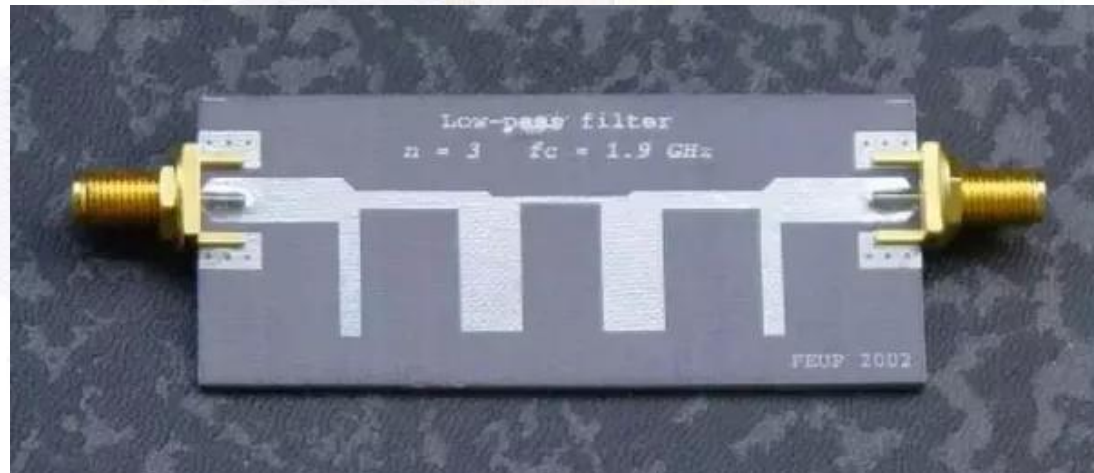
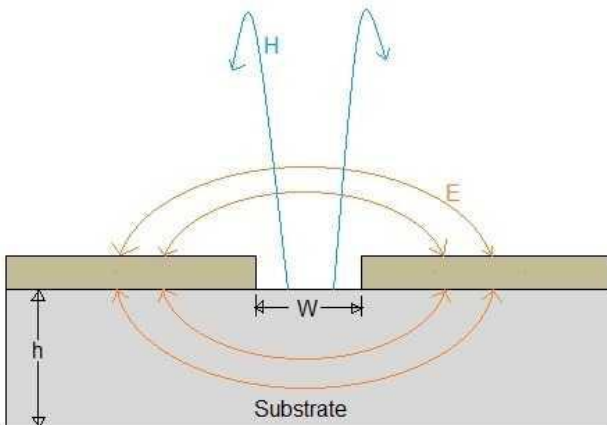
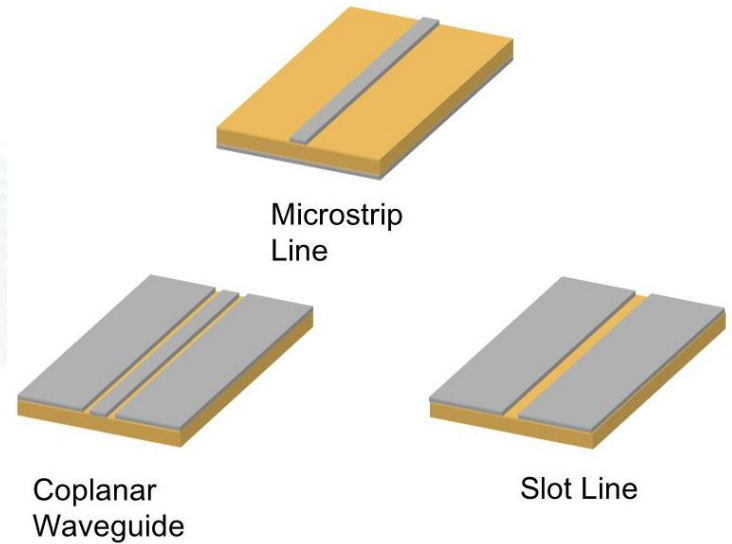


Планарни водови



Увод

- У микроталасној техници је тешко направити пасивна реактивна кола (филтре, мреже за прилагођење и слично) са дискретним елементима, због релативно великих димензија елемената у односу на таласну дужину
 - Кондензатор са обичним жицама као уводницима може се у микроталасима понашати као претежно индуктивни елемент, а калем се може понашати као кондензатор ако је радна учестаност виша од његове сопствене антирезонантне учестаности
 - Антирезонанција калема потиче од паразитних капацитивности између завојака

Увод

- Спојни проводници кола са дискретним елементима уносе паразитне реактансе, које могу доминирати при врло високим учестаностима
- Губици у дискретним реактивним елементима могу бити врло велики, па је фактор доброте резонантних кола начињених од дискретних елемената мали
- Да би се остварила квалитетна кола, дефинисаних карактеристика, у микроталасној техници се, стога, претежно користе кола са расподељеним параметрима, тј. кола начињена у техници водова и таласовода

Увод

- Класична кола са расподељеним параметрима захтевају прецизне механичке конструкције које су гломазне и скупе за серијску производњу
- Иако су таква кола и данас незаменљива при преносу великих снага (на пример, у излазним степенима снажних предајника, као код радара), када се захтевају велики фактори доброте (код резонатора), или у области милиметарских таласа, у савременој микроталасној техници доминирају кола израђена у техници штампаних веза (планарна кола, РСВ – *printed circuit boards*)
- Назив “планарна кола” потиче од тога што се проводници налазе у једној или више равни, на површи диелектричних носача (подлога, супстрата)

Увод

- Планарна кола се израђују захваљујући прецизној фотолитографској техници, која омогућава одличну резолуцију, односно мале димензије кола (толеранције су, типично, реда величине $10\mu\text{m}$)
- Поновљивост у серијској производњи је одлична, поузданост кола врло велика, а тежина мала, што је посебно битно за авионске и преносне уређаје

Увод

- На пасивна кола израђена у штампаној техници релативно се лако монтирају дискретни елементи (полупроводници, неречипрочни феритни елементи, посебно конструисани дискретни кондензатори и отпорници, и слично), па се све ово смести у металне кутије са изведеним прикључцима
 - Тиме се добијају
хибридна микроталасна интегрисана кола
- Планарна кола представљају и основу за израду монолитних микроталасних интегрисаних кола

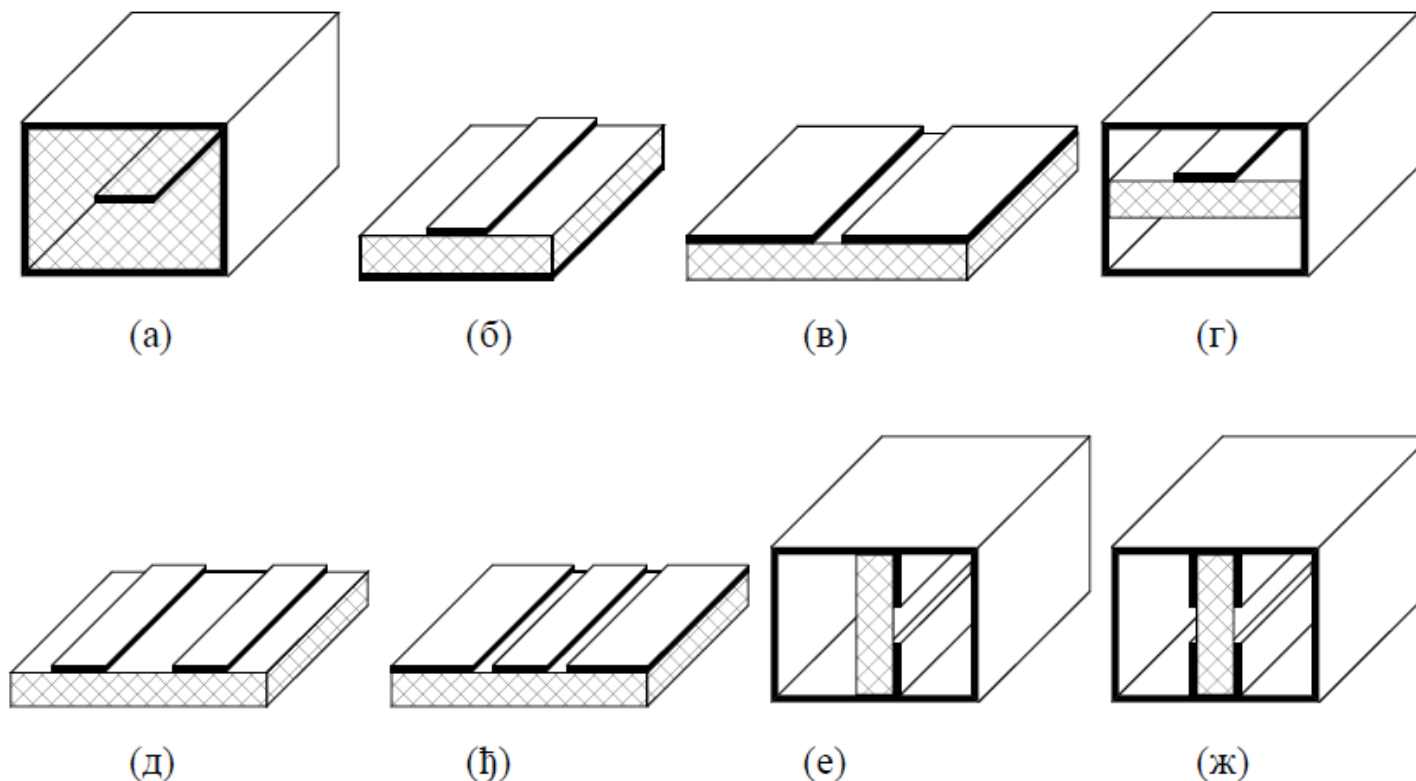
Увод

- У односу на класична микроталасна кола, планарна кола имају и два битна недостатка
 - Због малих растојања између проводника, лоше топлотне проводности и због оштрих ивица, максимална снага коју могу да издрже планарна кола је релативно мала
 - Због малих димензија проводника и због оштрих ивица, као и због присуства диелектричног носача, губици у планарним колима су знатно већи него у класичним колима
- Стога су остварљиви фактори доброте неоптерећених резонатора у техници штампаних кола мањи за ред величине него код класичних резонатора у техници коаксијалних водова, а за скоро два реда величине мањи него код таласоводних резонантних шупљина
- Из истог разлога се водови израђени у штампаној техници користе само за пренос сигнала на врло кратка растојања (реда величине неколико центиметара)

Увод

- Основу планарних кола чине планарни водови
- Код неких водова проводници су са различитих страна диелектричног носача на коме је начињен вод (као код микротракастог вода), код других су проводници само са једне стране (на пример, код копланарног вода)
- Код неких водова кућиште (оклоп) игра улогу једног проводника (на пример, код тракастог вода са издигнутом подлогом)

Увод



Слика 4.1. Скица попречних пресека неких планарних водова: (а) симетрични тракасти вод (strip line), (б) микротракасти вод (microstrip line), (в) прорезни вод (slot line), (г) тракасти вод са издигнутом подлогом (suspended substrate strip line), (д) копланарни вод (coplanar line), (ђ) копланарни таласовод, и (е) и (ж) прорезни вод у таласоводу (finline).

Увод

- По правилу, диелектрици планарних водова су нехомогени
- Изузетак је симетрични тракасти вод
 - Код њега се унутрашњи (“врући”) проводник израђује у техници штампаних кола са једне стране диелектричног носача
 - Овај носач се смешта у оклоп (масу), који представља уземљени проводник вода, а преко тог носача се поставља слој диелектрика истих особина као што их има носач
 - На тај начин се унутрашњи оклоп попуњава хомогеним диелектриком

Увод

- Планарни водови се примењују првенствено у области дециметарских и центиметарских таласа, мада продиру и у област милиметарских таласа (посебно, прорезни вод у таласоводу)
- Због нехомогености диелектрика, по планарним водовима се могу простирати само хибридни типови таласа, који имају лонгитудијалне компоненте (z -компоненте) и електричног, и магнетског поља
 - По водовима са хомогеним диелектрицима као основни типови таласа простиру се ТЕМ таласи

Увод

- Структура поља хибридних типова таласа зависи од учестаности (сетити се примера из поглавља 2)
- Код свих планарних водова, **осим код прорезног вода и прорезног вода у таласоводу**, при ниским учестаностима лонгитудијалне компоненте поља су знатно мање од трансверзалних
 - У том случају структура поља таласа личи на ТЕМ талас (квази-ТЕМ талас)
 - При нижим учестаностима особине планарних водова се могу приближно израчунати на основу квази-ТЕМ апроксимације (која ће детаљније бити разматрана)
 - При вишим учестаностима, међутим, квази-ТЕМ апроксимација не даје задовољавајуће резултате, и у анализи се морају узети у обзир и лонгитудијалне компоненте електричног и магнетског поља

Увод

- Строга теоријска анализа простирања таласа дуж планарних водова заснива се на нумеричким поступцима
- У неким једноставнијим случајевима анализа квази-ТЕМ таласа се може спровести конформним пресликавањем (помоћу функција комплексних променљивих), када се решење може добити у аналитичком облику (на пример, код копланарног вода са бесконачно дебелом подлогом)

Увод

- За инжењерску праксу је пожељно имати једноставне приближне формуле за прорачун најважнијих параметара планарних водова **(карактеристичне импедансе и таласне дужине при радној учестаности)**
- Ове формуле се могу наћи у литератури за неке планарне водове који су чести у пракси (на пример, за микротракасти вод, прорезни вод, копланарни вод и копланарни таласовод)
- Неке од ових формула ће бити приказане у наставку ...

