



Електротехнички факултет  
Универзитет у Београду

## Дипломски рад

Пројектовање  
микроталасног детектора снаге са  
шотки диодом

Ментор:  
др Слободан Савић, доцент

Студент:  
Милош Крстановић, 15/0469

Београд, септембар 2019.

# Садржај

<b>САДРЖАЈ</b> .....	<b>2</b>
<b>1. УВОД</b> .....	<b>3</b>
<b>2. ДИОДНИ ДЕТЕКТОР</b> .....	<b>4</b>
2.1. ВРСТЕ ДЕТЕКТОРА .....	4
2.2. ИСТОРИЈАТ МЕРЕЊА СНАГЕ.....	4
2.3. ПРИНЦИП РАДА ДИОДНОГ ДЕТЕКТОРА СНАГЕ .....	6
2.4. РЕАЛИЗАЦИЈА ДИОДНОГ ДЕТЕКТОРА СНАГЕ.....	6
2.5. ДВОТОНСКА АНАЛИЗА .....	7
2.6. ПРИМЕНА ДИОДНИХ ДЕТЕКТОРА У АУТОМАТСКОЈ КОНТРОЛИ СНАГЕ .....	8
2.7. ТЕМПЕРАТУРНА ЗАВИСНОСТ НАПОНА ДИОДНОГ ДЕТЕКТОРА .....	9
<b>3. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈА</b> .....	<b>11</b>
3.1. Циљ .....	11
3.2. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ У MICROWAVE OFFICE ПРОГРАМУ .....	11
3.3. УТИЦАЈ ПРОМЕНЕ ОТПОРНОСТИ И КАПАЦИТИВНОСТИ У ПАРАЛЕЛНОМ RC ДЕЛУ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ ДЕТЕКТОРА .....	17
3.4. НЕКИ ДЕТАЉИ ДИЗАЈНА.....	18
<b>4. ИЗГЛЕД ЛЕЈАУТА</b> .....	<b>20</b>
<b>5. ИЗРАДА ПРОТОТИПА</b> .....	<b>21</b>
<b>6. ЗАКЉУЧАК</b> .....	<b>25</b>

# 1. Увод

Мерачи снаге су неизоставни део разних уређаја, а поготову за оне који раде у RF и микроталасном опсегу. Основна функција мерача снаге јесте мерење снаге сигнала неке компоненте или система. Такође, један од главних фактора у дизајну микроталасних склопова управо јесте улазна/излазна снага целокупног система или појединачних компоненти. Генерално гледано, да би неки уређај исправно функционисао, важно је да свака његова компонента прими одговарајући ниво сигнала од претходне компоненте и да одговарајући ниво сигнала проследи следећој компоненти у ланцу. Чак и један додатни децибел снаге може доста да повећа цену уређаја, посебно на вишим микроталасним учестаностима (микроталасни опсег учестаности је од 300 MHz до 300 GHz). Многи системи се константно посматрају и њихова излазна снага се стално мери приликом рада система. У пракси такође можемо имати велики број мерача снаге који нагледају појединачне компоненте. Из тог разлога је потребно да мерачи снаге и технике мерења буду тачне, прецизне, поновљиве и да не ометају рад остатка система, а врло је пожељно да цена оваквих мерача буде што нижа. Када кажемо ниво сигнала, на нижим учестаностима се обично подразумева да се снага мери преко напона, као квадрат измереног напона кроз импедансу. Међутим, са повећањем учестаности напон и струја се не могу понекад тако лако одредити (а некада се не могу ни дефинисати, као што је то случај у таласоводима). Из тог разлога се под нивоом снаге на вишим учестаностима подразумева директно мерење снаге (јер се једноставније и прецизније мери).

За мерење средње снаге на микроталасним учестаностима користе се три технике. Свака техника има другачији сензор (детектор) снаге. Постоји термистор, термопар и диодни детектор. Ми ћемо се у овом раду осврнути на мерење снаге диодним детектором.

Најпре ћемо у другом поглављу, које чини теоријски увод у тематику диодног детектора, поћи од основне поделе детектора, њихових карактеристика, предности и мана. Видећемо и у коју групу спада диодни детектор. Затим ће бити укратко престављена историја развоја техника мерења снаге од самих почетка па до данашњих дана. Принцип рада и реализација детаљније улазе у појединости диодног детектора, начин функционисања, како се конструише и каква су нам очекивања. Потом иде кратка двотонска анализа да се на једноставном примеру види рад диодног детектора у фреквенцијском домену. Као једна од најчешћих примена диодног детектора, биће и речи о аутоматској контроли снаге, како аналогној тако и дигиталној, и улози диодног детектора у обе варијанте. На крају ћемо се осврнути и на температурну зависност и како она утиче на преносну карактеристику нашег диодног детектора.

Треће поглавље се бави симулацијом диодног детектора у програмском пакету Microwave Office. У том поглављу дефинисан је пројектни циљ, супстрат на којем се ради као и које компоненте се користе у реализацији диодног детектора. Потом иде детаљна анализа резултата симулација, идеалног кола и кола реализованог у микротракастој технологији, као и поређење њихових  $s$ -параметра, струје и напона у прелазном и стационарном режиму као и саме преносне карактеристике и осетљивости диодног детектора. Биће анализиран и утицај различитих отпорности и капацитивности у паралелној грани диодног детектора. Поглавље се завршава описом дизајна шеме диодног детектора у Microwave Office програму.

Четврто поглавље је посвећено изгледу лејаута и изради прототипа плочице у софтверском пакету Altium Designer док је пето поглавље посвећено изради самог прототипа као и проблемима, решењима и резултатима који су се јавили током мерења.

## 2. Диодни детектор

### 2.1. Врсте детектора

Диодни детектори чине саставни део великог броја уређаја у којима је неопходно надгледање снаге сигнала. Основна улога јесте да RF сигнал који прими, детектор конвертује у DC сигнал на излазу који је пропорционалан снази улазног RF сигнала. Сви детектори се могу поделити по томе да ли су скаларни или векторски и да ли су широкопојасни или ускопојасни. Скаларни детектор подразумева да може да мери само амплитуду сигнала али не и фазу (за разлику од векторског детектора). Широкопојасни детектори, као што и само име каже, могу да мере снаге у релативно широком опсегу учестаности, док ускопојасни детектори могу да мере снаге у неком предефинисаном уском опсегу учестаности. Диодни детектор је скаларан и може бити широкопојасан. У наставку ћемо видети предности и недостатке скаларних детектора у односу на ускопојасне детекторе.

Предности скаларних детектора су што су релативно широкопојасни и представљају повољније решење у односу на ускопојасне детекторе (на пример, хетеродини пријемник). Погодни су за мерење снаге уређаја који врше фреквенцијску транслацију сигнала (на пример, миксери).

Недостаци скаларних детектора су што се динамички опсег (однос максималне и минималне снаге коју детектор може да детектује) може повећати само повећањем снаге сигнала, за разлику од већег броја опција код ускопојасних детектора. Што је скаларни детектор широкопојаснији он пропушта више шума и друге нежељене сигнале, чиме се смањује његов динамички опсег.

