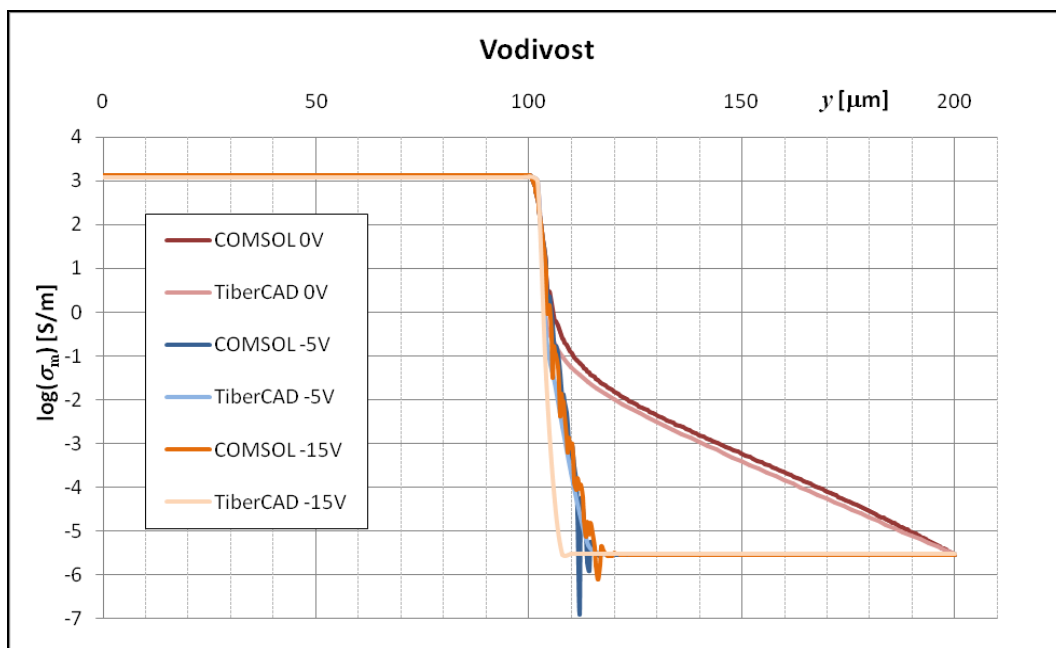
Obr. 74: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – kladné hodnoty napětí



Obr. 75: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – záporné hodnoty napětí



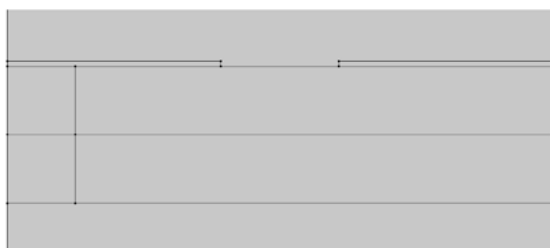
Obr. 76: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – kladné hodnoty



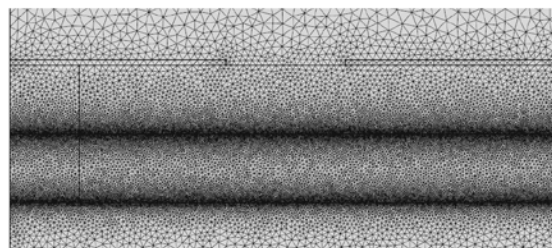
Obr. 77: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – záporné hodnoty

8.5 Štěrbínové vedení

Posledním simulovaným vedením bylo štěrbinové vedení. U tohoto modelu došlo oproti předchozím k několika změnám ve velikosti polovodičové struktury. Výška modelu polovodičového substrátu byla z důvodu potlačení nežádoucích vidů, které vznikaly ve struktuře s původními rozměry zmenšena na velikost $h = 0,1$ mm. Dále bylo pozměněno rozmístění ohmických kontaktů anoda - katoda, odpovídající štěrbinovému vedení. Výsledná struktura štěrbinového vedení je zobrazena na Obr. 78, výpočetní síť pak na Obr. 79, pro přehlednost je uveden pouze výřez tohoto vedení.