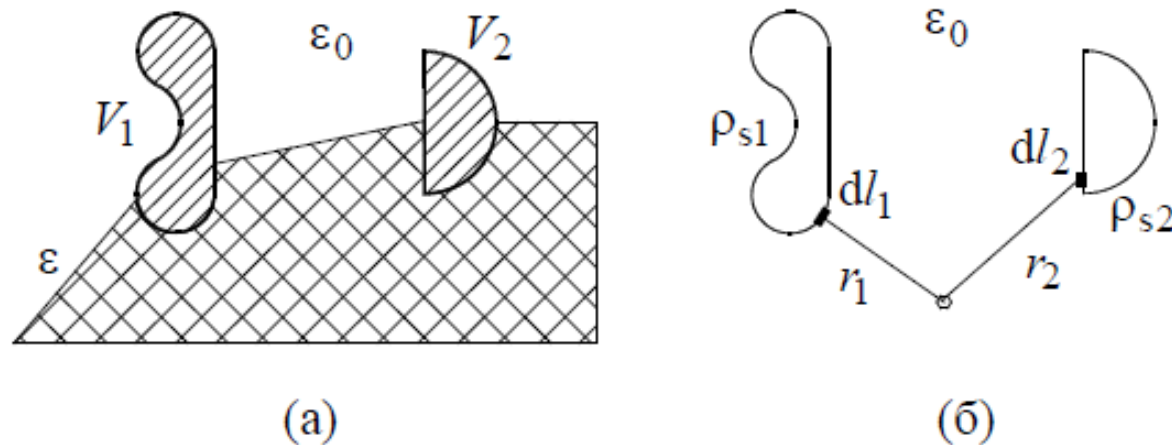
Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Квази-ТЕМ апроксимација простирања ЕМ таласа дуж водова са нехомогеним диелектриком заснива се на претпоставци да и електрично, и магнетско поље имају практично само трансверзалне компоненте
 - Односно, да су им лонгитудијалне компоненте занемарљиво мале
- Строгом теоријском анализом планарних водова, као и на основу резултата експеримената, показује се да је оваква апроксимација оправдана, ако учестаност није сувише висока, код свих планарних водова **осим код прорезног вода и прорезног вода у таласоводу**

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Код свих квази-ТЕМ таласа се (приближно) могу дефинисати напон и јачина струје на воду на исти начин као код правих ТЕМ таласа, а простирање се може анализирати једначинама телеграфичара, на основу подужне индуктивности, подужне капацитивности, подужне отпорности и подужне проводности вода
- При томе се параметри L' и C' рачунају као да је поље квазистационарно, а R' и G' се одређују пертурбационим методом
 - Разматраћемо само један поступак нумеричког одређивања подужне индуктивности и подужне капацитивности вода чији је попречни пресек приказан на следећој слици

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком



Слика 4.2. Скица (а) попречног пресека вода са нехомогеним диелектриком и (б) истог вода код кога је диелектрик вакуум.

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- За почетак, претпоставимо да је диелектрик вода хомоген (на пример, вакуум)
 - У електростатичком пољу наелектрисање је расподељено по површима проводника
 - Анализирани случај спада у класу дводимензионих електростатичких проблема, односно расподела наелектрисања не зависи од z -координате (z -оса је постављена паралелно изводницама вода)

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Уочимо један елемент површи првог проводника, у облику бесконачно дугачке траке ширине dl_1 , и сличан елемент површи другог проводника, ширине dl_2
- Нека су густине површинског наелектрисања на проводницима ρ_{s1} и ρ_{s2} , респективно
 - ρ_{s1} и ρ_{s2} су супротног знака
- Одаберимо dl_1 и dl_2 тако да уочени елементи носе наелектрисања иста по количини (а супротног знака), тј. нека важи $\rho_{s1}dl_1 + \rho_{s2}dl_2 = 0$
 - Два уочена елемента проводника представљају две паралелне, равномерно наелектрисане нити, са супротним наелектрисањима

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Потенцијал у околини ове две нити, дат је једначином

$$V = \frac{dQ'}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

где је $dQ' = \rho_{s1} dl_1 = -\rho_{s2} dl_2$, r_1 је одстојање тачке у којој се одређује потенцијал од елемента dl_1 , а r_2 је одстојање те тачке од елемента dl_2

–Формално, претходна једначина се може записати и у облику

$$V = -\frac{\rho_{s1} dl_1}{2\pi\epsilon_0} \ln(r_1) - \frac{\rho_{s2} dl_2}{2\pi\epsilon_0} \ln(r_2)$$

- Из овог излаза се може формално закључити да $-\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(r)$ представља потенцијал равномерно наелектрисаног влакна, јединичног подужног наелектрисуња

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- С обзиром на то да је збир подужних наелектрисања оба проводника вода једнак нули, узимајући у обзир све могуће парове елемената dl_1 и dl_2 , за потенцијал који стварају наелектрисања проводника вода у произвољној тачки може се писати

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^2 \oint_{C_i} \rho_{si} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$

- У претходном изразу \mathbf{r} је вектор положаја посматране тачке у односу на произвољно одабрани координатни почетак, \mathbf{r}' је вектор положаја елемента dl , а C_i представља контуру попречног пресека i -тог проводника

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Ако је потенцијал првог проводника V_1 , а другог V_2 , онда у свим тачкама на површи првог проводника мора бити $V(\mathbf{r})=V_1$, а у свим тачкама на површи другог проводника мора бити $V(\mathbf{r})=V_2$
- Замењујући у ова два услова $V(\mathbf{r})$ дато једначином

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^2 \oint_{C_i} \rho_{si} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$

добијају се две интегралне једначине по густинама површинских наелектрисања проводника (ρ_{s1} и ρ_{s2})

– Уочити да се густине ρ_{s1} и ρ_{s2} мењају идући дуж обима проводника

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Претходно добијене интегралне једначине се могу решити само нумерички (приближно) у општем случају
 - Најједноставније је да се контуре попречних пресека проводника апроксимирају полигоналним линијама, са великим бројем одсечака, и да се на сваком одсечку расподела наелектрисања апроксимира константом, која је, за сада, непозната
 - На тај начин се добија степенаста апроксимација расподеле наелектрисања
 - Нека су те константе ρ_{sn} , $n = 1, 2, \dots, N$, где је N укупан број одсечака за све проводнике вода

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

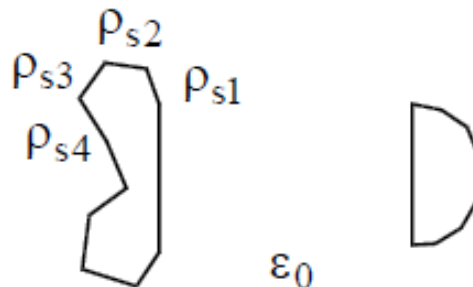
- Заменом претходне апроксимације у једначину

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^2 \oint_{C_i} \rho_{si} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$

добија се

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \rho_{sn} \oint_{C_n} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$

где је C_n одсечак полигоналне линије који одговара непознатој константи ρ_{sn}



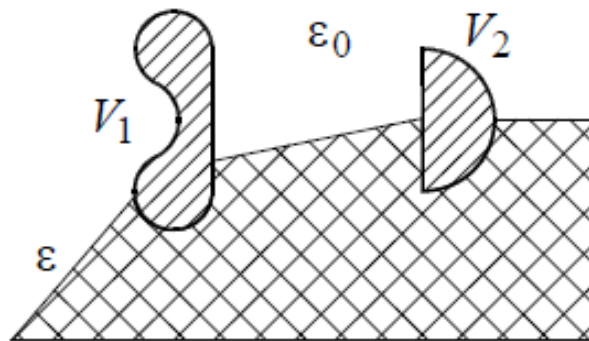
Слика 4.3. Апроксимација расподеле наелектрисања вода са слике 4.2б. 24/101

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Интегрални у једначини
$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \rho_{sn} \oint_{C_n} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$
 могу се израчунати експлицитно, па се потенцијал $V(\mathbf{r})$ у било којој тачки може експлицитно изразити у зависности од константи ρ_{sn}
 - Постављајући услове да је $V(\mathbf{r})$ једнако потенцијалу одговарајућег проводника (V_1 , односно V_2), у N тачака које се налазе на срединама одсечака, добија се систем од N линеарних једначина по непознатим константама, који се може нумерички лако решити (на пример, Гаусовим методом елиминације)
 - Када су познате ове константе, може се израчунати укупно наелектрисање сваког проводника, а одатле и подужна капацитивност вода

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

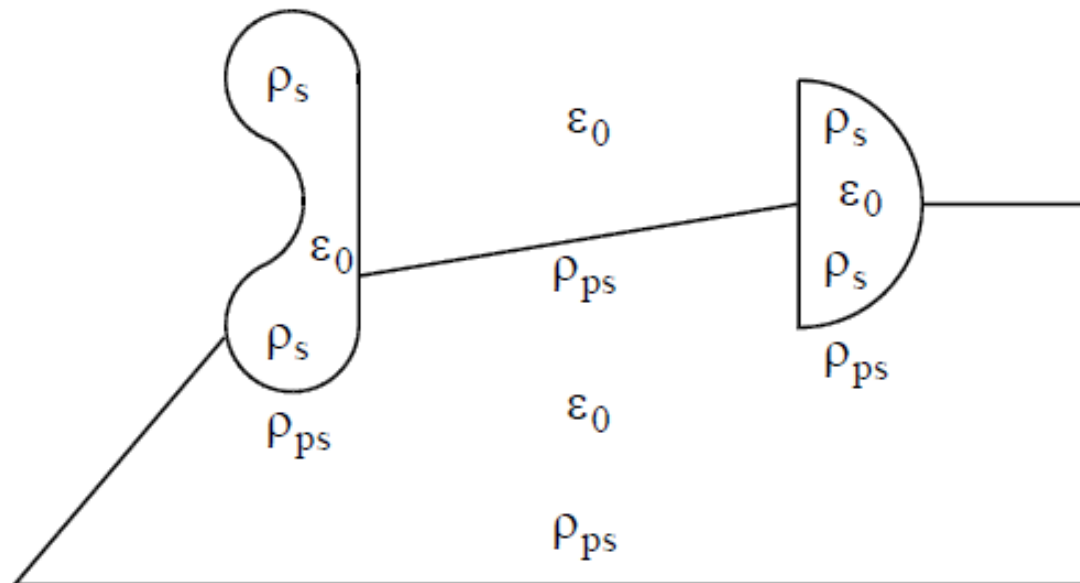
- Ситуација је нешто сложенија када се проводници налазе у диелектрику који се састоји од неколико хомогених делова, као што је приказано на слици



- Из електростатике је познато да се комад диелектрика може заменити еквивалентним везаним наелектрисањима, која се налазе у вакууму, а да се електрично поље (па тиме и потенцијал) не промени ни у једној тачки

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- У нашем случају постоје само површинска везана наелектрисања на граничним површима диелектрика, јер су диелектрици, по претпоставци, хомогени – Тако се добија еквивалентни систем приказан на слици



Слика 4.4. Систем еквивалентан систему са слике 4.2а.

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- За разлику од претходног случаја, када су проводници били у вакууму, сада су непозната слободна наелектрисања проводника и везана наелектрисања на границама диелектрика
- У овом систему и једна, и друга наелектрисања су површинска и налазе се у вакууму

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- На граничним површима проводника и вакуума у оригиналном систему постоје само слободна наелектрисања
- На границама два диелектрика, или на границама диелектрика и вакуума у оригиналном систему, постоје само везана наелектрисања, а на границама проводника и диелектрика постоје обе врсте наелектрисања
 - Уведимо густину укупног наелектрисања $\rho_{ts} = \rho_s + \rho_{ps}$, где је ρ_{ps} површинска густина везаних наелектрисања
 - На неким површима постоји само једна врста наелектрисања (ρ_s или ρ_{ps}), а на неким обе
 - У еквивалентном систему можемо сада посматрати то укупно наелектрисање, у вакууму

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

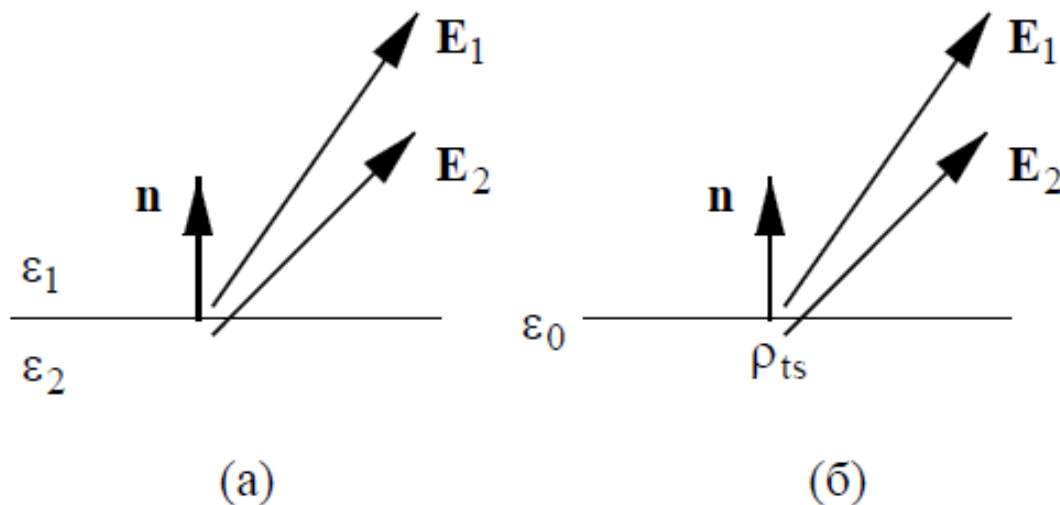
- На површима у еквивалентном систему које одговарају површима проводника електростатички потенцијал $V(\mathbf{r})$ је једнак потенцијалу проводника (V_1 , односно V_2)
 - Потенцијал је сада одређен изразом

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^M \oint_{C_i} \rho_{tsi} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$

- где M представља укупан број свих површи проводника и граничних површи диелектрика, а C_i контуру тих површи
- Захтевајући да је $V(\mathbf{r})$ једнако потенцијалу одговарајућег проводника, добијају се две интегралне једначине за густину укупног наелектрисања
 - Међутим, то сада није довољно за решавање проблема, јер се непозната наелектрисања налазе не само на површима проводника, већ и на граничним површинама диелектрика

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Додатне једначине се могу поставити на основу граничних услова за нормалне компоненте вектора електричне индукције (\mathbf{D}) на граничним површима диелектрика



Слика 4.5. Уз граничне услове за раздвојну површ два диелектрика.