Сваки од типова детектора (термистор, термопар и диодни детектор) имају своје предности и недостатке. Термистори могу да мере снаге у опсегу негде од  $-30$  dBm ( $1 \mu\text{W}$ ) до  $+10$  dBm ( $10 \text{ mW}$ ), што је око  $40$  dB динамичког опсега, а фреквенцијски опсег у коме обично раде је од  $100$  kHz до  $18$  GHz. Термопаре могу да мере снаге у опсегу негде од  $-30$  dBm ( $1 \mu\text{W}$ ) до  $+20$  dBm ( $100 \text{ mW}$ ), што је око  $50$  dB динамичког опсега, а обично раде у фреквенцијском опсегу од  $10$  MHz до  $18$  GHz. Опсег мерења снага и фреквенцијски опсег диодних детектора варирају од примене. Диодни детектор описан у овом тексту, који се користи као мерач снаге, мери снаге у опсегу од  $-50$  dBm ( $10 \text{ nW}$ ) до  $+10$  dBm ( $10 \text{ mW}$ ), тако да му је динамички опсег око  $60$  dBm, а намењен је за WiFi опсег од  $2,4$  GHz.

### 2.2. Историјат мерења снаге

Још код најранијих RF и микроталасних система, било је неопходно имати могућност мерења нивоа снаге сигнала. Неки од тих техника су били прилично рудиментарни по данашњим стандардима. Један од најранијих начина мерења снаге био је да се снага неког система дисипира на потрошачу и да се измери како температура расте током времена. Пример таквог система јесте водени проточни калориметар који је подразумевао да се уз зид таласовода постави цев од стакла или неког другог диелектричног материјала и пустити воду кроз њу. Вода је добар апсорбер микроталасне енергије, па се мерење снаге вршило тако што се мерило повећање температуре воде од улаза до излаза у цев у току дефинисаног временског периода. Предност оваквог система била је што је вода и расхлађивала систем.

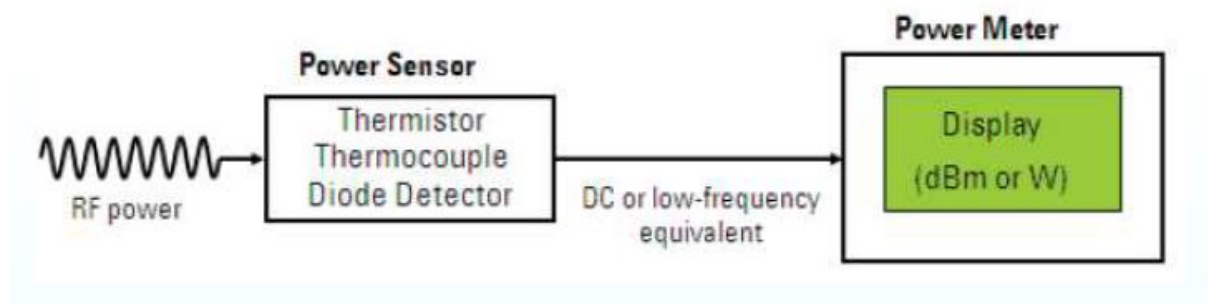
Ствари су се променило појавом нових елемената као што су батере, металне жичице са позитивним температурним коефицијентом унутар лампице, које су служиле да измере брз пораст температуре у њима, апсорбујући снагу која се требала измерити. Снага се мерила на основу нагиба криве раста температуре у времену. Што је већи нагиб био, снага је била већа и температура је брже расла. Овакво мерење се користило за мерење пика снаге. Поред ове технике, познате су биле и DC компарација импулсне снаге, мерење спрегнутим ватметром и најједноставнији метод, мерење средње снаге директно са сензора и дељењем са фактором режима сигнала (duty cycle) измереног са осцилоскопа.

Са друге стране имамо термисторе и термопаре, који користе материјале који имају негативан температурни коефицијент. Термистор се примењује у „DC substitution“ техници мерења снаге. Термистор се постави у оквиру моста балансираног DC негативном повратном спрегом. Довођењем RF сигнала, термистор се загрева, а пошто има негативан температурни коефицијент, отпорност му се смањује што за собом повлачи да повратна спрега смањује DC побуду, па се отпорност термистора враћа на првобитну вредност. Смањење DC побуде пропорционално је улазној RF снази, па се мерењем смањења DC побуде може одредити улазна RF снага. Термистор је једини сензор који користи ову технику, а данас се користи као преносиоц стандарда. Изврши се калибрација термистора, а затим се он користи за калибрацију других сензора.

Сензори са термопаром су се појавили 1974. године и представљали су унапређење у односу на сензоре са термисторима. Имали су већу осетљивост и располагали су са квадратном детекторском карактеристиком (улазна снага RF сигнала је била пропорционална излазном DC напону). Радиле су на принципу загревања два различита материјала са једне стране док се са друге налазио мерни

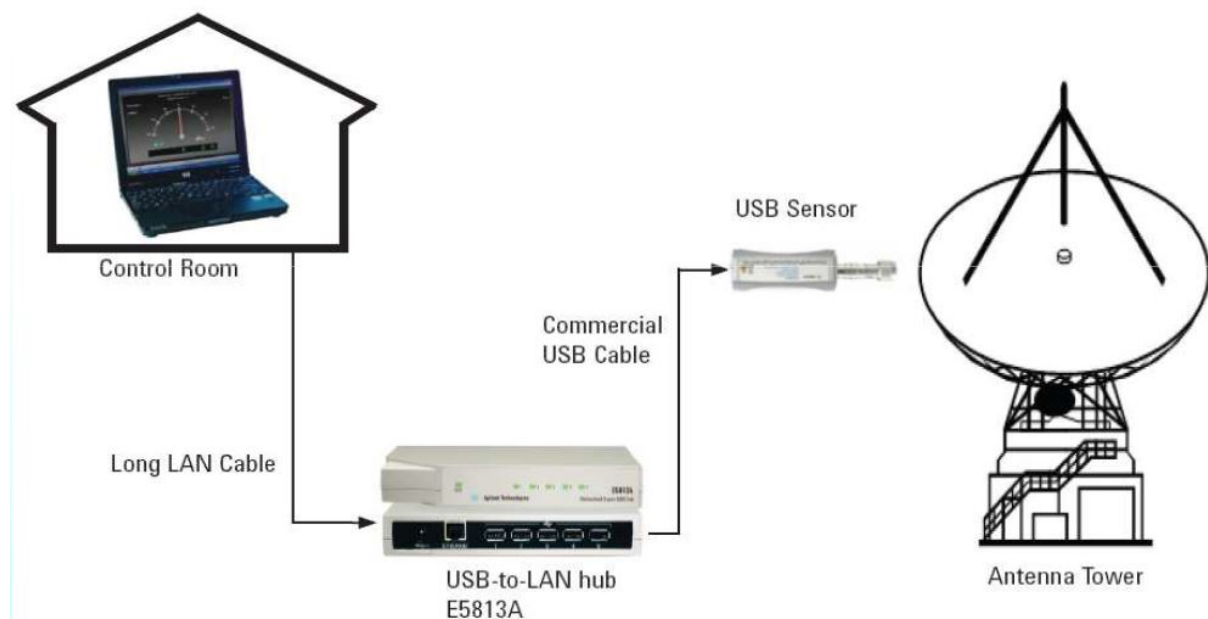
инструмент. На излазу, код мерног инструмента се потом јавља напон настао последицом дифузије носиоца наелектрисања. Мерење се сводило на то да се термопар калибрише тако да DC напон буде пропорционалан загревању метала. Мана коју су имали у односу на сензоре са термисторима јесте што нису имали повратну спрегу, па нису били претерано тачни у процени пропорционалности загревања и DC напона. Као решење проблема, сензори са термопаром су имали референтни извор (осцилатор) ради калибрације. Пре мерења се уради калибрационо мерење. Референтни извор се прикључи на мерач снаге и уради се калибрација, па се тек онда везује на извор снаге који треба да се измери.