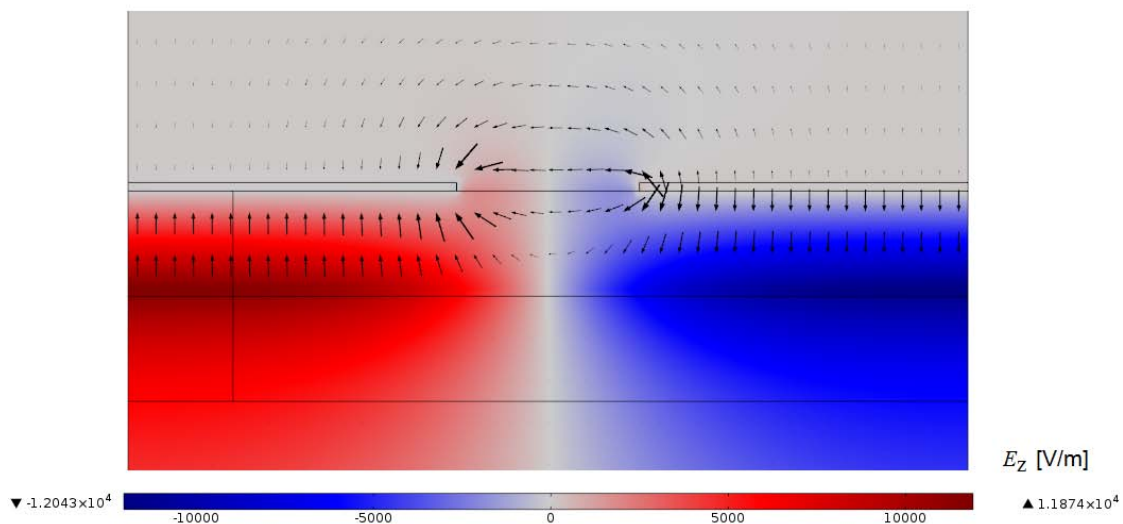


Obr. 78: Struktura štěrbinového vedení na polovodičovém substrátu



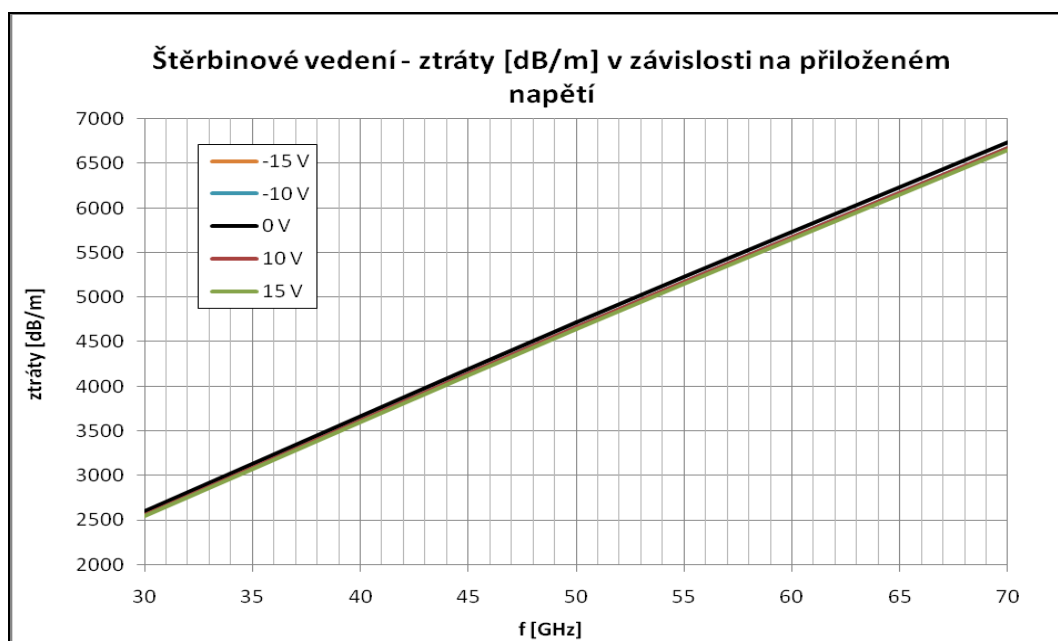
Obr. 79: Výpočetní síť štěrbinového vedení na polovodičovém substrátu

Na štěrbinovém vedení bylo zobrazeno rozložení elektrického pole na frekvenci 50 GHz (Obr. 80), barevnou škálou je zobrazena složka E_z elektrického pole kolmá k nákresně a šipkami vektorové pole se složkami E_x a E_y .