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- За раздвојну површ два диелектрика (или диелектрика и вакуума) у оригиналном проблему важи гранични услов $\epsilon_1 \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{n} - \epsilon_2 \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{n} = 0$, јер на површи нема слободних наелектрисања
- У еквивалентном систему, у коме је диелектрик замењен својим везаним наелектрисањима, електрично поље је исто као у оригиналном систему, **али је електрична индукција (вектор \mathbf{D}) другачија**
- За еквивалентни систем важи гранични услов $\epsilon_0 \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{n} - \epsilon_0 \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{n} = \rho_{ts}$, где је уместо густине везаног наелектрисања замењена густина укупног наелектрисања ($\rho_{ts} = \rho_{ps}$)
- Комбиновањем ових једначина добија се $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{n} \left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) = \frac{\rho_{ts}}{\epsilon_0}$

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Када се у претходну једначину замени $\mathbf{E}_1 = -\text{grad}V(\mathbf{r})$, где је \mathbf{E}_1 поље са горње стране граничне површи, и $V(\mathbf{r})$ изрази из једначине

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^M \oint_{C_i} \rho_{tsi} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl$$

добива се интегрална једначина за густину укупног наелектрисања

–Постављајући сличне једначине за све граничне површи диелектрика, и придодајући их једначинама на основу услова за потенцијал, добија се довољан систем интегралних једначина

- Из овог система се расподела укупног наелектрисања може одредити нумеричким поступцима, слично као у случају када су проводници вода смештени у вакууму

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Када се тако одреди расподела укупног наелектрисања, потребно је још на основу ње израчунати густину слободног наелектрисања, како би се из тог резултата израчунало укупно слободно наелектрисање проводника и капацитивност
- Густина слободног наелектрисања се једноставно добија на основу везе $\rho_{ts} = \rho_s \epsilon_0 / \epsilon$, која важи за граничну површ проводника и диелектрика пермитивности ϵ
- На основу претходне анализе може се одредити подужна капацитивност било каквог вода са диелектриком који се састоји из више хомогених делова

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Показаћемо сада да се прорачун подужне индуктивности вода са нехомогеним диелектриком своди на прорачун подужне капацитивности система са хомогеним диелектриком, за чији прорачун је већ изложена процедура
- Као што је раније показано, код вода са хомогеним диелектриком важи релација

$$L' = \frac{\epsilon\mu}{C'}$$

на основу које се може израчунати L' када је познато C'

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Претпоставимо да диелектрик вода има свуда пермитивност μ_0 (тј. да је хомоген у магнетском погледу), иако му пермитивност није иста у свим тачкама попречног пресека
- Претпоставимо да су и проводници **савршено проводни**
 - У временски променљивом пољу, због површинског ефекта, постоје струје само по површима проводника
 - Те струје су аксијалне
 - По ТЕМ апроксимацији магнетско поље има практично само трансверзалну компоненту, па на основу граничног услова струје имају само z -компоненту
 - С обзиром на то да је, при ниским учестаностима, таласна дужина много већа од попречних димензија вода, јачина струје се врло споро мења дуж вода
 - У граничном случају када учестаност тежи нули, јачина струје је сигурно константна дуж вода без губитака
 - Стога се, приближно, при прорачуну подужне индуктивности може узети да густина струје не зависи од z

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Пошто је јачина струје временски променљива, у воду се индукује електрично поље, односно јавља се електромоторна сила електромагнетске индукције
- С обзиром на то да је вод униформан и јачина струје иста у сваком попречном пресеку вода, индуковано електрично поље \mathbf{E}_{ind} је константно дуж вода
 - Индуковано електрично поље је одређено магнетским вектор-потенцијалом, а овај потенцијал се може изразити преко површинских струја вода као

$$\mathbf{E}_{\text{ind}}(\mathbf{r}) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^2 \oint_{C_i} \mathbf{J}_{si} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl \quad (-j\omega)$$

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- У претходном изразу се не јавља пермитивност диелектрика, па тај израз важи и за вод код кога је диелектрик вакуум
 - Како индуковано електрично поље одређује расподелу струје на површи савршеног проводника у временски споро променљивом пољу, излази да је **расподела струје код вода са нехомогеним диелектриком иста као код вода са хомогеним диелектриком** (на пример, вакуумом)
 - Ако је C_0' подужна капацитивност еквивалентног вода (код кога је диелектрик вакуум), онда је

$$L' = \frac{\epsilon_0 \mu_0}{C_0'}$$

Основи квази-ТЕМ анализе водова са нехомогеним диелектриком

- Према томе, подужна индуктивност вода се може добити из подужне капацитивности истог вода када се уклоне сви диелектрици
 - Проблем одређивања подужне индуктивности се своди на решавање електростатичког проблема
- Претходна анализа је само приближна, али даје врло поуздане резултате при нижим учестаностима
 - Граница важења квази-ТЕМ апроксимације зависи од облика и димензија планарног вода

Особине подлога за планарне водове

- Планарни водови се израђују на различитим подлогама, које се могу сврстати у две групе:
 - Прву групу чине подлоге на бази **тефлона и других органских материјала**, које, по правилу, имају релативну пермитивност у опсегу од око 2,1 до 2,7
 - Неке од ових подлога се мешају и са керамичким материјалима, тако да могу имати и велике релативне пермитивности (око 10)
 - Ове подлоге се производе са већ налепљеним металним (бакарним) фолијама, са једне или обе стране
 - Фолије могу бити нанете и електролитичким поступком
 - Фолије се нагризају фотопоступком, тако да остаје само потребна метализације (на пример, траке водова)

Особине подлога за планарне водове

– Друга група подлога је на бази **неорганских материјала (обично керамике)**, и има релативну пермитивност типично између 6 и 10

- На ове материјале метализацију наноси сам корисник, техником танкослојних или дебелослојних филмова
 - Танкослојна техника се састоји у напаравању метализације (злата), па се метализација нагриза фотопоступком, као код тефлонских подлога
 - Дебелослојна техника се састоји у nanoшењу пасте која садржи метал само на потребним местима, кроз посебан застор, па се онда, загревањем, паста активира тако да се ствара метализација
- Подлоге на бази тефлона су чешће, механички се лакше обрађују од керамичких подлога, отпорније су на ударе и вибрације, али имају веће губитке, слабију резолуцију штампаних кола и слабију термичку проводност

Особине подлога за планарне водове

Таблица 4.1. Особине неких подлога за израду планарних водова.

Подлога	Дебљине (mm)	ϵ_r	1000 tg δ при 10 GHz	Својства
Чист тефлон		2,10	0,4	Мек и скуп
Тефлон ојачан стакленом тканином	0,1–12	2,17–2,62	0,9–2,2	Механички јак, изражени губици
Тефлон ојачан микрофибер стакленим влакнима	0,1–0,2	2,17–2,40	0,9–1,5	Скуп
Тефлон ојачан кварцом		2,47	0,6	Скуп
Тефлон пуњен керамичким прахом		6,0	1,8	Изражени губици
Тефлон пуњен керамичким прахом	0,2–1	10,2	2	Изражени губици
Чист полистирен	0,8–6	2,53	0,5	Јефтин, не подноси лемљење
Полистирен ојачан стакленим влакнима	0,2–6	2,62	1	Јефтин, не подноси лемљење
Полистирен ојачан кварцом		2,65	0,5	Јефтин, не подноси лемљење
Полистирен пуњен керамичким прахом		3–15	0,5–1,5	Јефтин, не подноси лемљење

Особине подлога за планарне водове

Подлога	Дебљине (mm)	ϵ_r	1000 tg δ при 10 GHz	Својства
Чист полиолефин	0,2–3	2,32	0,5	Механички слаб
Полиолефин ојачан стакленим влакнима		2,42	1	Механички слаб
Полифенилен оксид		2,55	1,6	Механички слаб
Силицијумске смоле пуњене керамичким прахом	1,6–5	3–25	0,5–5	Нехомогене, велики губици
Берилијум оксид (BeO)		6,1–6,6	0,1	Отрован
Алуминијум оксид (Al ₂ O ₃)		9,6–10,3	0,1–0,4	
Кварц (SiO ₂)		3,8	0,1	За милиметарске таласе
Лискун		7,5	2	
Галијум арсенид (GaAs)		12,3	1,6	За монолитна интегрисана кола
Силицијум		11,7	5	Велики губици
Сафир		9–11,7	0,1	За хибридна интегрисана кола
FR-4	0,2–4	4–5	20–30	Велики губици
Rogers RO3035	0,13–1,5	3,5±0,05	1,7	Мали губици, применљив до 40 GHz

Особине подлога за планарне водове

- Тефлонске подлоге ојачане стакленим влакнима се данас практично једине користе од свих подлога са малом релативном пермитивношћу
 - Тефлон ојачан стакленим влакнима (тканином или кратким, хаотично распоређеним влакнима) има одлична механичка својства (стабилност димензија, издржљивост), хемијски је изузетно отпоран, издржава велики распон температура (од -27°C до $+260^{\circ}\text{C}$), а на њему се може лако лемити
 - Тефлон је термички компатибилан са бакром (коэффициенти термичког ширења су им слични), тако да ретко долази до одлепљивања бакра при променама температуре
- Друге сличне подлоге (на бази полистирена или полиолефина) издржавају много ниже температуре (до око 110°C) и термички нису добро компатибилне са бакром

Особине подлога за планарне водове

- Керамичке подлоге се користе првенствено тамо где је потребна врло прецизна штампа, мали диелектрични губици (велики фактори доброте), као и тамо где је потребно добро одвођење топлоте (на пример, код снажних полупроводничких активних елемената)
 - Израда кола на оваквим подлогама је скупа, пре свега због механичке обраде (посебно, при бушењу рупа и њиховој метализацији у циљу прављења спојева кроз подлогу)
 - Проблем представља и скидање златне метализације (одлепљивање са подлоге) при лемљењу, због чега се морају користити посебни лемови на бази индијума и олова

Особине подлога за планарне водове

- Подлоге на бази тефлона пуњеног керамичким материјалима (оксидом титана) у неким применама потискују керамичке подлоге, мада имају веће губитке и слабију термичку проводност
 - У циљу механичког ојачања, ове подлоге се, фабрички, лепе за дебље алуминијумске носаче (дебљине реда величине неколико милиметара), које истовремено служе као метализација са једне стране (са друге стране је бакарна фолија)

Особине подлога за планарне водове

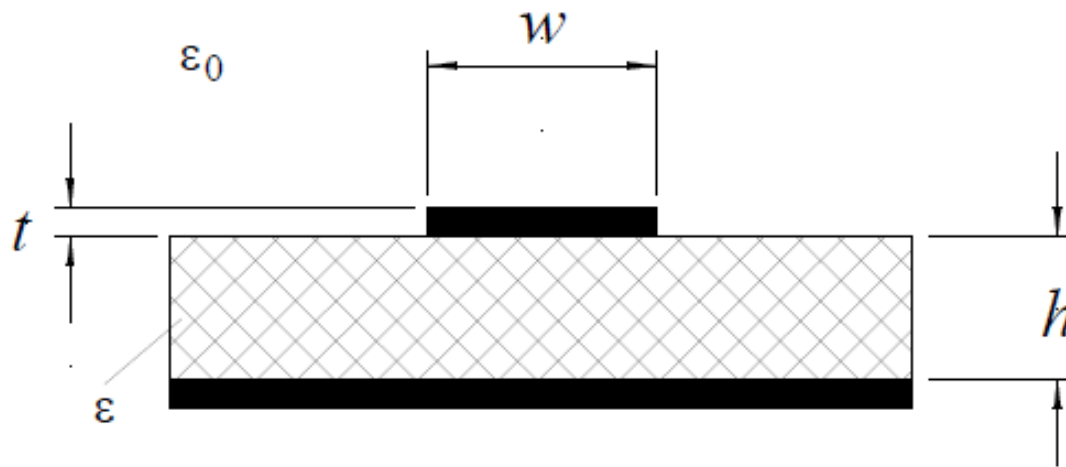
- Због своје ниске цене, за комерцијалне примене при нижим учестаностима користи се **FR-4** (код нас познат и под комерцијалним именом **витропласт**), упркос великим диелектричним губицима
 - Користи се и за израду вишеслојних штампаних плоча аналогних и дигиталних кола, укључујући и рачунаре
 - Развијене су и технике вишеслојних штампаних кола на бази керамичких материјала (LTCC) које омогућавају висок степен интеграције и израду пасивних компоненти најразличитијих облика, који превазилазе планарне облике и приближавају се тродимензионим структурама

Особине подлога за планарне водове

- У претходно приказаној табели наведене су и особине полупроводника (галијум-арсенид и силицијум), као и сафира, који се примењује у изради микроталасних интегрисаних кола
- Кварц се често примењује за милиметарске таласе, јер се од њега могу израдити врло танке опне
- Тангенс угла губитака диелектричних подлога расте са порастом учестаности
 - Тако, на пример, за типичну подлогу од тефлона са стакленом тканином, $\text{tg } \delta$ је 0,0005 при 1 GHz, 0,0009 при 10 GHz и 0,0015 при 20 GHz

Прорачун планарних водова

- Строга анализа планарних водова, по правилу, захтева извесне апроксимације, или примену нумеричких метода



Слика 4.6. Скица микротракастог вода.