Диоде су се већ дуже време користиле за мерење снаге али на нижим микроталасним учестаностима. Тек са појавом брзих шотки диода постало је могуће конструисати диоду са метал-полупроводничким спојем која ће бити употребљива на нешто вишим микроталасним учестаностима. Први комерцијални сензори снаге са шотки диодама су се појавили 1974. године. Ови сензори су могли да мере снаге чак и од  $-70$  dBm до учестаности око 18 GHz. Принциуска шема коришћења микроталасних детектора снаге приказана је на слици 2.1.



Слика 2.1. Принциуска блок шема како се данас мери снага.

У новије време је дошло до развоја USB сензора снаге, компактнијих уређаја у којима се налазе сви елементи неопходни за мерење. Предност USB сензора снаге у односу на претходнике (осим компактности) јесте даљинско надгледање и управљање уређајима. Уколико желимо да измеримо снагу неке антене или базне станице, а не желимо да будемо у њиховој близини, онда се мерење врши USB сензором снаге из контролне собе са удаљеног места. Принцип оваквог мерења снаге приказан је на слици 2.2.



Слика 2.2. Мерење снаге базне станице коришћењем USB сензора.

### 2.3. Принцип рада диодног детектора снаге

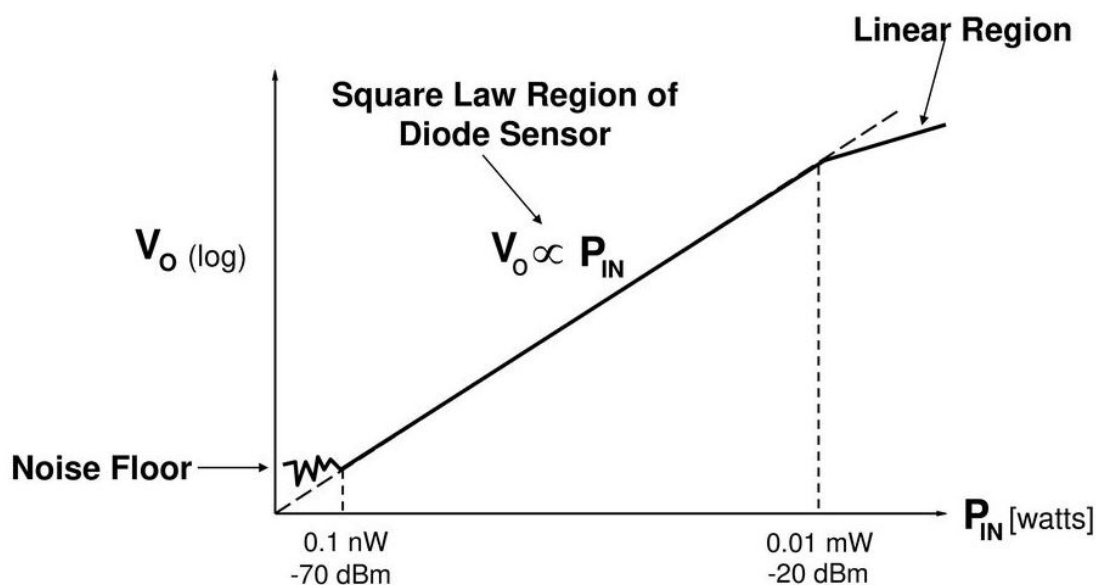
Диода је нелинеаран елемент. Струја зависи од напона на сложен начин, а ако се ова зависност развије у ред, тај ред има линеарни, квадратни, кубни члан итд. Диоде могу да конвертују АС сигнал у DC сигнал захваљујући својој нелинеарној струјно-напонској карактеристици. Међутим, ако је доминантни члан на излазу диоде уз квадратни члан, то јест, ако радимо у режиму улазних напона када је доминантни члан уз  $U^2$ , онда кажемо да смо у квадратном делу карактеристике, где нам је DC напон на излазу, пропорционалан улазној снази RF сигнала. У једначини (2.1) приказана је најчешће коришћена формула за зависност струје диоде од напона.

$$i = I_s \left( e^{\frac{nvq}{kT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Струја  $I_s$  је инверзна струја засићења диоде,  $k$  је Болцманова константа, која износи  $8,62 \cdot 10^{-5}$  eV/K,  $T$  је апсолутна температура у Келвинима,  $q$  наелектрисање електрона које приближно износи  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C, док је  $n$  корективна константа која зависи од материјала и структуре диоде. Уколико је фабрикована диода малих димензија, може се апроксимирати да је корекциони коефицијент  $n \approx 1$ . Уколико бисмо једначину (2.1) развили у Маклоренов ред, видели бисмо нулти, линеарни, квадратни, кубни члан итд, као што је приказано у једначини (2.2).

$$i = I_s \left( \frac{qv}{kT} + \frac{\left(\frac{qv}{kT}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{qv}{kT}\right)^3}{3!} + \dots \right) \quad (2.2)$$

Из формуле (2.2) може се показати да су други, трећи и остали чланови у суми ти који врше конверзију сигнала из RF опсега у DC опсег. За мале сигнале, обично је једино други члан од значаја, док су остали толико мали да се могу занемарити, а тада се каже да диода ради у квадратном делу карактеристике (*square-law region*). За тај режим рада може се показати да је излазна струја (а самим тим и излазни DC напон) пропорционалан квадрату RF улазног напона, то јест, његовој снази. До овог закључка релативно лако се може доћи када се претпостави да је улазни RF напон простопериодична величина.



Слика 2.3. Карактеристика диодног детектора.