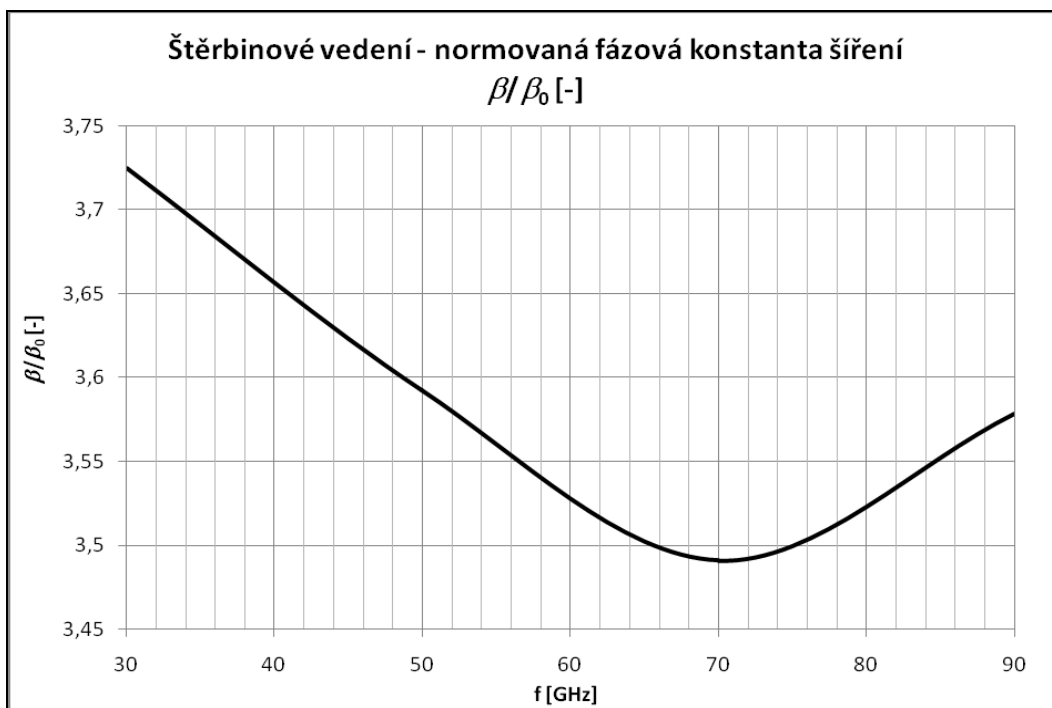


Obr. 80: Rozložení elektrického pole v průřezu štěrbinového vedení na polovodičovém substrátu

Dále na frekvencích 30, 50 a 70 GHz, při napětích přivedených na vedení (-15 až 15 V) byly určeny ztráty a normovaná fázová konstanta šíření. Závislosti ztrát na frekvenci při napětí přivedeném na štěrbinové vedení jsou uvedeny na Obr. 81 a normovaná fázová konstanta šíření na Obr. 82.

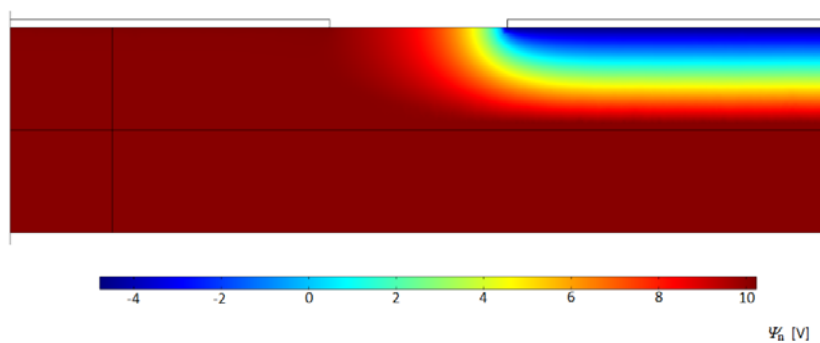


Obr. 81: Závislost ztrát na frekvenci při napětí přiloženém na štěrbinovém vedení

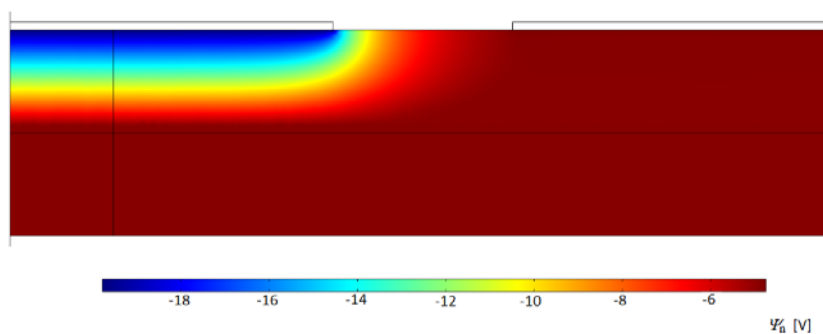


Obr. 82: Normovaná fázová konstanta šíření v štěrbinovém vedení

Dále bylo zobrazeno rozložení elektrického potenciálu Ψ_n (Obr. 83) a (Obr. 84) získaného pomocí rovnice (76), na průřezu struktury štěrbinového vedení