Прорачун планарних водова

- На пример, код микротракастог вода, у пракси је ширина траке (w) реда величине дебљине подлоге (h), тако да се ивични ефекти не могу занемарити, односно капацитивност вода се не може одредити као код плочастог кондензатора
 - Подужна капацитивност је увек већа од резултата добијеног занемаривањем ивичних ефеката ($C' > \epsilon w/h$)
 - У анализи се најчешће занемарује дебљина метализације (која је реда величине неколико десетина μm), тј. узима се да су траке бесконачно танке

Прорачун планарних водова

- У литератури се могу наћи различити дијаграми или приближи обрасци (добијени интерполацијом нумеричких резултата или резултата мерења) за најчешће коришћене планарне водове
 - Обично се даје карактеристична импеданса вода и такозвана **ефективна релативна пермитивност**
 - Ова пермитивност се дефинише релацијом
$$\epsilon_{re} = \frac{C'}{C_0}$$
где је C' подужна капацитивност посматраног вода, а C_0' подужна капацитивност вода код кога је диелектрик уклоњен (тј. свуда је вакуум)
 - Ефективна релативна пермитивност представља релативну пермитивност (еквивалентне) хомогене средине у којој би требало да се налазе проводници посматраног вода да би подужна капацитивност (C') била иста како код посматраног вода

Прорачун планарних водова

- Из дефиниције ϵ_{re} следи да се брзина простирања фазе планарног вода може изразити у облику

$$c_{\phi} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

односно таласна дужина на воду је

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

где је c_0 брзина простирања у вакууму, а λ_0 таласна дужина у вакууму при радној учестаности вода

Прорачун планарних водова

- Посматрајмо, најпре, **микротракасти вод**
 - Квазистатичком анализом добијени су приближни обрасци за ефективну релативну пермитивност (према Hammerstad-у)

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right), \quad \frac{w}{h} < 1,$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}}, \quad \frac{w}{h} \geq 1,$$

где је ϵ_r релативна пермитивност подлоге микротракастог вода

Прорачун планарних водова

- Карактеристична импеданса (према Hammerstad-у и Schneider-у) је

$$Z_c = \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), \quad \frac{w}{h} < 1,$$

$$Z_c = \frac{377 \Omega}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1,444 \right)}, \quad \frac{w}{h} \geq 1$$

- Обрасци приказани до сада служе за **анализу микротракастог вода**, тј. за одређивање особина вода датих димензија

Прорачун планарних водова

- **Синтеза** вода представља одређивање потребних димензија да би вод имао задате особине
- За синтезу (према Wheeler-у) се могу користити следећи изрази

$$\frac{w}{h} = \frac{4}{0,5e^A - e^{-A}}, \quad \frac{w}{h} < 2,$$

$$\frac{w}{h} = \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \ln(2B - 1)), \quad \frac{w}{h} \geq 2,$$

где је

$$A = \pi \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} \frac{Z_c}{Z_0} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad \text{И} \quad B = \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{Z_0}{Z_c}$$

и $Z_0 \approx 377 \Omega$ је таласна импеданса вакуума

Прорачун планарних водова

- На основу израза за синтезу, за задату карактеристичну импедансу вода и одабрану подлогу, најпре се одреди однос w/h
 - За многе примене је потребно знати и таласну дужину на воду, па је стога потребно заменити израчунати однос w/h у израз за ефективну релативну пермитивност (формуле за анализу)

Прорачун планарних водова

- Дебљину метализације је практично потребно узети у обзир само код врло уских трака (код којих је w реда величине неколико дебљина траке t)
 - Приближно, узимање у обзир дебљине метализације се своди на замену стварне ширине траке (w) у изразима за анализу микротракастог вода ефективном ширином траке (w_e), која је дата изразом

$$w_e = w + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{2x}{t} \right) \right)$$

где је

$$x = h, \quad w > \frac{h}{2\pi},$$

$$x = 2\pi w, \quad 2t < w \leq \frac{h}{2\pi}.$$

Прорачун планарних водова

- Приближни израз за губитке у проводницима микротракастог вода, који је добијен пертурбационим методом, гласи

$$\alpha_p = \frac{1}{2\pi h} \frac{R_s}{Z_c} \frac{32 - \left(\frac{w}{h}\right)^2}{32 + \left(\frac{w}{h}\right)^2} \left(1 + \frac{h}{w} \left(1 + \frac{\partial w_e}{\partial t}\right)\right), \quad \frac{w}{h} < 1,$$

$$\alpha_p = \frac{1}{h} \frac{\varepsilon_{re} Z_c R_s}{Z_0^2} \left(\frac{w}{h} + \frac{6h}{w} \left(\left(1 - \frac{h}{w}\right)^5 + 0,08\right)\right) \left(1 + \frac{h}{w} \left(1 + \frac{\partial w_e}{\partial t}\right)\right), \quad \frac{w}{h} \geq 1,$$

где је

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{2h}{t}\right), \quad w > \frac{h}{2\pi},$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{4\pi w}{t}\right), \quad 2t < w \leq \frac{h}{2\pi},$$

док је R_s површинска отпорност метала

Прорачун планарних водова

- Претходни изрази дају резултате који су чак и до два пута мањи од резултата мерења због тога што су у пракси губици у проводницима повећани услед храпавости површи метала

– Стога је, за процену губитака у микротракастом воду, довољан и једноставан израз, добијен занемаривањем ивичних ефеката

$$\alpha_p = \frac{R_s}{wZ_c}$$

- Губици у диелектрику се могу израчунати на основу израза

$$\alpha_d = \pi \frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_r - 1} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{re}} \frac{\text{tg}(\delta)}{\lambda_g}$$

Прорачун планарних водова

- На сваком дисконтинуитету вода (крају, савијутку и слично) долази до губитака енергије услед зрачења
 - Ови губици су, приближно, сразмерни са

$$(hf)^2 / \sqrt{\epsilon_r}$$

где је f учестаност

- Учестаност при којој се 1% снаге инцидентног таласа на отвореном крају микротракастог вода израчи дата је приближним изразом

$$f_m[\text{GHz}] = 2,14 \frac{\sqrt[4]{\epsilon_r}}{h[\text{mm}]}$$

Прорачун планарних водова

- Очигледно, да би се губици услед зрачења смањили, потребно је узети подлоге веће релативне пермитивности, а мање дебљине
 - Међутим, подлоге са већим ϵ_r захтевају мање ширине трака (за задату карактеристичну импедансу), односно прецизнију штампу, због чега се при вишим учестаностима морају узети подлоге са мањим ϵ_r
 - Дакле, ова два захтева су противречна
 - Из претходног израза следи да се подлога дебљине $h=1\text{mm}$, релативне пермитивности $\epsilon_r=2,5$, може користити до око 3 GHz, а подлога исте дебљине, само са $\epsilon_r=10$, може користити до око 4 GHz

Прорачун планарних водова

- Претходно наведени изрази за **анализу и синтезу микротракастог вода** важе само при нижим учестаностима
 - Због хибридне природе таласа, са порастом учестаности долази до промене структуре поља, па самим тим и до промене карактеристика вода
 - Са порастом учестаности поље се све више концентрише у делу простора између траке и подлоге
 - Са променом учестаности мења се ефективна пермитивност, а тиме и фазна брзина, тј. **микротракасти вод постаје дисперзиван**
 - Фреквенцијска зависност ефективне релативне пермитивност се може израчунати на основу израза

$$\epsilon_{re}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{re}(0)}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} G$$

где је $\epsilon_{re}(0)$ квазистатичка пермитивност (ϵ_{re} у претходним изразима), док је

$$f_p = \frac{1}{2\mu_0} \frac{Z_c}{h}, \quad G = 0,6 + 0,009Z_c[\Omega]$$

Прорачун планарних водова

- Са порастом учестаности мења се и карактеристична импеданса
- Међутим, због постојања аксијалних компоненти електричног и магнетског поља, не постоји једнозначна дефиниција карактеристичне импедансе (на воду се не могу једнозначно дефинисати напон и јачина струје)
- У зависности од усвојене (условне) дефиниције карактеристичне импедансе, добијају се различите зависности Z_c од учестаности, које овде неће бити разматране

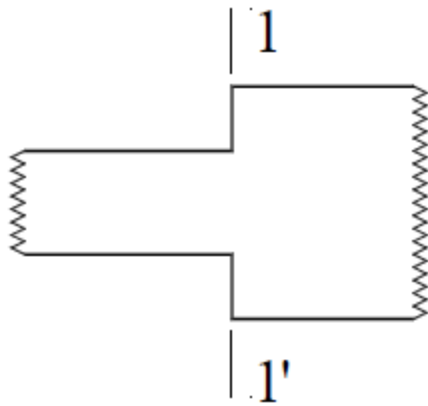
Прорачун планарних водова

- У техници микротракастих водова се могу направити антене и антенски низови, подесним обликовањем трака
 - Овакве антене су малих димензија, али су **врло ускопојасне** (радни опсег је реда величине 1% централне учестаности) и имају велике губитке
 - **Антене ширих радних опсега се могу израдити у техници копланарних водова и копланарних таласовода**
 - Наравно, зрачење је непожељно ако се у техници микротракастих водова праве микроталасна кола
 - Да би се зрачење из кола спречило, и тиме спречиле нежељене спреге, кола се морају оклапати

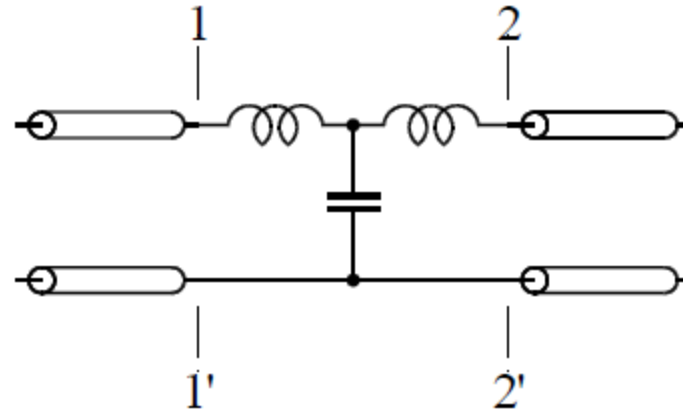
Прорачун планарних водова

- Прелаз између два микротракаста вода, различитих димензија, представља дисконтинуитет
 - У циљу смањења тог дисконтинуитета, прелаз се изводи постепено
- Исти је случај и са савијутком
 - Овај дисконтинуитет се може успешно компензовати одсецањем угла на савијутку
- Поступак компензације дисконтинуитета Т-споја три микротракаста вода такође је приказан у наставку

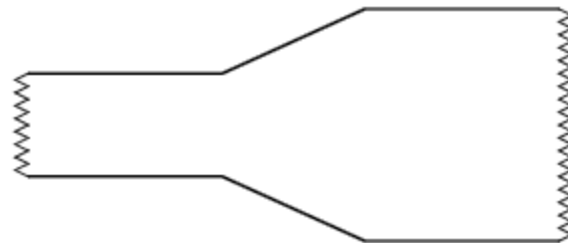
Прорачун планарних водова



(a)



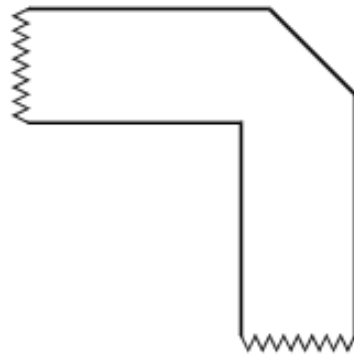
(б)



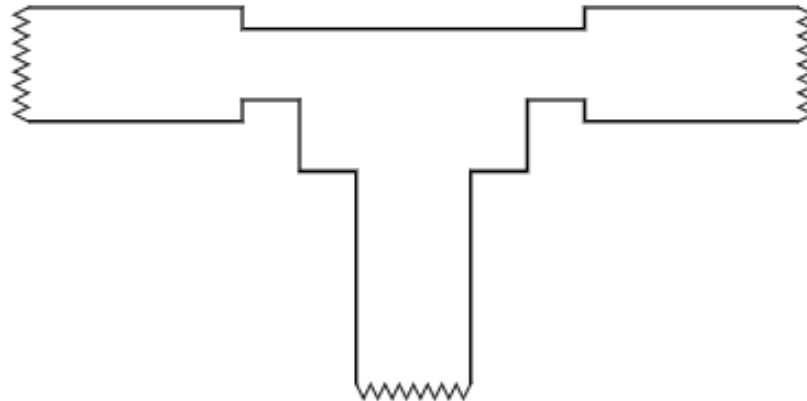
(в)

Слика 4.7. (а) Спој два микротракаста вода различитих ширина, (б) еквивалентна шема споја и (в) компензација споја.

Прорачун планарних водова



Слика 4.8. Компензовани савијутак микротракастог вода.



Слика 4.9. Компензовани спој три микротракаста вода.