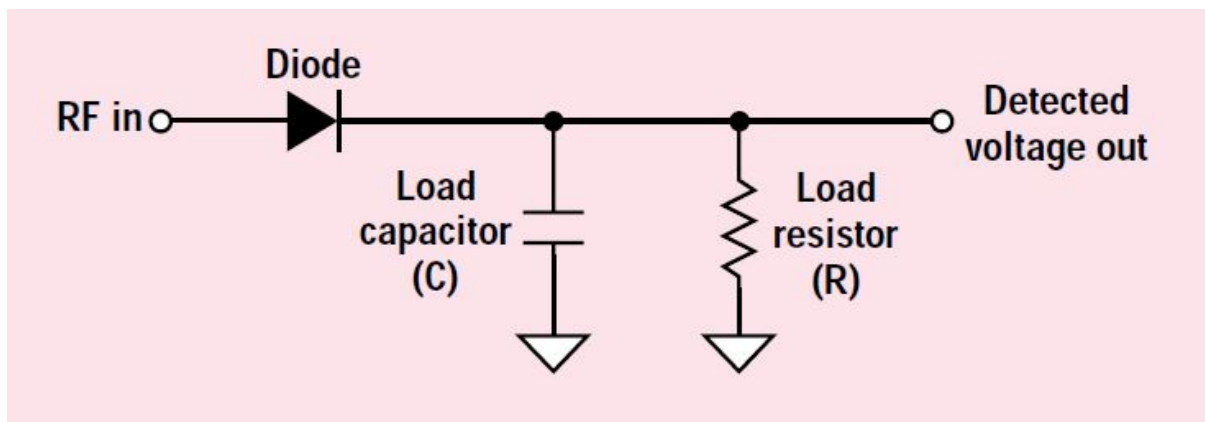
Уколико радимо са већим напонима, то јест, ако је улазна снага већа, онда и остали чланови суме у једначини (2.2) постају значајни и тада диода излази из квадратног дела карактеристике, улази у линеарни део карактеристике где је излазни DC напон пропорционалан улазном RF напону. Зависност излазног DC напона од улазне снаге стандардног диодног детектора приказана је на слици 2.3. Као што се са слике 2.3 може видети, за типичне диоде, квадратни део карактеристике се простире од нивоа шума, што је негде око  $-70 \text{ dBm}$  до  $-20 \text{ dBm}$ . Прелазни режим, за који се каже да диода ради у квази квадратном делу карактеристике, постоји негде до око  $0 \text{ dBm}$  улазне снаге, након чега наступа линеарни режим рада.

### 2.4. Реализација диодног детектора снаге

За реализацију диодног детектора снаге, најчешће се користи шотки диода, јер има врло кратко време укључивања и искључивања (типично негде око  $100 \text{ ps}$ ) али и знатно нижи праг провођења од

обичних силицијумских диода, па је врло прикладна за високе фреквенције. Шотки диоде се израђују тако што се директно на полупроводник N типа наноси метал, што изазива дифузију електрона из полупроводника ка металу (јер је енергија електрона у металу мања), чиме се у полупроводнику образује област просторног наелектривања. Пошто је просторна концентрација наелектривања у полупроводнику већа, праг провођења шотки диоде је мање него код обичног силицијумског PN споја. Електрони не могу да прелазе из метала у полупроводник и тиме смо добили усмерени спој између полупроводника и метала, што чини прикључак за аноду. Други прикључак, који чини катоду, се формира додавањем области са великом концентрацијом N+ примеса на који се нанесе метал и образује се неусмерени спој. Код шотки диода нема дифузног капацитивног споја, јер нема прелаза шупљина из P у N област, нити електрона из N у P област. шотки диода има мању потенцијалну баријеру (отуда и назив Low-Barrier Schottky Diode) због мањег прага провођења.

Диодни детектор се састоји од шотки диоде која, као нелинеарни елемент, врши конверзију RF у DC сигнала. Када се она побуди простопериодичним сигналом (напоном), тј. косинусоидом на учестаности  $f_m$ , поред оригиналног сигнала, на излазу се јављају и DC компонента (која нама треба и која је пропорционална снази улазног сигнала) и хармоници на учестаностима  $2f_m, 3f_m, 4f_m, \dots$  које треба уклонити. Ту на сцену ступа RC хелија постављена одмах иза шотки диоде која функционише као нископропусни (NF) филтар. Принциуска шема диодног детектора снаге приказана је на слици 2.4.



Слика 2.4. Електрично коло диодног детектора.

## 2.5. Двотонска анализа

Погледајмо како диодни детектор, као мерач снаге, ради када на његов улаз дође сигнал сачињен од збира два косинуса.

$$U_{in} = U(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t) \quad (2.3)$$

Средња снага оваквог улазног сигнала је

$$P_{in} = \overline{U_{in}^2} \quad (2.4)$$

а таквој снази може се придружити ефективна вредност напона на излазу детектора снаге након детекције

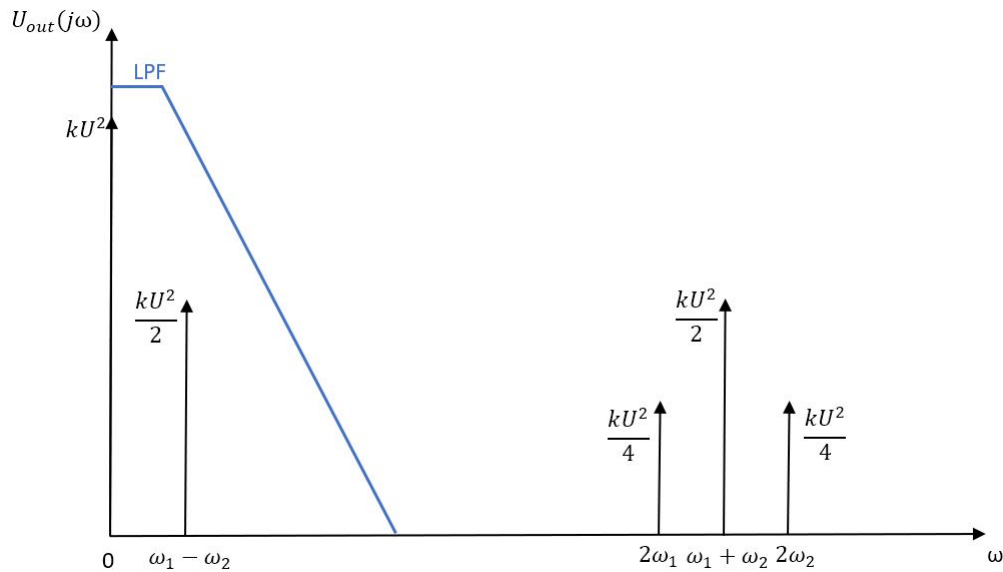
$$U_{out} = k \cdot P_{in} = k \cdot \overline{U_{in}^2} \quad (2.5)$$

