

Милан М. Илић
Слободан В. Савић

МИКРОТАЛАСНА ЕЛЕКТРОНИКА

Академска мисао
Универзитет у Београду
Електротехнички факултет
Београд, 2016.

Милан М. Илић
Слободан В. Савић
МИКРОТАЛАСНА ЕЛЕКТРОНИКА
Прво издање

Рецензенти
др Антоније Ђорђевић
др Драган Олћан

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета
број 1184/3 од 6. септембра 2016. године ова књига је одобрена као
учбеник на Електротехничком факултету Универзитета у Београду

Издаје и штампа
АКАДЕМСКА МИСАО
Београд

Тираж 100 примерака

ISBN 978-86-7466-625-8

Предговор

Овај уџбеник је произашао из материјала припремљених за предавања из предмета Микроталасне електронике која је првопотписани аутор држао на Електротехничком факултету Универзитета у Београду од школске 2007/08. године до данас. Овај, нови, предмет аутор је оформио сагласно актуелним потребама наставе из области активних микроталасних кола на Електротехничком факултету у Београду.

Уџбеник је првенствено намењен студентима Електротехничког факултета у Београду који слушају предмет Микроталасна електроника. Он у потпуности обухвата градиво предвиђено за предавања и вежбе. Аутори се надају да ће уџбеник бити од користи и другим студентима, као и инжењерима и практичарима који имају додира са микроталасном техником.

Аутори се посебно захваљују професорки др Зоји Поповић, са Универзитета Болдер у Колораду, Сједињене Америчке Државе (Boulder, CO, USA) , на великој помоћи и обезбеђивању почетног материјала који је послужио као основа при формирању предмета Микроталасна електроника. Аутори се посебно захваљују за корисне сугестије и примедбе својим колегама и блиским сарадницима, професору др Антонију Ђорђевићу и ванредном професору др Драгану Олћану, као и студенту докторских студија мр инж. Бранку Буквићу. За подршку и мотивацију у раду на рукопису аутори се захваљују и осталим наставницима са Смера за микроталасну технику: професорима др Бранку Колунџији и др Дејану Тошићу, ванредном професору др Милки Потребих, доцентима др Марији Стевановић и др Миодрагу Тасићу и асистенту мр инж. Александри Крнети.

Београд, јуна 2016.

Аутори

Садржај

	Страна
1. Увод.....	1
2. Параметри расејања и мреже за прилагођење.....	3
2.1. Основни појмови у анализи микроталасних кола.....	3
2.2. Параметри расејања (S-параметри).....	4
2.2.1. Дефиниција S-параметара.....	6
2.2.2. T-параметри, A-параметри и везе између параметара.....	9
2.2.3. Померање референтних равни.....	12
2.2.4. Смитов дијаграм.....	14
2.2.5. Коефицијент стојећег таласа и неки важни параметри.....	18
2.3. Дијаграми тока сигнала.....	21
2.4. Једначине појачања снаге.....	22
2.5. Коефицијенти стојећег таласа на улазу и излазу појачавача.....	32
2.6. Мерење S-параметара.....	34
2.7. S-параметри транзистора.....	37
2.8. Мреже за прилагођење.....	40
2.8.1. Мреже са калемовима и кондензаторима и мреже са огранцима водова.....	41
Мреже за прилагођење са калемовима и кондензаторима (LC мреже).....	41
Мреже за прилагођење са огранком 50-омског вода.....	44
Мреже за прилагођење са огранком вода чија је дужина умножак $\lambda/8$	48
2.8.2. Пројектовање мрежа за прилагођење полазећи од номиналне импедансе.....	51
2.8.3. Мреже са микротракастим водовима.....	53
3. Транзистори.....	63
3.1. Значај, подела и историја полупроводника.....	63
3.2. Транзистори са ефектом поља.....	66
3.2.1. MESFET.....	67
3.2.2. HEMT.....	71
3.2.2.1. pHEMT.....	72
3.2.2.2. mHEMT.....	73
3.3. Биполарни транзистори.....	73
3.3.1. Конвенционални силицијумски транзистори.....	74
3.3.2. Транзистор са силицијум германијумском базом.....	81
3.3.3. HBT.....	82
3.4. Упоредне карактеристике транзистора.....	83
4. Појачавачи.....	85
4.1. Линеарни појачавачи.....	85
4.1.1. Стабилност.....	85
4.1.2. Појачање.....	97
Унилатералан транзистор.....	98
Билатералан транзистор.....	103