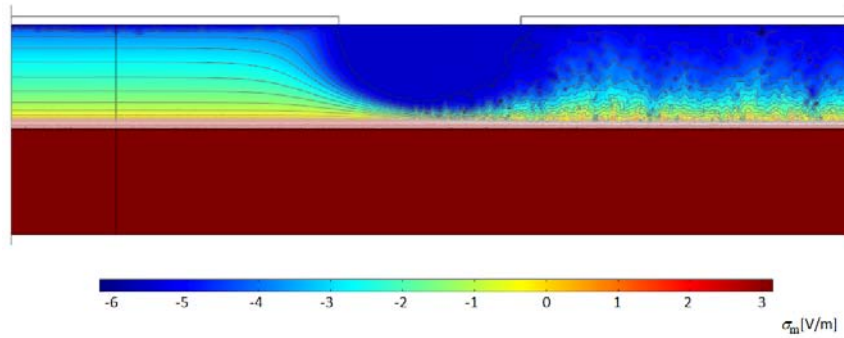


Obr. 83: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí 15 V

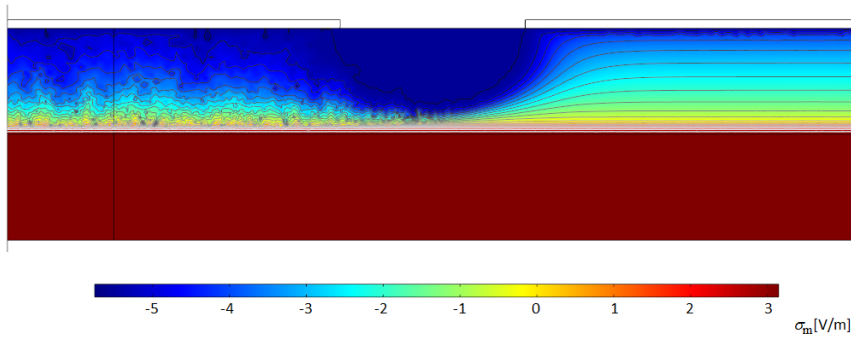


Obr. 84: Elektrický potenciál Ψ_n při napětí -15 V

a také zobrazeno rozložení elektrické vodivosti σ_m v logaritmicke míře (Obr. 85) a (Obr. 86) definované rovnicí (59) a závislost vodivosti na přiloženém napětí (viz. kapitola 8.5.1 Obr. 93 a Obr. 94).

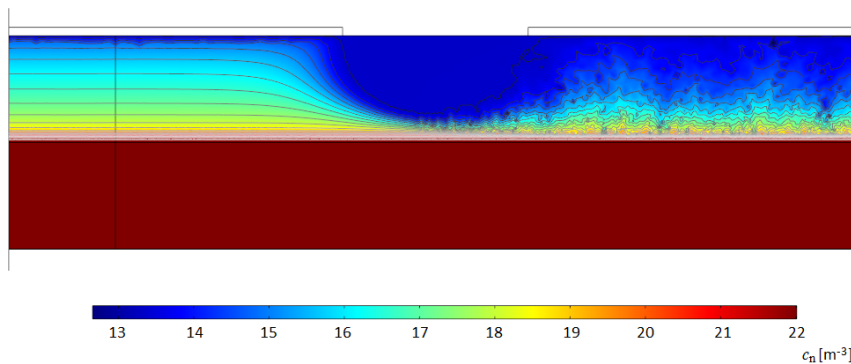


Obr. 85: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí 15 V

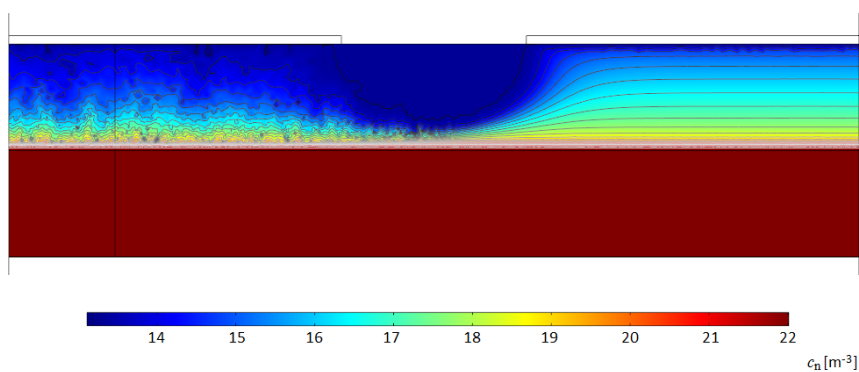


Obr. 86: Rozložení elektrické vodivosti σ_m při napětí -15 V

Obdobně bylo také v logaritmicke míře zobrazeno rozložení koncentrace nosičů náboje c_n (Obr. 87), (Obr. 88) a závislost koncentrace nosičů na přiloženém napětí (viz. kapitola 8.5.1 Obr. 91 a Obr. 92).