У претходним изразима надвучена линија представља операцију одређивања средње вредности. Комбинацијом (2.3) и (2.4) добијамо

$$\begin{aligned} U_{out} &= k \cdot \overline{U_{in}^2} = kU^2 \overline{(\cos^2\omega_1 t + \cos^2\omega_2 t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t)} = \\ &= kU^2 \left( \frac{1 + \cos 2\omega_1 t}{2} + \frac{1 + \cos 2\omega_2 t}{2} + \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t \right) = \\ &= \{kU^2 \left( \frac{1 + \cos 2\omega_1 t}{2} + \frac{1 + \cos 2\omega_2 t}{2} + \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t \right)\}_{LPF} = \\ &= kU^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \cos(\omega_1 - \omega_2)t \right) = \\ &= kU^2 (1 + \cos(\omega_1 - \omega_2)t) = kU^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Улогу усредњавања у практичној реализацији преузима NF филтер који потискује све високофреквентне компоненте. Из израза (2.6) видимо да излазни сигнал, након пропуштања кроз NF филтар, има DC компоненту  $kU^2$  пропорционалну улазној средњој снази сигнала (са коефицијентом пропорционалности  $k$ ) и косинусни сигнал на врло ниској учестаности, због кога NF филтар мора да има врло уску ивицу, не

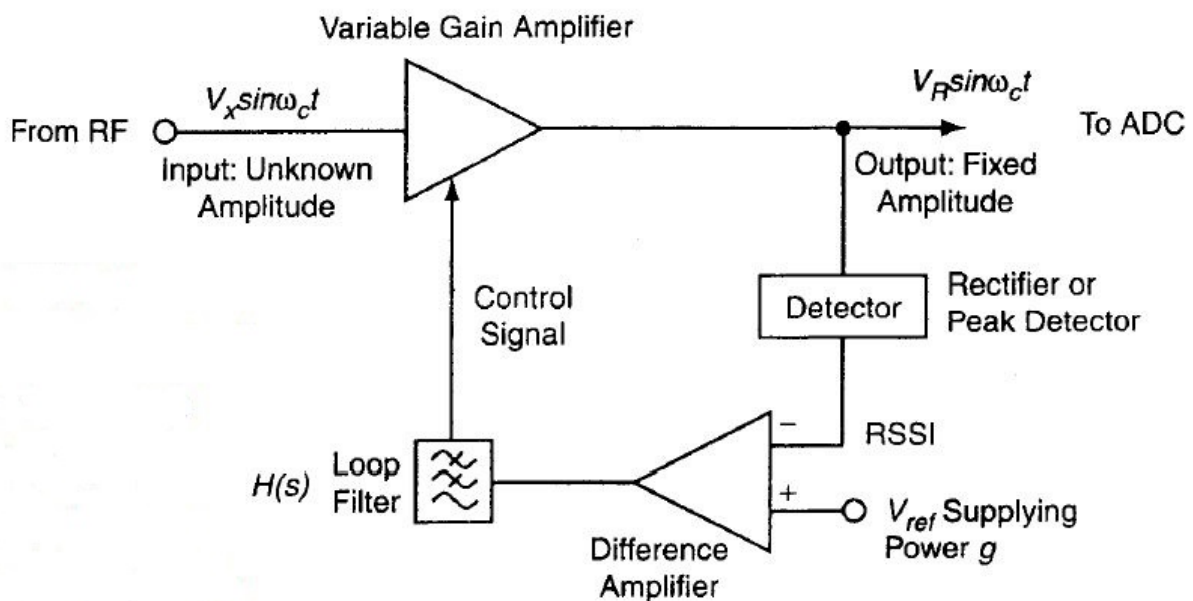
би ли довољно ослабио ту компоненту. Спектар сигнала на излазу диодног детектора у овом случају приказан је на слици 2.5. На тој слици је са LPF приказана и карактеристика филтра.



Слика 2.5. Спектар сигнала на излазу из диодног детектора.

## 2.6. Примена диодних детектора у аутоматској контроли снаге

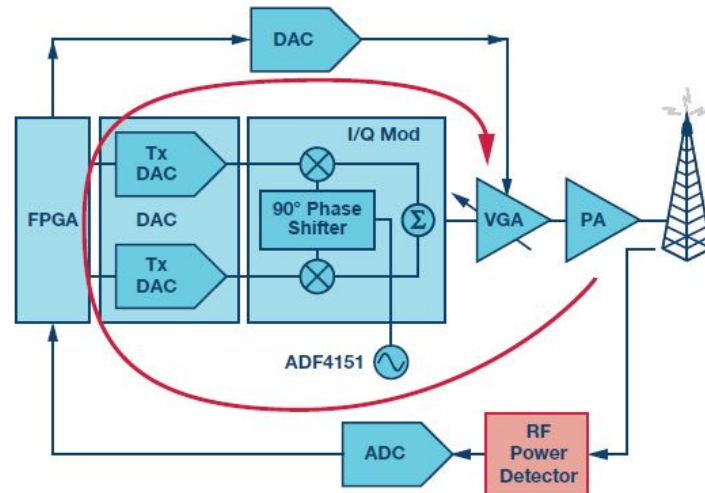
Аутоматска контрола снаге (Automatic Gain Control – AGC) се користи да обезбеди да сигнал има напонски ниво који је компатибилан са динамичким опсегом аналогно – дигиталног конвертера (ADC – Analog to Digital Converter) у оквиру радио предајника или пријемника. Уколико AGC не обезбеди сигнал адекватног напонског нивоа (сигнал пуне скале – Full-Scale Range Utilization), ADC ће одсецати сигнал, то јест, имаћемо нелинеарна изобличења. AGC такође има задатак да има брзо време одзива, не би ли испратио брзе промене нивоа сигнала, али да не унесе превелики шум у систем. Класични систем AGC користи негативну повратну спрегу у оквиру које се снага на излазу појачавача променљивог појачања прати и користи за подешавање тог појачања, тако да се снага излазног сигнала одржава на релативно константном нивоу. Уређај који је задужен да измери снагу сигнала који је изашао из појачавача јесте управо диодни детектор. На слици 2.6 се налази принцип рада аналогне верзије AGC система.



Слика 2.6. Аналогни AGC систем са диодним детектором.



Сигнал непознате амплитуде бива појачан од стране напонски контролисаног појачавача (VCA – Voltage Controlled Amplifier). Тако појачан сигнал се спрегне са диодним детектором, који на свом излазу даје једносмерну компоненту која је пропорционална снази улазног сигнала (RSSI – Received Signal Strength Indicator), који се онда пореди са жељеним напонским нивоом  $V_{ref}$ . Диференцијални појачавач направи разлику та два сигнала, пропусти је кроз NF филтар са функцијом преноса  $H(s)$  чиме се креира контролни сигнал, који затим подешава променљиво појачање напонско контролисаног појачавача. Дигитална варијанта AGC система приказана је на слици 2.7.