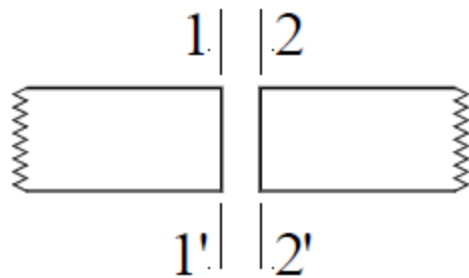
Прорачун планарних водова

- Отворен крај микротракастог вода се, еквивалентно, понаша као вод завршен малом (паразитном) капацитивношћу, која је последица ивичних ефеката на крају
 - Другачије посматрано, отворен вод се понаша као да је дужи него што му је физичка дужина (продужење је еквивалентно паразитној капацитивности)
 - Тада се сматра да је отворени крај вода идеалан, без ивичних ефеката
 - То еквивалентно продужење се може, приближно, израчунати на основу обрасца

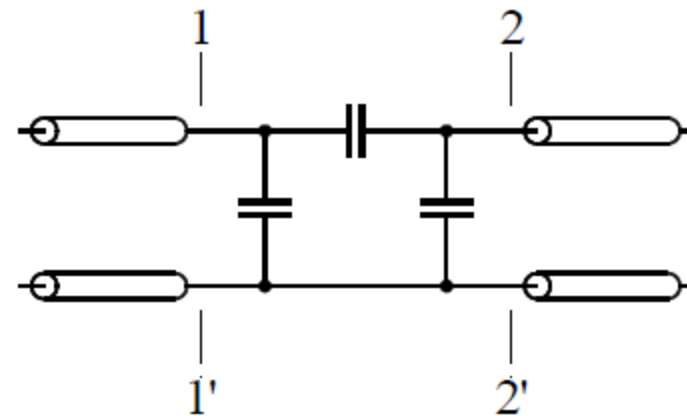
$$\frac{\Delta l}{h} = 0,412 \frac{\epsilon_{re} + 0,3}{\epsilon_{re} - 0,258} \frac{\frac{w}{h} + 0,264}{\frac{w}{h} + 0,8}$$

Прорачун планарних водова

- Попречни процеп у траци проводника микротракастог вода представља, еквивалентно, капацитивност уметнуту у вод
– Због ивичних ефеката, у еквивалентној шеми се јављају још две капацитивности између крајева водова и масе



(a)



(б)

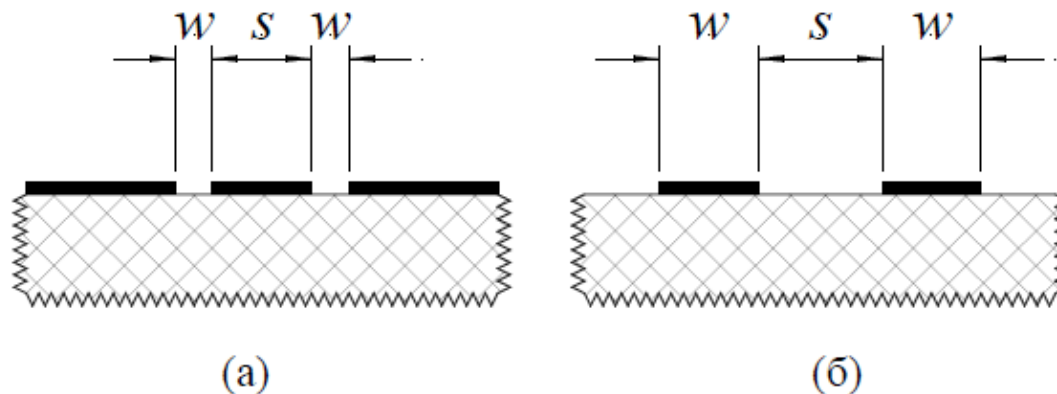
Слика 4.10. (a) Процеп код микротракастог вода и (б) његова еквивалентна шема.

Прорачун планарних водова

- Кратак спој код микротракастог вода се може направити, али то није сасвим једноставно
 - Потребно је избушити једну или више рупа кроз носач, у равни кратког споја, и кроз те отворе спојити траку вода и масу
 - Спајање се обично изводи тако што се, посебним технолошким поступком, рупе метализују
 - Овако начињен кратак спој није идеалан, већ се, еквивалентно, понаша као мала паразитна индуктивност којом је вод затворен
 - Као и у случају отвореног вода, овакав вод се понаша као идеално кратко спојен вод, али нешто веће дужине него што је стварна дужина вода

Прорачун планарних водова

- Поред микротракастог вода, наводимо и формуле за квазистатичку карактеристичну импедансу копланарног таласовода и копланарног вода
 - Сmatрамо да је **диелектрик неограничен** (испуњава полупростор)
 - То је само апроксимација стварног случаја када је диелектрични носач врло дебео



Слика 4.11. Попречан пресек (а) копланарног таласовода и (б) копланарног вода.

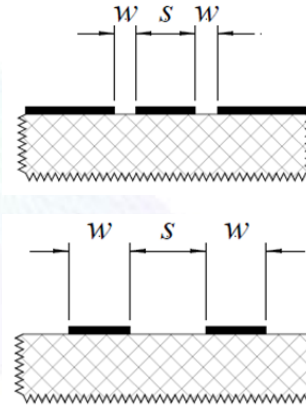
Прорачун планарних водова

- За копланарни таласовод имамо

$$Z_c = \frac{Z_0}{4\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(u)}{K(u)}$$

а за копланарни вод имамо

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K(u)}{K'(u)}$$



при чему је $\epsilon_{re} = (\epsilon_r + 1)/2$ ефективна релативна пермитивност,

$$u = \frac{s}{s + 2w},$$

$K(u)$ потпуни елиптички интеграл прве врсте, $K(u) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - u^2 \sin^2(\phi)}}$,
а $K'(u) = K(u')$, где је

$$u' = \sqrt{1 - u^2}$$

Прорачун планарних водова

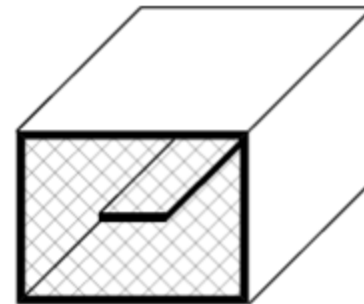
- Однос $K'(u)/K(u)$ се може приближно израчунати на основу релација

$$\frac{K(u)}{K'(u)} = \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{u}}{1 - \sqrt{u}} \right), \quad \frac{\sqrt{2}}{2} < u < 1$$

$$\frac{K'(u)}{K(u)} = \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{u'}}{1 - \sqrt{u'}} \right), \quad 0 < u \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Прорачун планарних водова

- У пракси се користе и једноставни аналитички изрази за карактеристичну импедансу тракастог вода
 - Анализа претпоставља да се тракасти вод састоји од две паралелне проводне фолије (теоријски бесконачно велике) између којих је постављена трака
 - Трака представља “врући” проводник вода, док се за брзо променљиви сигнал може сматрати да су фолије спојене
 - Диелектрик оваквог вода је хомоген, па је брзина простирања таласа једнака $c_0/\sqrt{\epsilon_r}$



Прорачун планарних водова

- Типичан однос ширина траке (w) и одстојања траке од фолије (h) је $w/h=1$, или мало мање
- Карактеристична импеданса тракастог вода је, приближно, дата формулом која узима у обзир и дебљину метализације (t)

$$Z_c = \frac{30 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(1 + \frac{4}{\pi} \frac{b-t}{w'} \left(\frac{8}{\pi} \frac{b-t}{w'} + \sqrt{\left(\frac{8}{\pi} \frac{b-t}{w'} \right)^2 + 6,27} \right) \right)$$

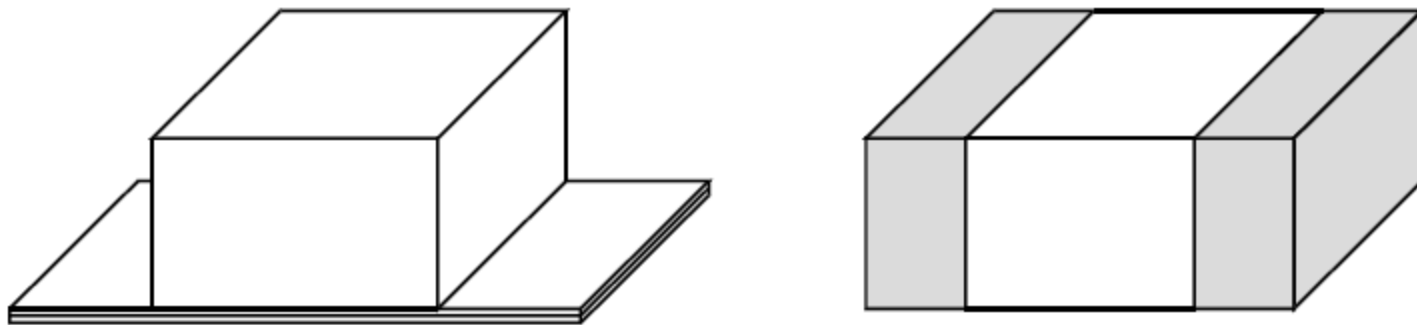
при чему је

$$\frac{w'}{b-t} = \frac{w}{b-t} + \frac{\Delta w}{b-t} \quad \frac{\Delta w}{b-t} = \frac{x}{\pi(1-x)} \left(1 - \frac{1}{2} \ln \left(\left(\frac{x}{2-x} \right)^2 + \left(\frac{0,0796x}{w/b + 1,1x} \right)^m \right) \right)$$

$$m = 2 \left(1 + \frac{2}{3} \frac{x}{1-x} \right)^{-1}, \quad x = \frac{t}{b}, \quad b = 2h + t$$

Прорачун планарних водова

- На планарне водове се, често, монтирају разни дискретни елементи, као што су отпорници, кондензатори, полупроводнички или феритни елементи
 - Ови елементи су, својим облицима и прикључцима, прилагођени монтирању на штампана кола



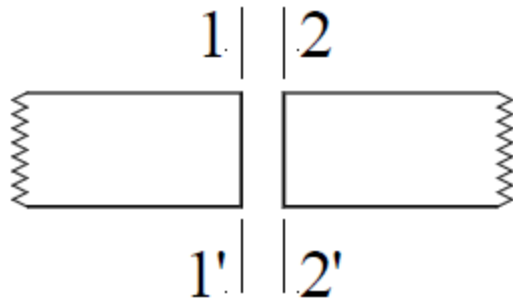
Слика 4.12. Паковања отпорника и кондензатора.

Прорачун планарних водова

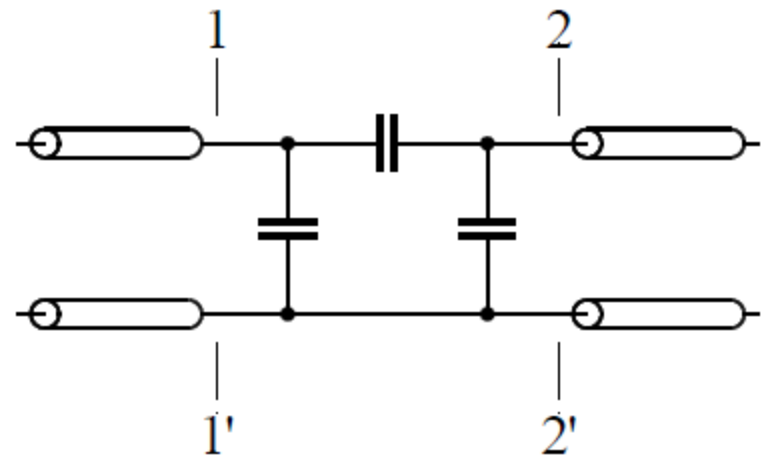
- Изводи су у облику трака, које се причвршћују на штампане проводнике на диелектричној подлози, или су крајеви паковања прилагођени за лемљење на штампане проводнике
 - Причвршћивање елемената за проводнике се може извести на различите начине: лемљењем, микрозаваривањем, термокомпресијом, ултразвучним заваривањем или проводним епоксијалним смолама (лепковима)
 - Капацитивности кондензатора могу бити од дела **pF** до неколико **nF**
 - Осим у чип паковању, отпорници се могу направити и наношењем дебелослојних филмова на потребним местима

Прорачун планарних водова

- Редни кондензатори се могу направити и уметањем процепа у вод



(a)



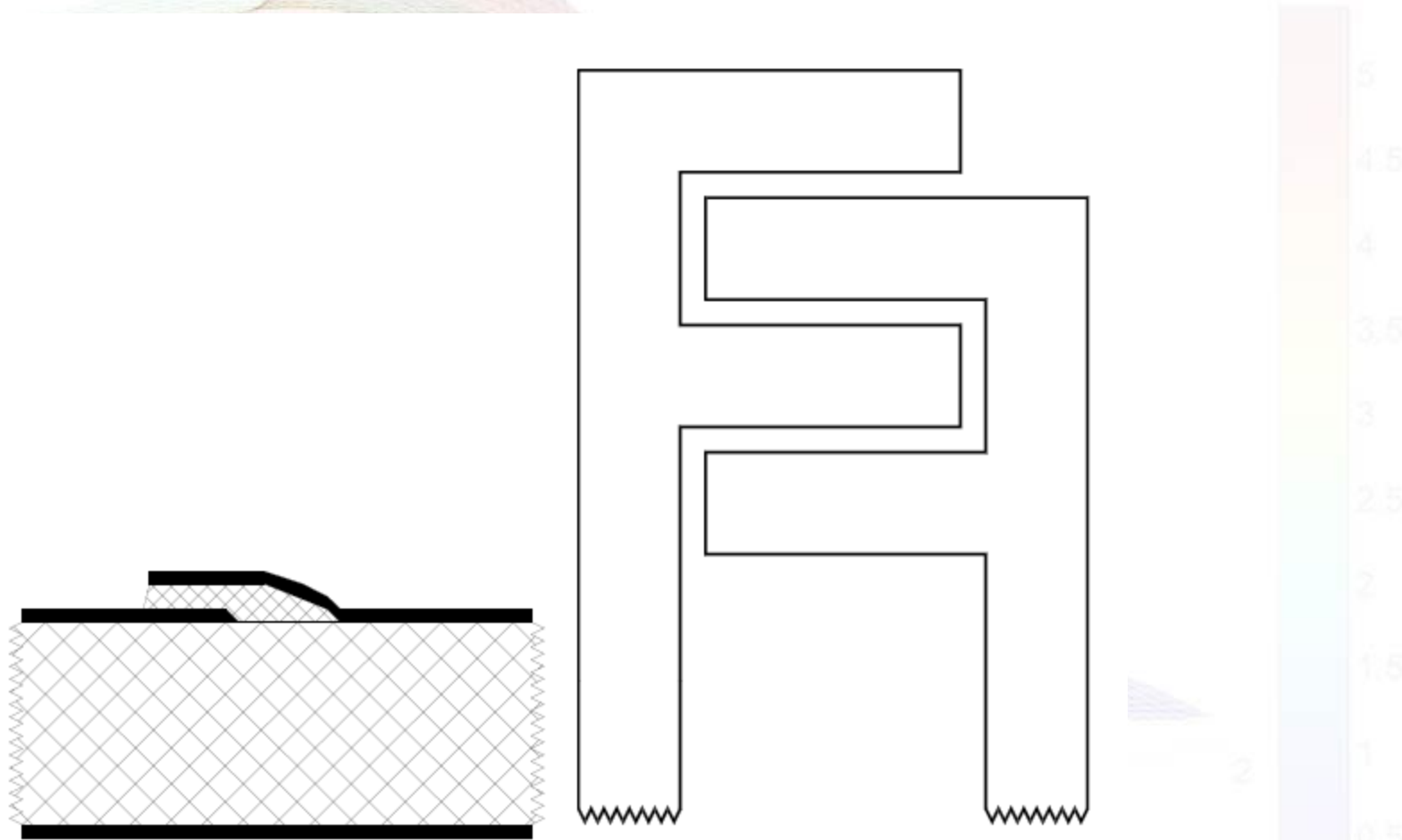
(б)

Слика 4.10. (а) Процеп код микротракастог вода и (б) његова еквивалентна шема.