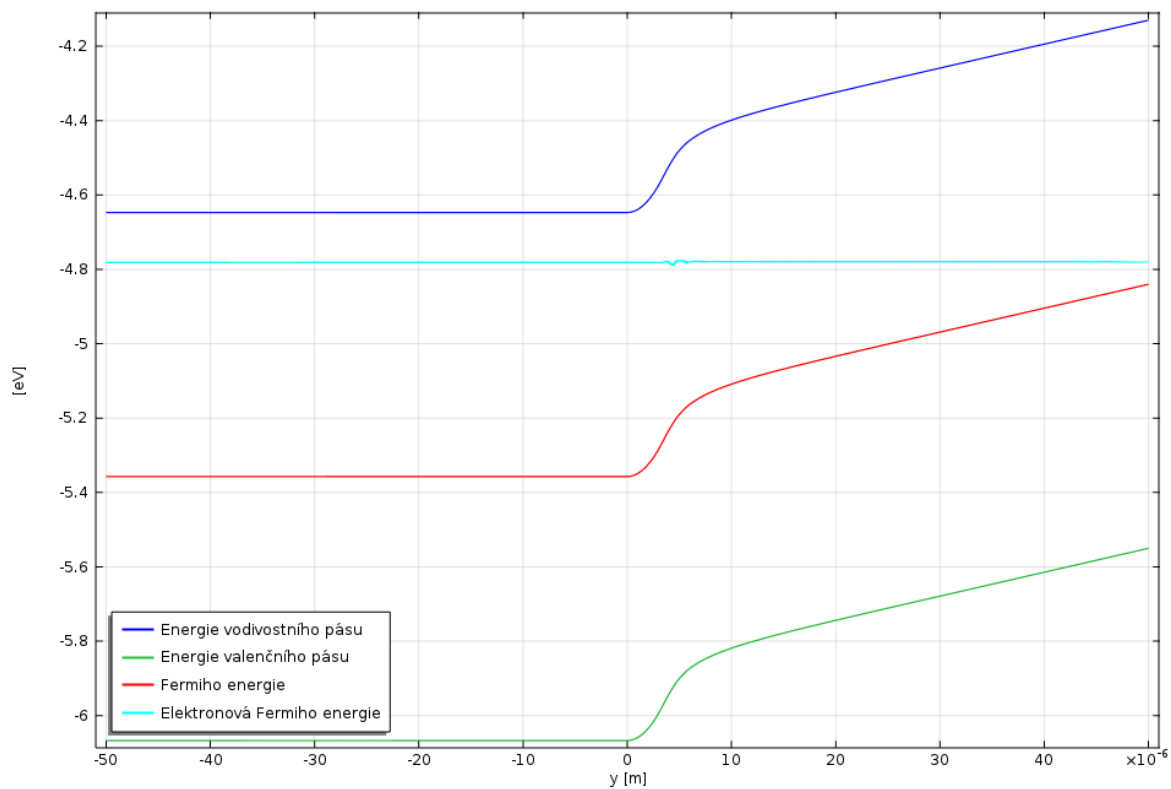


Obr. 87: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí 15 V



Obr. 88: Koncentrace nosičů náboje c_n při napětí -15 V

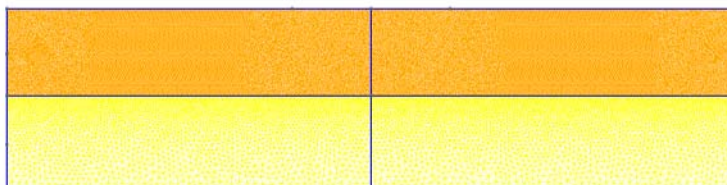
Na závěr byl také zobrazen energetický diagram polovodičového substrátu (Obr. 89) vztážený k pomocné úsečce rozdělující vertikálně strukturu polovodiče. V případě tohoto vedení, byla tato úsečka posunuta pod anodu štěrbinového vedení.



Obr. 89: Energetický diagram polovodičového substrátu

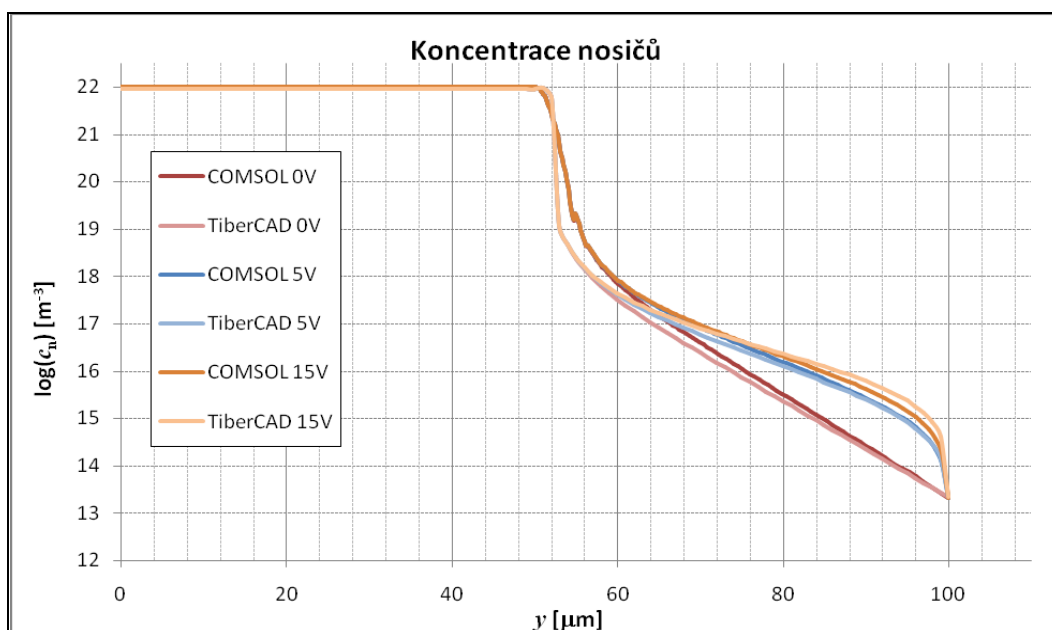
8.5.1 Srovnání výsledků s programem TiberCAD

V programu TiberCAD byl realizován model štěrbinového vedení na polovodičovém substrátu obdobně jako v kapitole 8.3.1, kdy byla vytvořena struktura štěrbinového vedení a její výpočetní síť (Obr. 90).