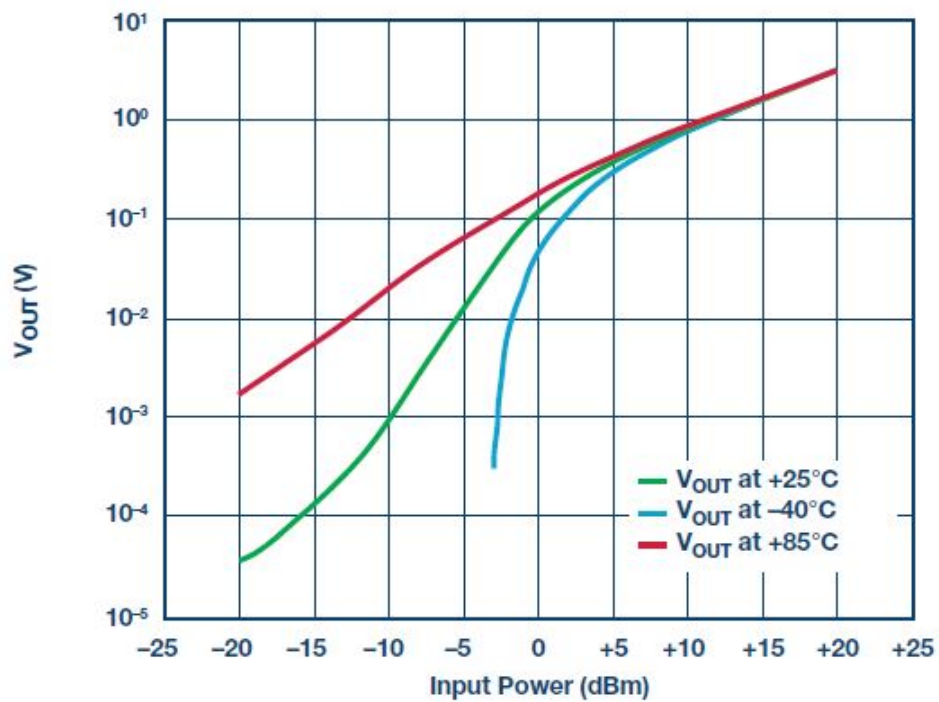


Слика 2.7. Дигитални AGC систем са диодним детектором.

Код дигиталног AGC система, сигнал из мерача снаге се дигитализује најпре, па се целокупна детекција сигнал и компарација са референтним напоном обавља у дигиталном домену. Након тога се контролни сигнал успомоћу дигитално – аналогног конвертора (DAC – Digital to Analog Converter) враћа назад у аналогни домен и контролише појачање појачавача.

## 2.7. Температурна зависност напона диодног детектора

Перформансе диодног детектора су врло подложне променама са променом температуре. На слици 2.8 је приказана преносна карактеристика диодног детектора за три различите температуре: 25° C, што је стандардна собна температура, где се лако виде квадратни, прелазни и линеарни део карактеристике, -40° C и 85° C, где незанемарљиве девијације од нормалне карактеристике крећу већ негде око 5 dBm улазне снаге. Ово чини диодне детекторе у најједноставнијој реализацији практично неупотребљивим у ситуацијама где је варијација температуре огромна. Постоје разне технике за температурну стабилизацију диодних детектора.

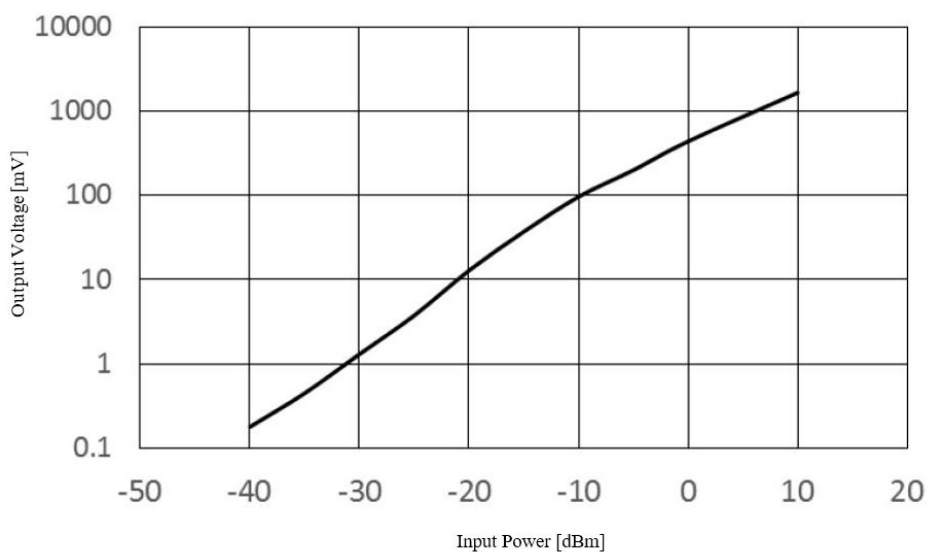


Слика 2.8. Преносна карактеристика диодног детектора на различитим температурама.

## 3. Резултати симулација

### 3.1. Циљ

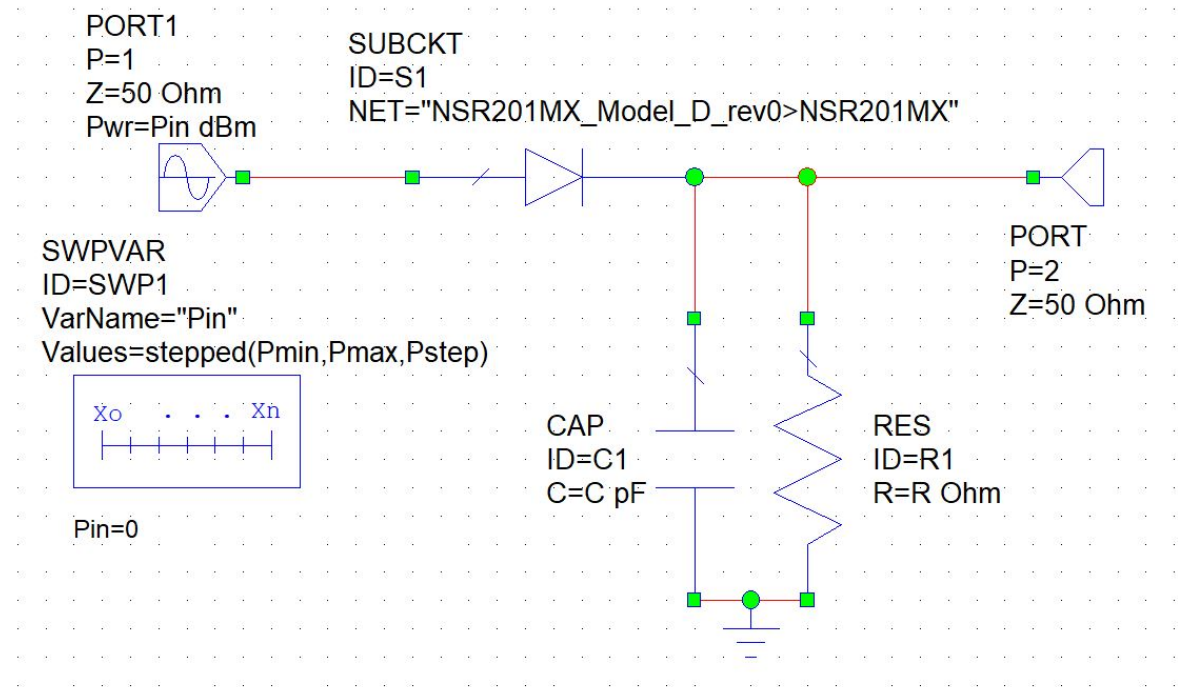
Задатак је био направити мерач снаге помоћу диодног детектора у микротракастој техници за бежичне комуникације на учестаности од 2,4 GHz. Супстрат на којем се ради је тефлон следећих параметара: дебљина супстрата  $h = 0,508$  mm, дебљина метализације  $t = 17,5$   $\mu$ m, релативна пермитивност диелектрика  $\epsilon_r = 3,0$ , тангенс угла губитака  $\tan \delta = 0,001$  и отпорност метализације нормализована у односу на злато 1. Диода која се користи је ниско-баријерна шотки диода NSR201MX направљена за високе фреквенције, смештена у мало X2DFN2 паковање. Овакво кућиште има мале паразите. Кондензатор који се користи је произведен од стране компаније Kemet ознаке R04C101J3GAC и капацитивности 100 pF смештен у 0402 кућиште. Отпорност отпорника је 100 k $\Omega$  у кућишту 0402. Жељена преносна карактеристика диодног детектора, преузета као један од примера употребе поменуте шотки диоде, приказана је на слици 3.1.