Прорачун планарних водова

- Уколико је капацитивност таквог процепа мала, преко једног проводника вода се нанесе слој диелектрика, а преко тога метализација, која се споји са другим проводником (као што је приказано на следећој слици)
 - При нижим учестаностима дискретна капацитивност се може начинити и помоћу интердигиталне структуре (приказаном на следећој слици)
- Овом структуром се може остварити већа капацитивност него само обичним процепом у траци, јер је дужина ивице преко које постоји капацитивна спрега између проводника врло велика

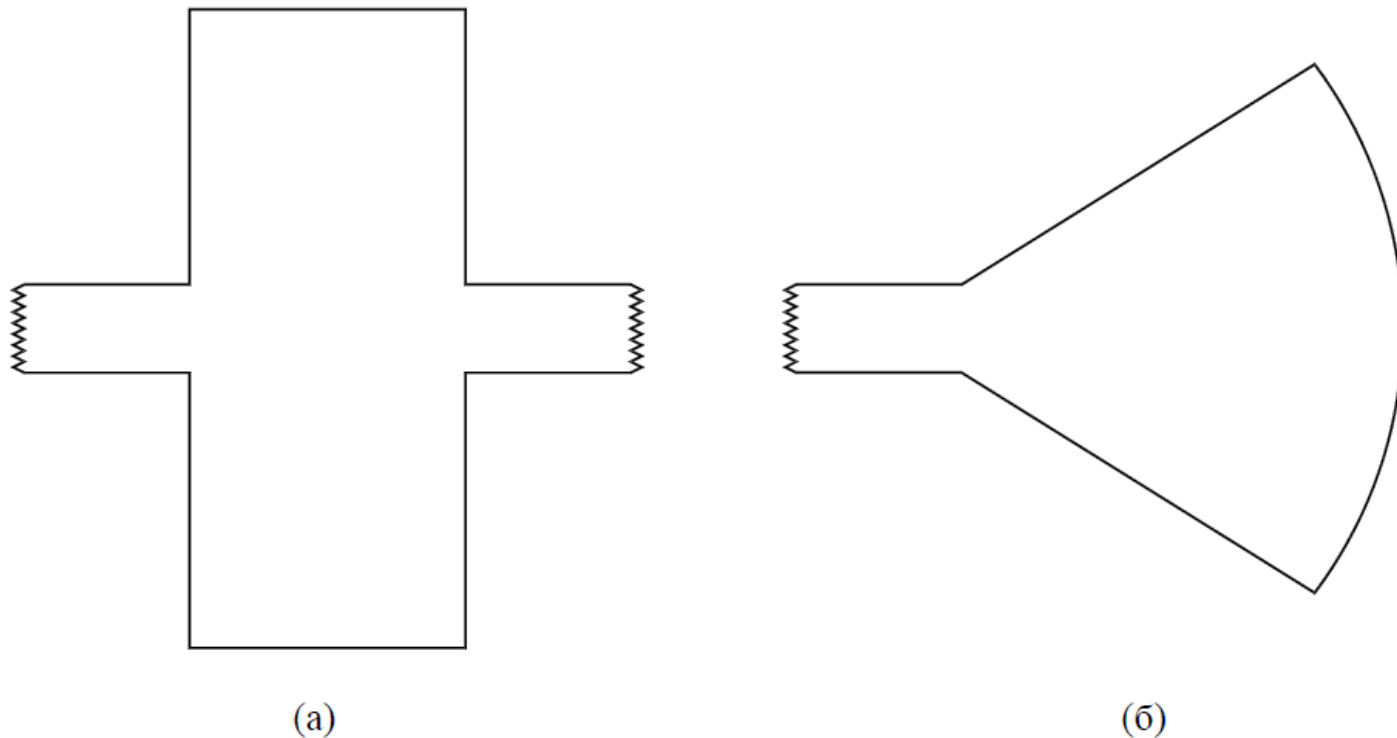
Прорачун планарних водова



Слика 4.13. Редне капацитивности.

Прорачун планарних водова

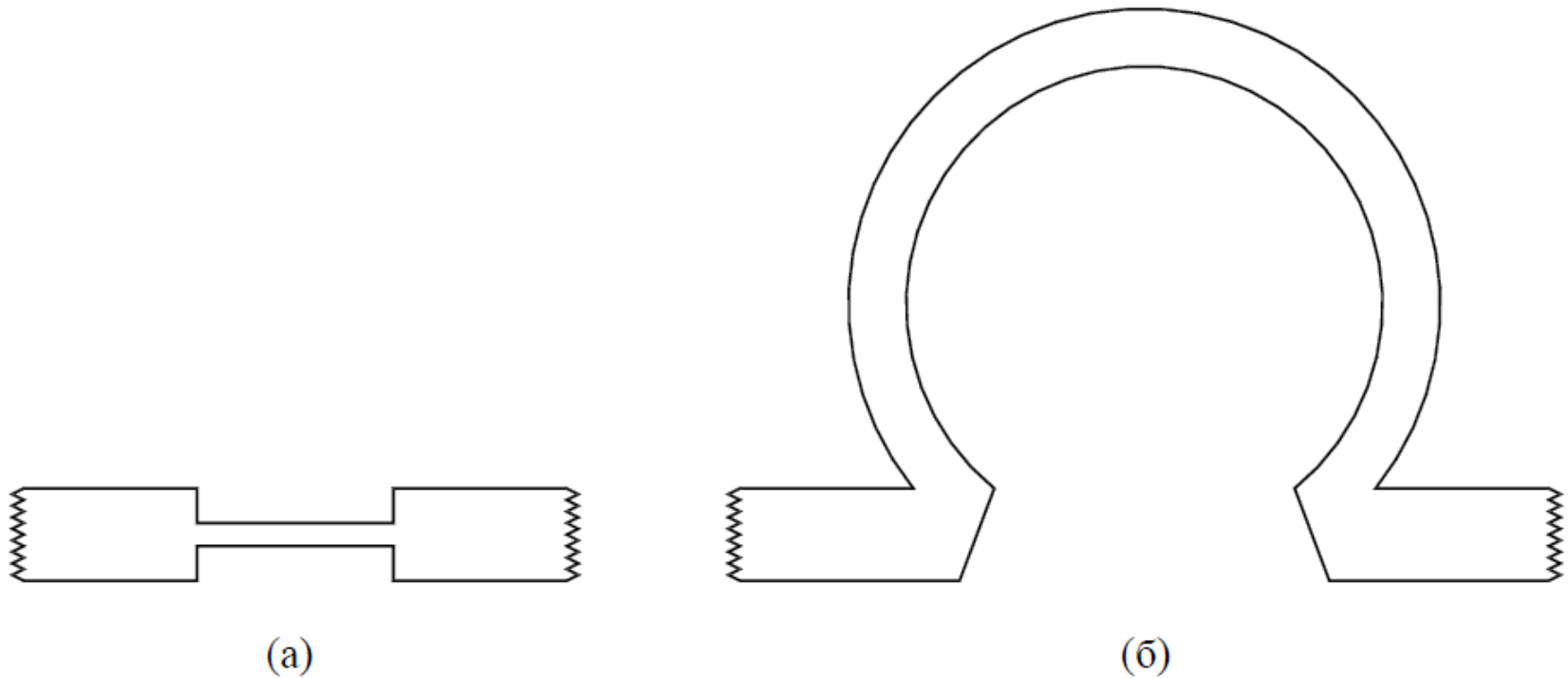
- Паралелна капацитивност се прави у облику проширења траке



Слика 4.14. Паралелне капацитивности: (а) проширење микротракастог вода и (б) капацитивност код нископропусног филтра у водовима за поларизацију полупроводника.

Прорачун планарних водова

- Дискретна редна индуктивност се може начинити у облику суженог дела вода или петље



Слика 4.15. Редне индуктивности: (а) сужење микротракастог вода и (б) индуктивна петља.

Прорачун планарних водова

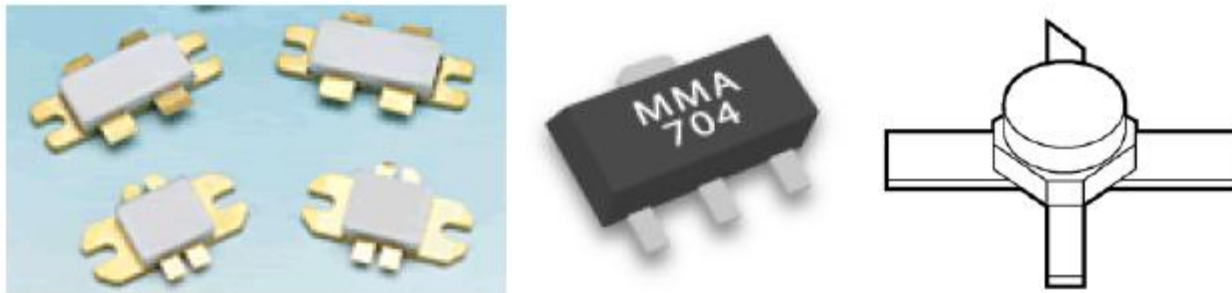
- Неколико различитих паковања микроталасних диода



Слика 4.16. Паковања микроталасних диода.

Прорачун планарних водова

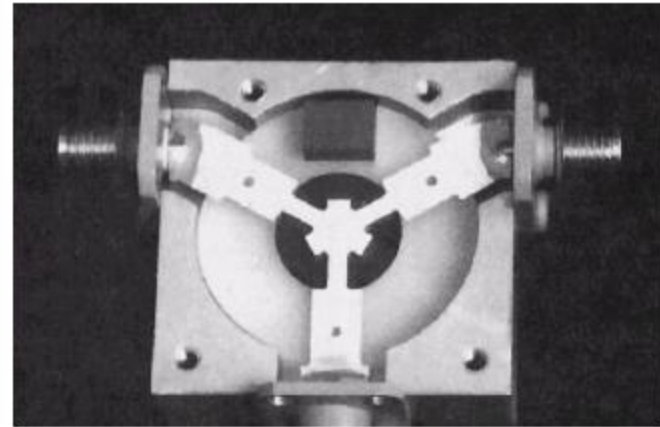
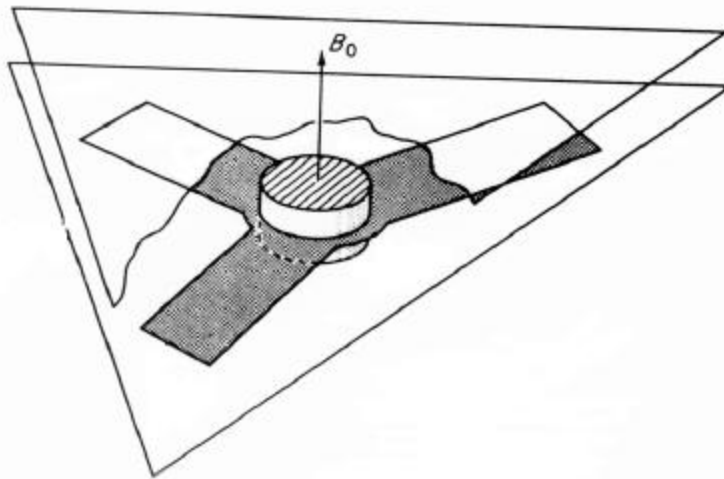
- Неколико различитих облика кућишта микроталасних транзистора предвиђених за монтирање на планарне водове



Слика 4.17. Паковања микроталасних транзистора.

Прорачун планарних водова

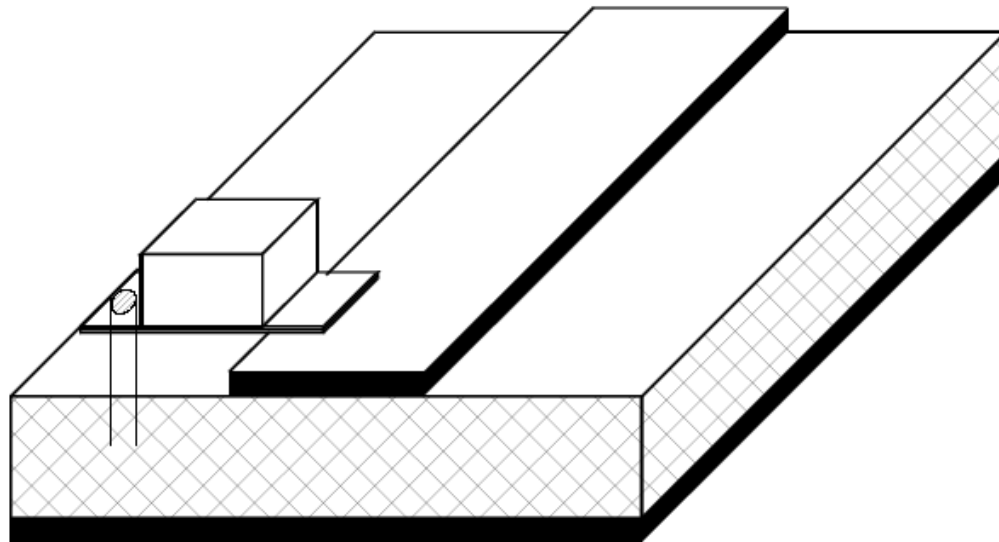
- Циркулатор (феритна компонента)



Слика 4.18. Циркулатор у техници тракастих водова.