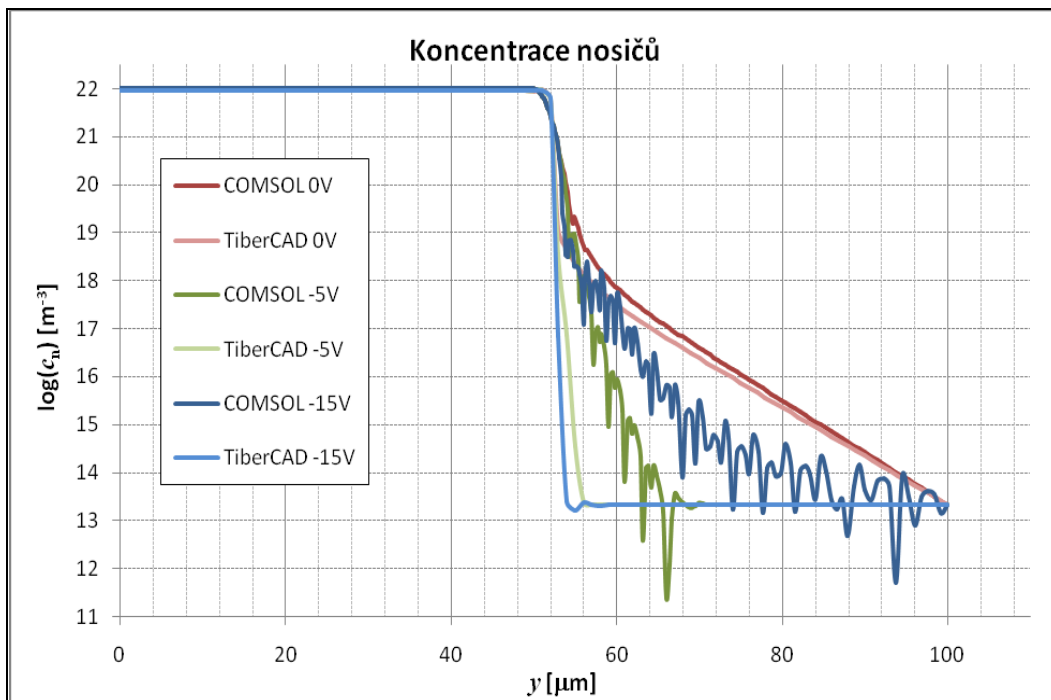


Obr. 90: Struktura a výpočetní síť štěrbinového vedení

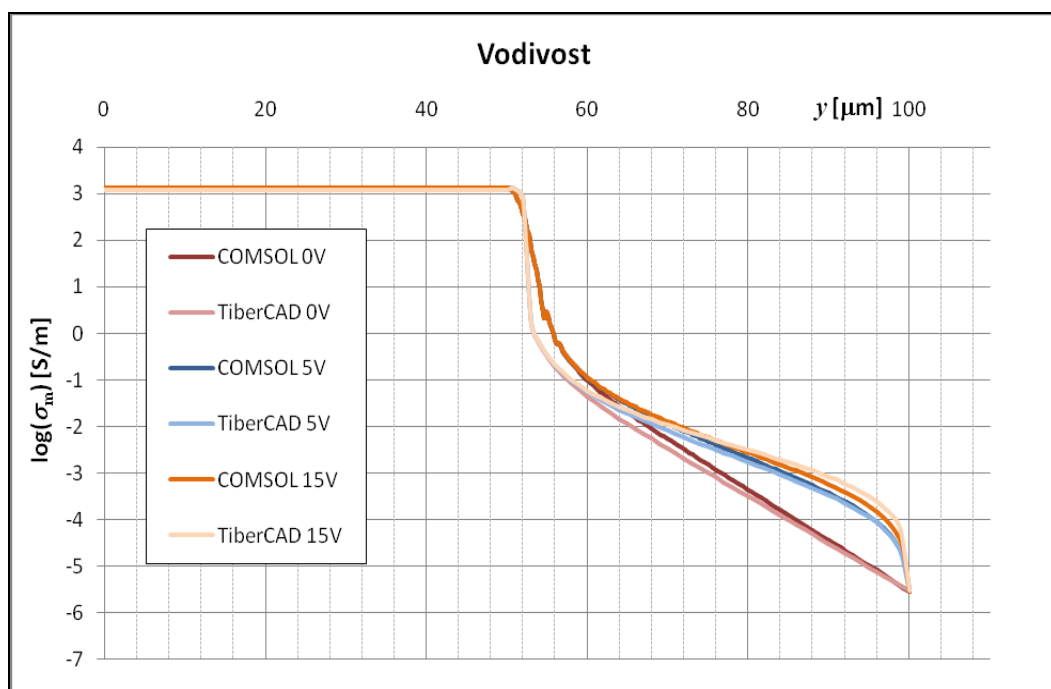
Při simulaci štěrbinového vedení programem TiberCAD byl vzhledem k problému s výpočty v záporných napětích, rozsah napětí omezen na hodnoty -15 V až 15 V. Mezi oběma programy byly porovnávány výsledky závislosti koncentrace nosičů náboje c_n a vodivosti σ_m na přiloženém napětí vyjádřené v logaritmické míře (Obr. 91 až Obr. 94).