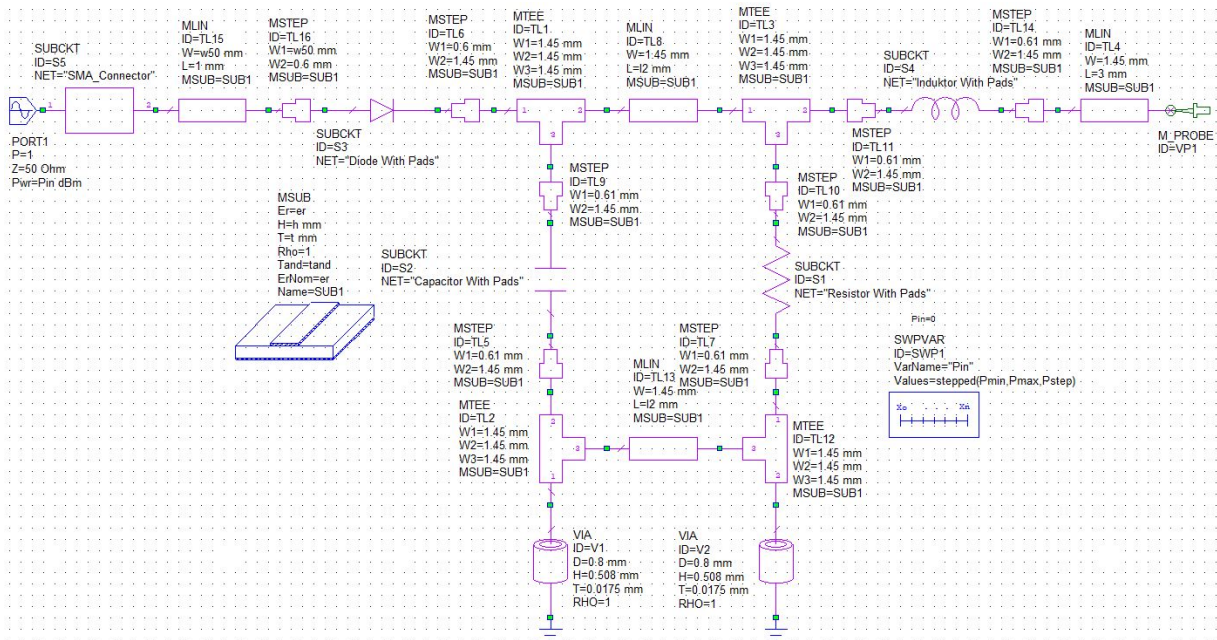
Слика 3.1. Преносна карактеристика диодног детектора направљеног помоћу NSR201MX диоде.

### 3.2. Резултати симулације у Microwave Office програму

Као што је већ напоменуто, принцип рада диодног детектора се своди на то да је током позитивних полупериода улазног RF сигнала шотки диода директно поларизована. Тада је напон на диоди већи од напона прага, диода проводи струју и пуни кондензатор (претпостављамо да је кондензатор у почетном тренутку био празан). Током негативних полупериода, напон на диоди падне испод напона прага, диода престаје да проводи, а кондензатор се празни кроз отпорник. Напон на отпорнику и кондензатору (који су повезани паралелно) представља излаз диодног детектора и он је пропорционалан улазној снази RF сигнала. На слици 3.2 приказан је идеални модел диодног детектора реализованог у Microwave Office софтверском пакету, а на слици 3.3 модел детектора реализован у микротракастој технологији. Како би се смањило "цурење" RF енергије ка DC излазу диодног детектора, на његовом излазу додат је калем произвођача Coilcraft ознаке 0402CS-R10XJLU и индуктивности 100 nH.

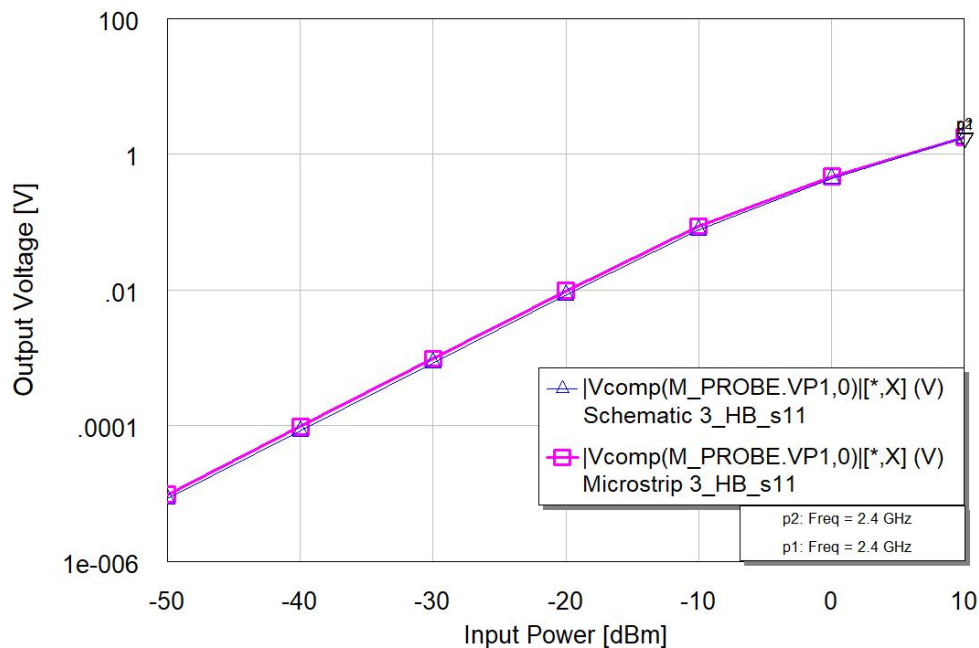


Слика 3.2. Идеални диодни детектор реализован у Microwave Office-у.