Прорачун планарних водова

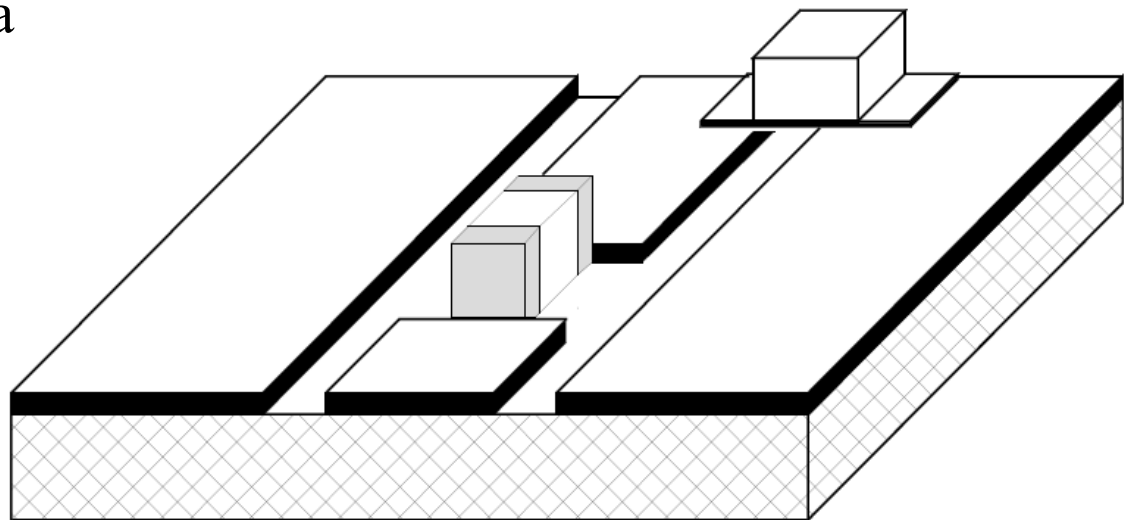
- Код микротракастог вода је могуће лако монтирање редних дискретних елемената: једноставно се направи прекид у траци и на том месту монтира се компонента – Паралелно монтирање је теже, јер је неопходно начинити везу са масом, која се налази са супротне стране подлоге



Слика 4.19. Паралелно монтирање елемената код микротракастог вода.

Прорачун планарних водова

- Код копланарног вода, копланарног таласовода и прорезног вода лако се монтирају паралелни елементи, а код копланарног таласовода лако и редни, и паралелни елементи (као што је приказано на слици)
 - Код копланарног вода монтирање редног елемента у само један проводник нарушава симетрију вода и тиме може утицати на његова својства



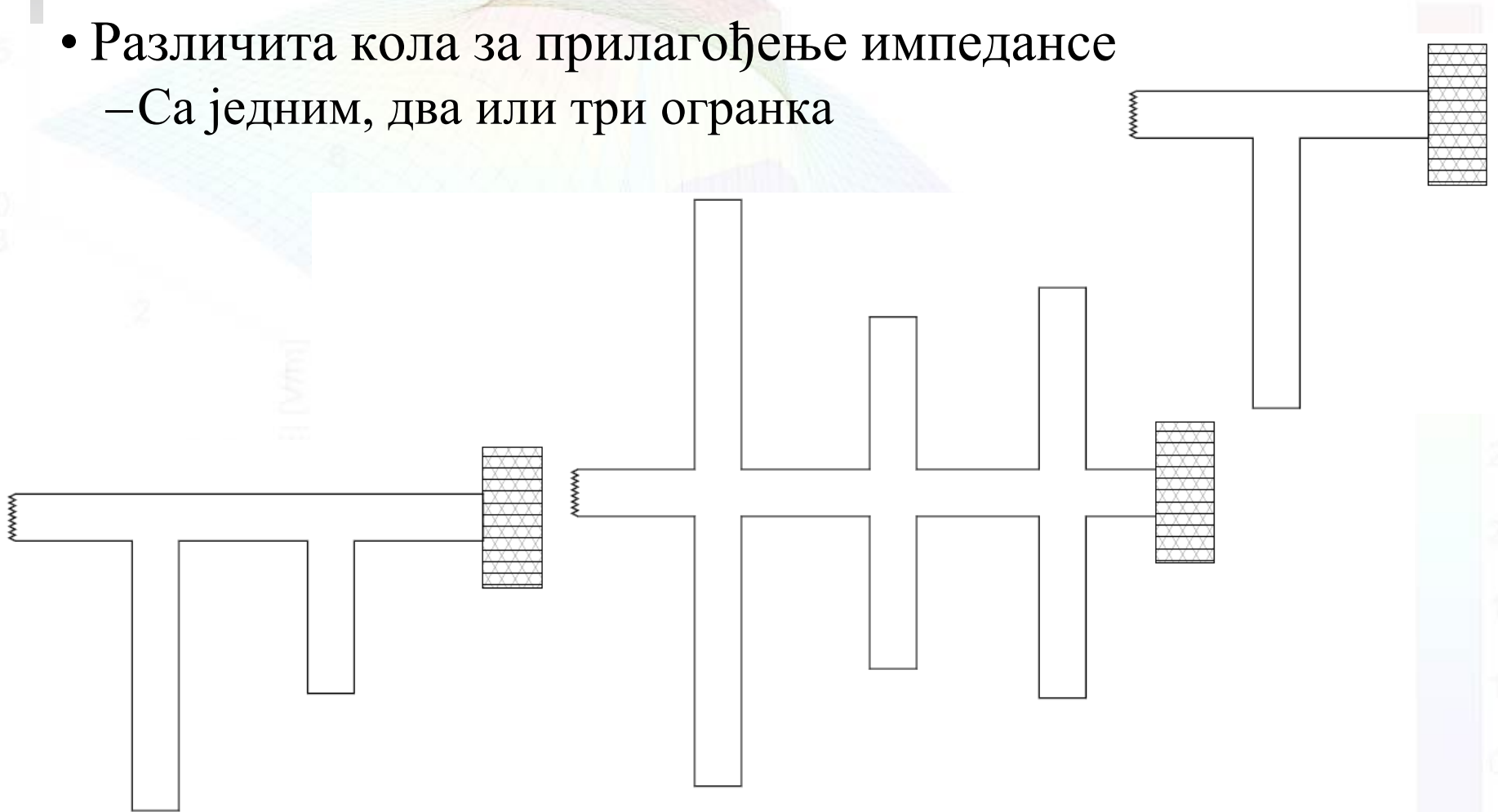
Слика 4.20. Монтирање елемената код копланарног таласовода.

Прорачун планарних водова

- У техници планарних водова могу се начинити различита пасивна микроталасна кола
 - Примери ће бити приказани за микротракасти вод
 - Биће скициран облик траке вода (са друге стране диелектричног носача је маса)

Прорачун планарних водова

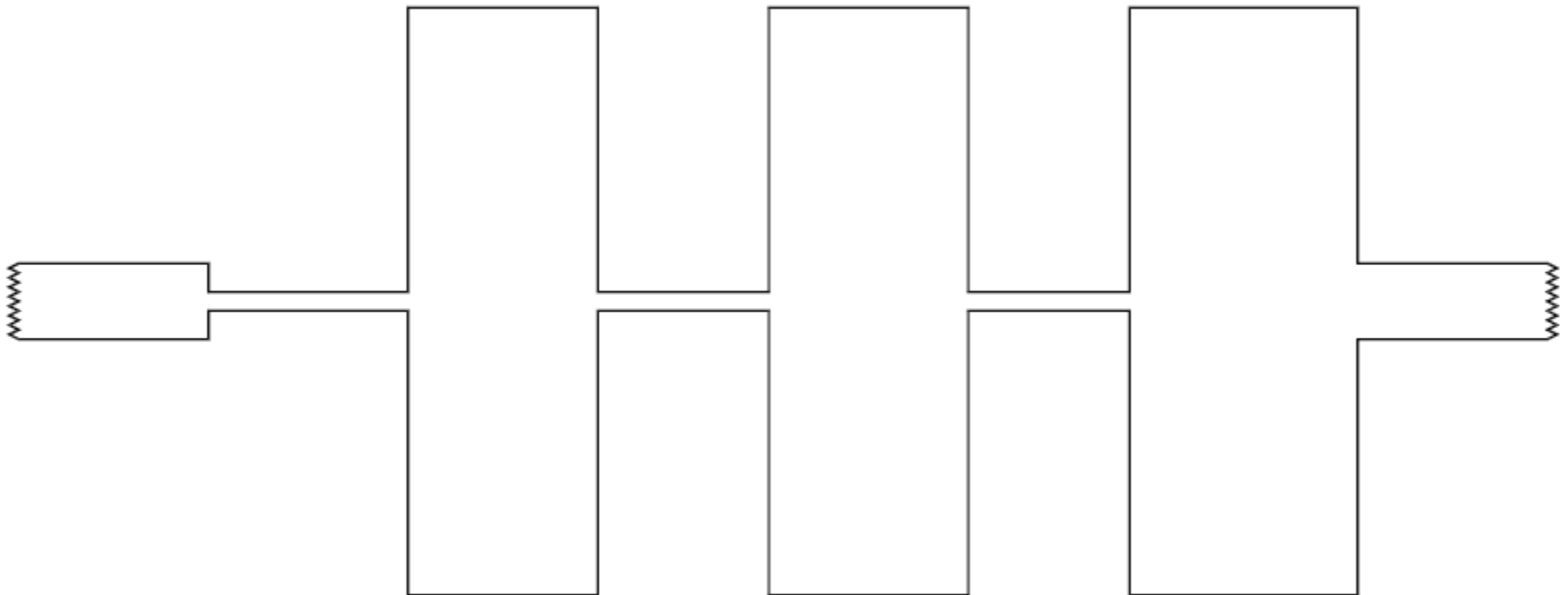
- Различита кола за прилагођење импедансе
– Са једним, два или три огранка



Слика 4.21. Кола за прилагођење импедансе (шрафирано) са једним, два и три огранка. 89/101

Прорачун планарних водова

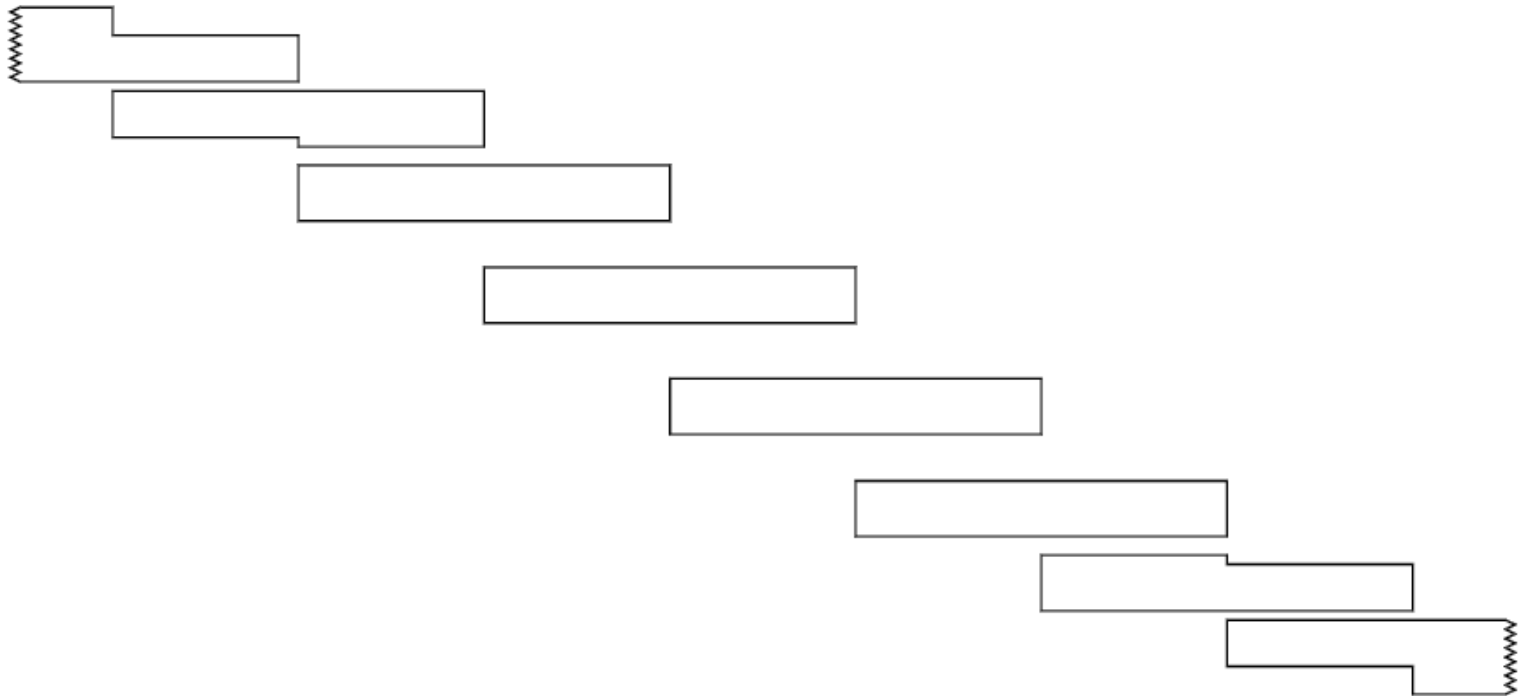
- Нископропусни филтар, начињен од кратких секција вода наизменично велике и мале карактеристичне импедансе (мале и велике ширине траке)



Слика 4.22. Нископропусни филтар.