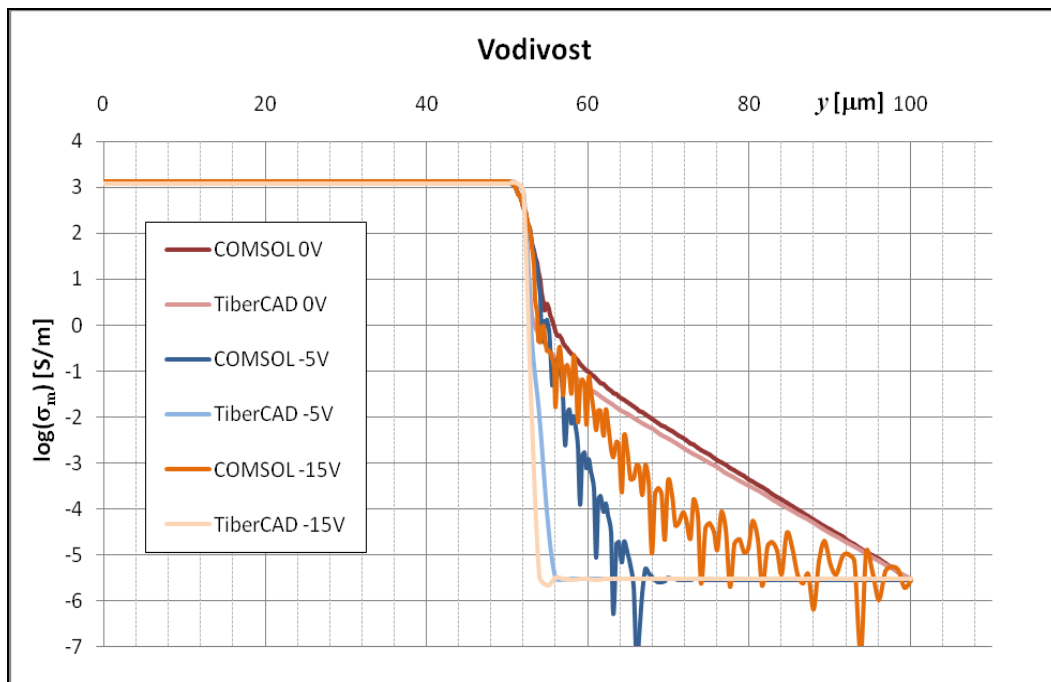
Obr. 91: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – kladné hodnoty napětí



Obr. 92: Průběh koncentrace nosičů náboje c_n na přiloženém napětí – záporné hodnoty napětí



Obr. 93: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – kladné hodnoty



Obr. 94: Průběh elektrické vodivosti σ_m na přiloženém napětí – záporné hodnoty

9 Závěr

Cílem první části semestrálního projektu na téma Planární přenosové vedení na polovodičovém substrátu, bylo seznámit se s typy planárních vedení. Druhy planárních vedení s jejich základním popisem se zabývá druhá kapitola. U vybraných typů planárních vedení, byly dále podrobněji popsány jejich vlastnosti a návrhové vztahy potřebné k jejich realizaci. Práce se zabývá zejména třemi základními typy vedení, a to nesymetrickým mikropáskovým vedením, štěrbinovým vedením a koplanárním třívodičovým vedením, která byla modelována a podrobena simulacím v programu COMSOL Multiphysics. Všechna vedení byla navržena pomocí návrhového programu TXLine Calculator 2003 pro přizpůsobení impedancí 50 Ω. Simulace jednotlivých vedení probíhala na frekvenčním rozsahu 1 – 100 GHz s krokem 5 GHz. Ve všech třech simulovaných vedeních se na tomto frekvenčním rozsahu vyskytoval pouze jeden mód šíření. Jediný problém se vyskytl u štěrbinového vedení, kdy pro nalezení požadovaného vidu, bylo nutné zadat v řešiči programu COMSOL Multiphysics více módů. Většina těchto vidů, byla ale vyvolána důsledkem vlastností stínícího vlnovodu, který simulované vedení obklopoval, a byla pro analýzu vedení bezvýznamná.