4.1.3. Кружнице константног коефицијента стојећег таласа.....	116
4.1.4. Кругови пресликавања улаз-излаз.....	120
4.2. Кола за поларизацију транзистора.....	123
4.3. Шум у микроталасним колима.....	129
4.3.1. Извори шума и динамички опсег.....	129
4.3.2. Термални шум.....	130
4.3.3. Еквивалентна температура шума.....	131
4.3.4. Мерење температуре шума.....	132
4.3.5. Фактор шума.....	133
Фактор шума пасивне мреже са два приступа.....	135
Фактор шума каскадно везаних компоненти.....	136
Мера шума.....	137
4.3.6. Кругови константног фактора шума.....	138
Пројектовање малошумних појачавача.....	140
Компромис између фактора шума, појачања и прилагођења.....	142
Вишестепени малошумни појачавачи.....	149
4.4. Широкопојасни појачавачи.....	149
4.4.1. Компензациона кола за прилагођење и балансни појачавачи.....	150
Усмерени спрежњаци и делитељи снаге у баланским појачавачима.....	151
Анализа рада балансног појачавача.....	152
Балансни појачавач са Вилкинсоновим дивајдером/комбајнером.....	153
4.4.2. Појачавачи са повратном спрегом.....	154
4.4.3. Појачавачи са расподељеним параметрима.....	163
4.5. Тјунинг појачавача.....	165
4.6. Ефикасност појачавача и механизми губитака.....	166
4.7. Нелинеарна изобличења, интермодулациона дисторзија и динамички опсег.....	167
Анализа са једним тоном (single tone).....	167
Анализа са два тона (two-tone).....	171
4.8. Појачавачи снаге.....	176
4.8.1. Карактеризација транзистора за велике сигнале.....	176
4.8.2. Конјуговано прилагођење за мале сигнале и прилагођење за максималну излазну снагу при великим сигналима.....	180
4.8.3. Пројектовање линеарних појачавача снаге.....	183
4.8.4. Појачавачи у класи А.....	186
Радна права и load-pull контуре.....	186
Паразитни ефекти и модификација load-pull контура.....	193
5. Осцилатори.....	199
5.1. Принцип рада осцилатора са негативном резистансом.....	199
5.2. Услов за настанак осцилација.....	202
5.3. Механизам настанка осцилација и стабилност осциловања.....	206
5.4. Снага осцилатора.....	208
5.5. Осцилатори са мрежама негативне резистансе са два приступа.....	211
Пресликавање кругова између излазне и улазне равни.....	218
Литература.....	221

1. Увод

Микроталасна техника је део електротехнике у коме се проучавају компоненте, уређаји и системи у опсегу учестаности од 300 MHz до 300 GHz. Таласне дужине у слободном простору које одговарају тим учестаностима су од 1 m до 1 mm. У оквиру микроталасне технике, Микроталасна електроника изучава активне компоненте, кола и системе.

Специфичност микроталасне електронике, као гране микроталасне технике, је та да су таласне дужине истог реда величине, па и мање, од димензија елемената микроталасних кола. Другим речима, микроталасна кола су електрично велика, па се за њихову анализу не може примењивати класична теорија електричних кола са концентрисаним параметрима, већ се морају урачунати ефекти простирања.

Савремена активна микроталасна кола углавном се заснивају на полупроводничким компонентама, мада се цеви још увек користе у неким случајевима. Примарно изучавана кола у овом уџбенику су линеарна активна кола, а акценат је на транзисторским појачавачима и на методама анализе и пројектовања активних кола коришћењем параметара расејања. С обзиром на то да се данас пројектовање активних кола у великој мери заснива на примени рачунара, у уџбенику је такав принцип пројектовања усвојен као доминантан. Међутим, иако постоје различити комерцијални пакети рачунарских програма који омогућавају ефикасно пројектовање помоћу рачунара, успешно коришћење тих пакета захтева добро познавање теорије микроталасне електронике.

Уџбеник Микроталасна електроника састоји се од увода и још четири поглавља. Друго поглавље, Параметри расејања и мреже за прилагођење, даје сажет опис параметара расејања, њихових особина и теорије њихове примене у анализи линеарних мрежа, и то претежно са једним и два приступа. У овом поглављу су посебно представљене и технике пројектовања једноставних кола за прилагођење са концентрисаним параметрима и са огранцима водова. Ово поглавље је преваходно намењено студентима који нису слушали предмет Микроталасна техника.

Треће поглавље, Транзистори, даје преглед транзистора, као основних модерних полупроводничких компоненти које се користе у активним микроталасним колима. Поглавље садржи описе основних типова брзих полупроводничких биполарних транзистора и транзистора са ефектом поља, њихове основне физичке особине, специфичности рада и ограничења.

Четврто поглавље, Појачавачи, по обиму је највеће поглавље у уџбенику и бави се, пре свега, пројектовањем линеарних појачавача методама заснованим на параметрима расејања. У оквиру ове теме изучавају се стабилност, појачање, прилагођеност, поларизација, шум, широкопојасност и подесивост (тјунинг). Додатно се изучавају и појачавачи снаге, односно ефикасност, механизми губитака, нелинеарна изобличења, велики сигнали и пројектовање појачавача снаге у класи А.

Пето поглавље, Осцилатори, бави се пројектовањем микроталасних осцилатора са негативном резистансом коришћењем линеарних техника. У оквиру овог поглавља се изучавају теорија осцилатора са негативном резистансом, механизми настанка осцилација и стабилност осциловања. Посебно се изучава пројектовање транзисторских осцилатора.

На крају уџбеника наведена је обимна литература која читаоцу може послужити за даље усавршавање.