Прорачун планарних водова

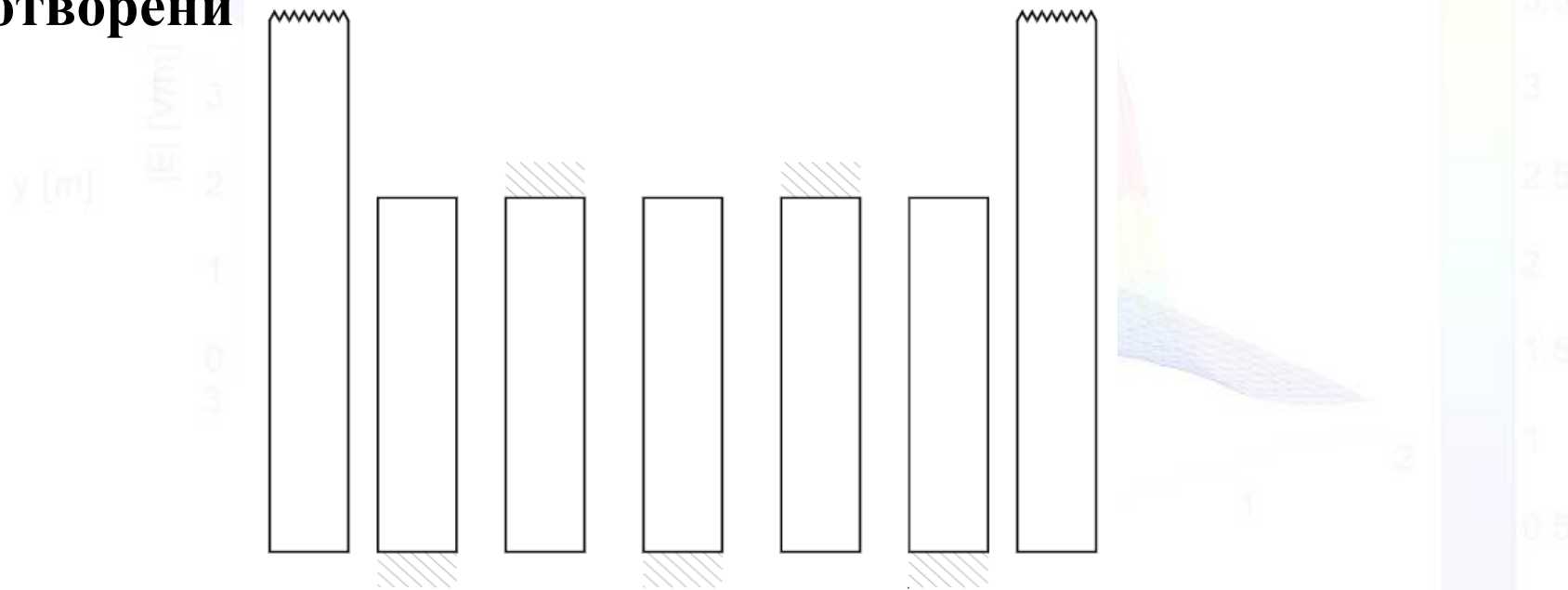
- Филтар пропусник опсега, начињен у виду спрегнутих секција водова, од којих је свака дугачка око једне половине таласне дужине при централној учестаности



Слика 4.23. Филтар са спрегнутим резонаторима.

Прорачун планарних водова

- Интердигитални филтар, пропусник опсега, који се састоји од спрегнутих четвртталсних резонатора (при централној учестаности)
 - Крајеви резонатора су, наизменични, **кратко спојени и отворени**



Слика 4.24. Интердигитални филтар.

Прорачун планарних водова

- Филтар пропусник високих учестаности
 - Дужине секција су значајно мање од таласне дужине
 - Редна капацитивност је реализована као процеп у траци, а паралелна индуктивност као кратка, **кратко спојена** секција вода



Слика 4.25. Високопропусни филтар.

Прорачун планарних водова

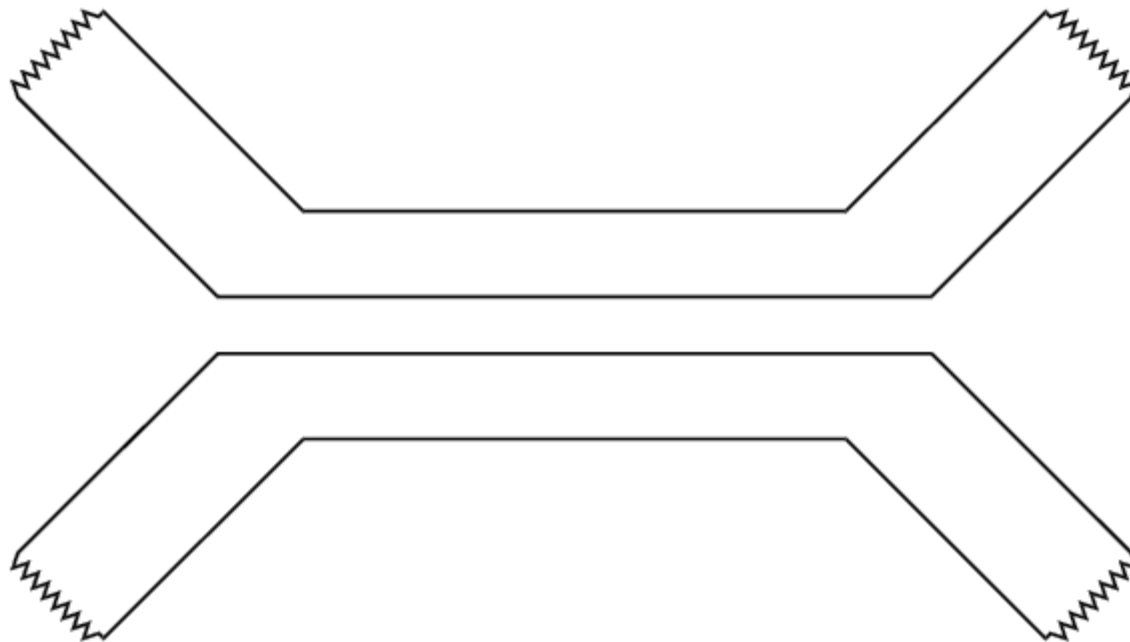
- Полуталасни резонатор, у виду отвореног вода, који је капацитивно спрегнут са напојним водом



Слика 4.26. Спрега резонатора и вода.

Прорачун планарних водова

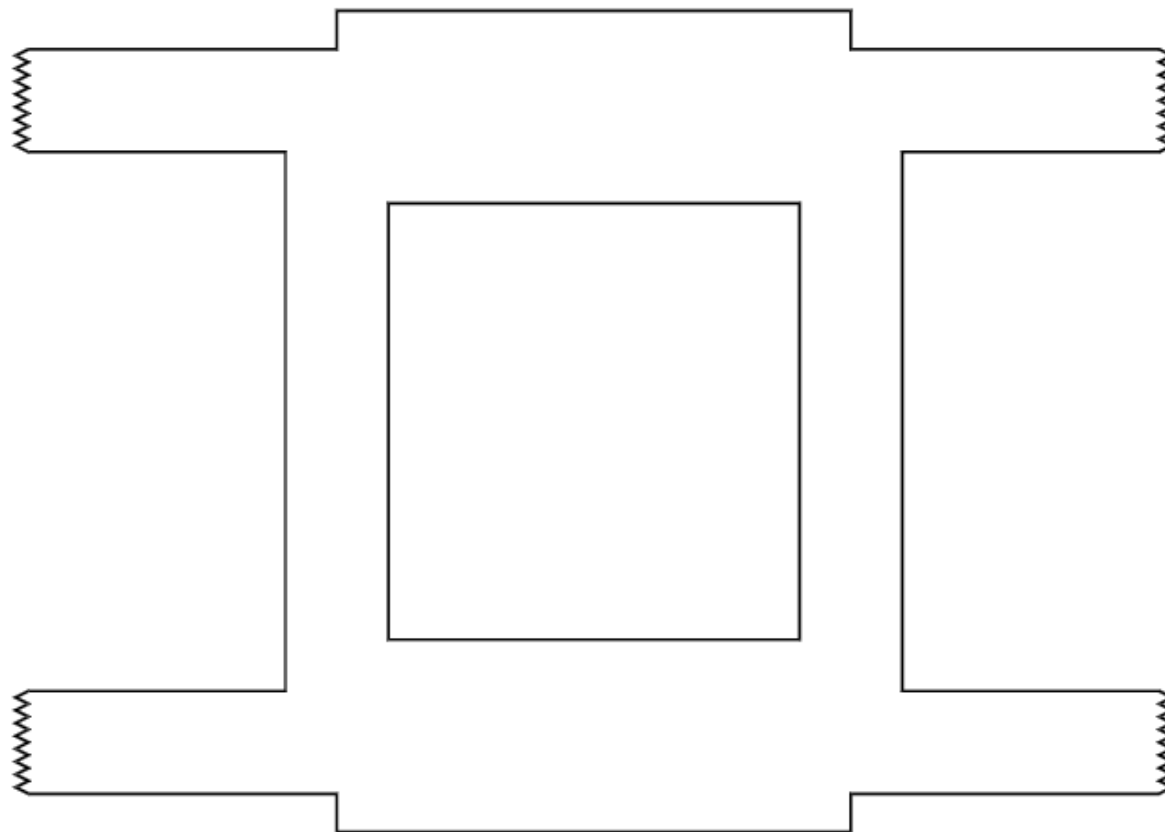
- Усмерени спрежњак који се састоји од два спрегнута вода



Слика 4.27. Усмерени спрежњак са ивичном спрегом.

Прорачун планарних водова

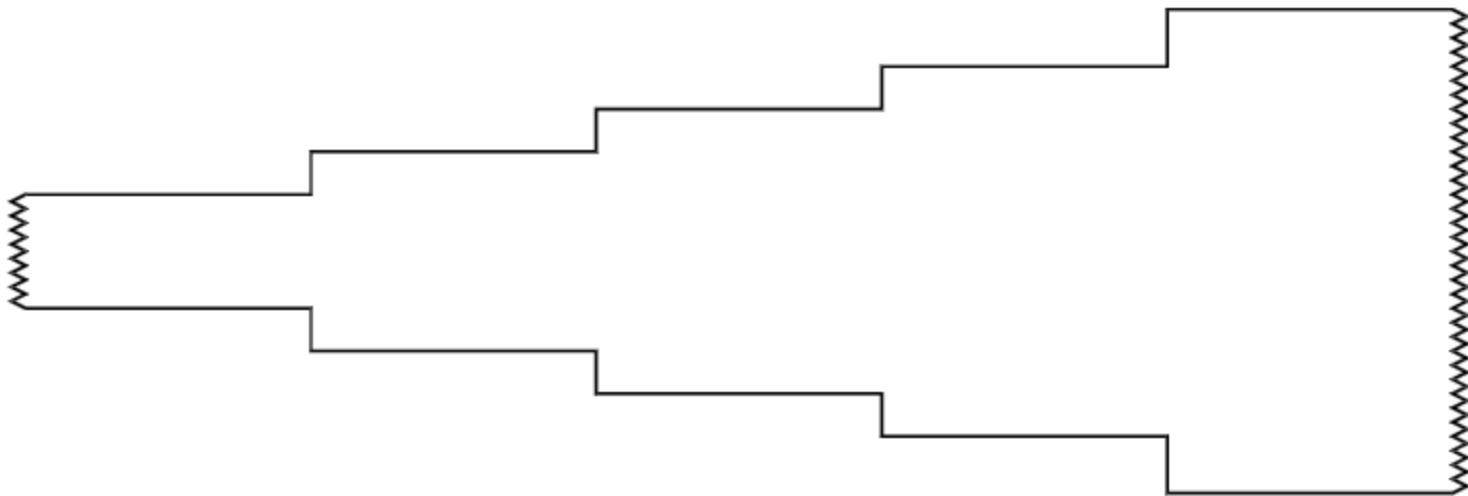
- Усмерени спрежњак са огранцима



Слика 4.28. Усмерени спрежњак са огранцима.

Прорачун планарних водова

- Широкопојасни (Чебишевљев) трансформатор импедансе



Слика 4.29. Чебишевљев трансформатор импедансе.

Прорачун планарних водова

- Разна пасивна кола, са монтираним активним и другим дискретним елементима, могу се изградити на једној штампаној плочици
 - Тако се може, на пример, направити појачавач, осцилатор, мешач и слично
- Цела штампана плочица се, затим, смешта у подесан оклоп, најчешће у облику металне кутијице са добро електрички и механички заптивеним поклопцем
 - На кутијицу се монтирају конектори (најчешће SMA типа), који служе за повезивање са околином, као и други прикључци (на пример, за напајање активних елемената)

Прорачун планарних водова

- Такво комплетно коло се назива микроталасно интегрисано коло (**Microwave Integrated Circuit – MIC**)
 - Коло је начињено у хибридној техници јер се штампана плоча израђује одвојено од активних и других дискретних елемената, који се монтирају микроманипулаторима и причвршћују на различите начине на штампану плочицу

Прорачун планарних водова

- Код **монолитних** микроталасних интегрисаних кола (**Monolithic Microwave Integrated Circuit – MMIC**) пасивне компоненте се праве на истој подлози (полупроводнику) на којој раде транзистори и диоде
 - Један од проблема код ових кола су губици у подлози
 - Због тога се оваква кола често раде на подлогама од галијум-арсенида и сличних полупроводничких материјала
 - Савремена монолитна микроталасна кола праве се и на силицијуму
 - Водови се праве на силицијум диоксиду, изнад супстрата

Прорачун планарних водова

- Између хибридне и монолитне технике је **квазимонолитна техника**
 - Пасивни део кола се прави на подлози од сафира
 - На тој подлози се затим, епитаксијалним растом, формира слој силицијума, а у њему се, класичним поступцима израде полупроводничких компоненти, образују активни елементи (**Silicon-on-Sapphire – SOS техника**)
 - Слично се ради и са **галијум-арсенидом**, који се наноси на подлогу од **спинела**, на којој се прави пасивни део кола