Druhá část práce se zabývá zejména modelováním polovodičového substrátu a jeho následném využití při simulaci planárních vedení z první části práce. Model polovodičového přechodu v programu COMSOL Multiphysics byl realizován s využitím Gaussovy funkce s šířkou PN přechodu 8 μm. Výsledná funkce N popisující tento přechod vykazuje jistou odchylku od funkce N použité programem TiberCAD, který používá strmý přechod.

Hodnoty dotací elektronů N_d a N_{di} byly zvoleny jako maximální možné s ohledem na výpočetní možnosti programů COMSOL a TiberCAD. Vysoká hodnota $N_d = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve spodní silně dotované vrstvě byla stanovena z důvodu požadované vyšší vodivosti na úkor vyšších ztrát ve vedení. Ze závislosti vodivosti a ztrát na hodnotě dotací elektronů N_d bylo zjištěno, že pro nižší ztráty by bylo vhodné volit hodnotu dotací vyšší než $N_d = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, v těchto případech, ale již polovodičová struktura vykazuje znaky degenerovaného polovodiče. Hodnota horní méně dotované vrstvy, byla původně stanovena jako hodnota intrinsické koncentrace v GaAs ($2,1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$). V průběhu simulací bylo ale zjištěno, že tato hodnota se pohybuje na hranici použitelnosti a nelze s ní úspěšně realizovat simulace modelovaného polovodiče, tato hodnota byla tedy stanovena na $N_{di} = 2,1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$.

Na vedeních byly určeny ztráty v závislosti na přiloženém napětí, které bylo nastavováno parametricky v rozsazích daných pro příslušná vedení. Dále byly ve vedení zobrazeny profily vodivosti a koncentrace nosičů náboje v závislosti na přiloženém napětí pro kladné a záporné hodnoty. Na všech vedeních byly také zobrazeny závislosti vodivosti a koncentrace nosičů vyjádřené v logaritmické míře na přiloženém napětí. Závislosti koncentrace nosičů a vodivosti vyjádřené v logaritmické míře na přiloženém napětí spočítané programem COMSOL, byly následně ověřeny pomocí specializovaného programu TiberCAD. Odchylka výpočtů v programu COMSOL od programu TiberCAD je dána použitou funkcí N definovanou v kapitole 8.1, charakterizující polovodičový přechod. Výsledky z programu COMSOL tedy víceméně souhlasí s výsledky získanými programem TiberCAD.

Seznam zkratek a použitých symbolů

- GaAs – Arsenid Gallia
HEM – hybridní elektromagnetická vlna
MMIC – Monolithic Microwave Integrated Circuit (monolitické mikrovlnné integrované obvody)
TE – transverzálně (příčně) elektrický
TEM – transverzálně (příčně) elektromagnetický
TM – transverzálně (příčně) magnetický
-
- c – rychlost šíření světla ve vakuu
 \mathbf{D} – vektor elektrické indukce
 \mathbf{E} – vektor elektrického pole
 \mathbf{H} – vektor magnetického pole
 k_0 – vlnové číslo
 \mathbf{n} – normálový vektor
 \mathbf{u} – vektor skupinové rychlosti
 ε_0 – permitivita vakua
 ε_r – relativní permitivita
 ε_{ref} – relativní efektivní permitivita
 μ_r – relativní permeabilita
 ρ_v – hustota volného náboje
 ω – úhlový kmitočet

Použitá literatura

- [1] SVAČINA, J. Mikrovlnná technika, SNTL, Praha, 1982, 218 s.
- [2] HOFFMANN, K. Planární mikrovlnné obvody, Učební texty FEL ČVUT, Praha, 2007, 145 s.
- [3] RAIDA, Z. a kol. Elektromagnetické vlny, vedení a antény – počítačové cvičení, Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno, 2011, 52 s.
- [4] SVAČINA, J. Hybridní mikrovlnné integrované obvody – přednášky předmětu MMIT, Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno, 2008.
- [5] GUPTA, K. C. et al. Microstrip lines and slotlines, Artech House, Boston, London, 1996, 560 s.
- [6] VANZURA, E. J., WEIL, C. M., WILLIAMS, D. F. Complex permittivity measurements of gallium arsenide using a high – precision resonant cavity, Proceeding of the 1992 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, s. 103 - 104, 1992.
- [7] SOKOL, V., VAJTR, J., HOFFMANN, K. Vizualizace elektromagnetického pole, Multimediální učebnice Katedry elektromagnetického pole ČVUT, Praha, 2003, dostupné z www <http://vizualizace.elmag.org/>
- [8] RAIDA, Z. a kol. Multimediální učebnice Elektromagnetické vlny - Mikrovlnná technika, 2010, dostupné z www www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php
- [9] SELBERHERR, S. Analysis and Simulation of Semiconductor Devices, Springer-Verlag, Wien, 1984, 296 s.
- [10] New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties, Physical properties of Gallium Arsenide, Electronic archive, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 1998-2001, dostupné z www <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/index.html>
- [11] SACCONI, F. et. al. TiberCAD User Manual, University of Rome „Tor Vergata“, Roma, 2008, 104 s.