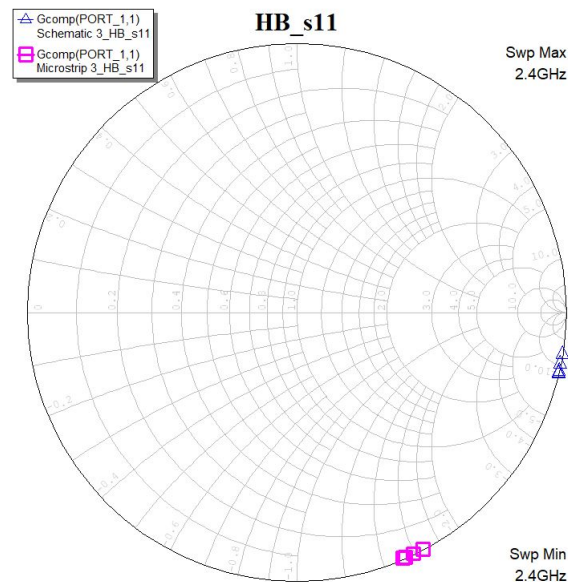
Слика 3.3. Диодни детектор реализован на MSUB супстрату у Microwave Office-у.

На основу модела кола са слика 3.2 и 3.3, добили смо преносну карактеристику диодног детектора приказану на слици 3.4. На основу те слике можемо видети да су резултати врло слични онима који су дефинисани у Application Note-у NSR201MX шотки диоде (слика 3.1).



Слика 3.4. Преносна карактеристика диодног детектора добијена у Microwave Office-у. Љубичаста крива је за модел реализован у микротракастој технологији, а плава крива је за идеално коло.

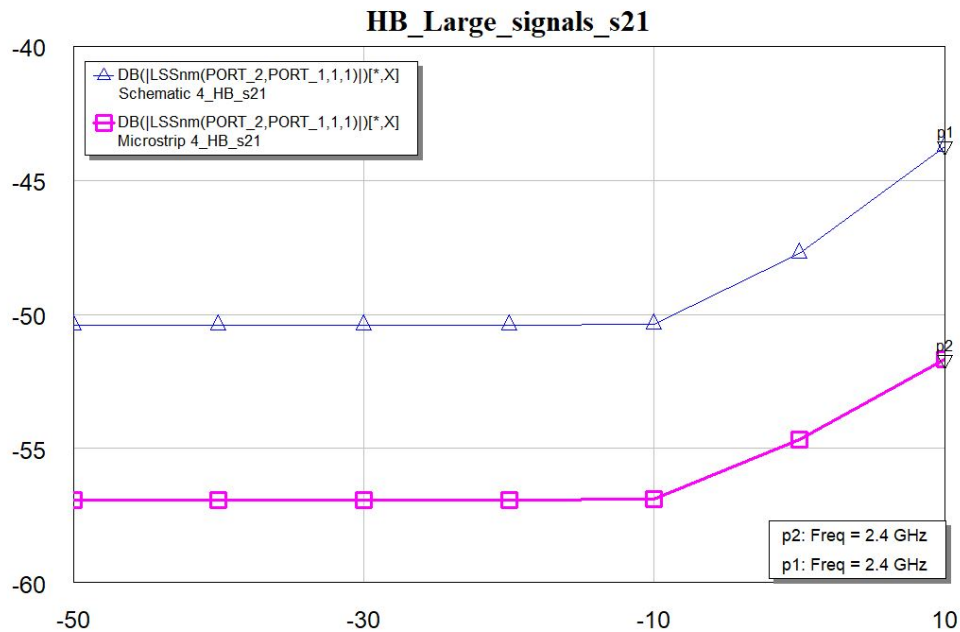
На основу  $s$ -параметра овог кола, може се закључити неколико ствари. Најпре, пошто је ово коло нелинеарно (последица нелинеарне шотки диоде), стандардни  $s$ -параметри не могу се измерити за такво коло, па користимо  $s$ -параметре за велике сигнале ( $s$ -параметре за нелинеарне моделе). На основу улазног коефицијента рефлексије (за велике сигнале) приказаног на слици 3.5, видимо да се у оба случаја, идеалног кола и детектора реализованог у микротракастој технологији, детектор практично понаша као реактивна мрежа без губитака. Померањем референтне равни овог приступа, детектор може да се понаша као отворена веза, тако да својим присуством не утиче на рад осталих уређаја ако се веже оточно главном току сигнала.



Слика 3.5. Улазни коефицијент рефлексије реализованог диодног детектора, розе – модел на супстрату, плаво – идеални модел.

На основу  $s_{21}$  параметра нашег кола, од побудног порта ка порту где ћемо прикључити волтметар, видимо да пројектовани диодни детектор сам по себи уноси довољно слабљење за RF сигнал који ће проћи ка DC приступу. У случају идеалног модела, слабљење је преко 43 dB, што је сасвим довољно, међутим, слабљење за модел реализован на супстрату је значајно мање, око 17 dB. Због тога је пре DC

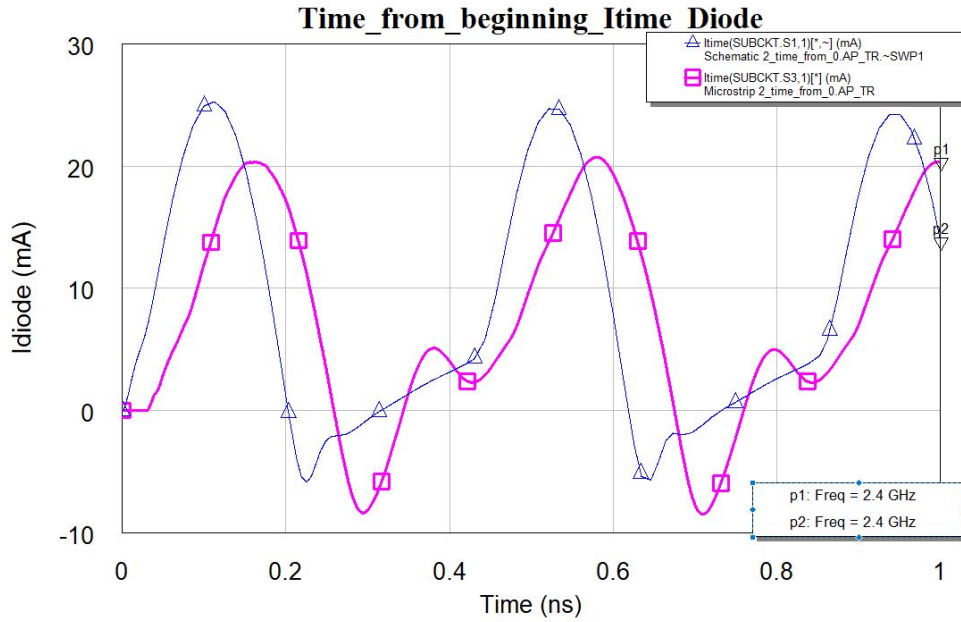
приступа додат редни калем индуктивности 100 nH који је повећао ово слабљење на преко 55 dB. Финалне  $s_{21}$  параметри приказани су на слици 3.6.



Слика 3.6.  $S_{21}$  параметар диодног детектора, розе – модел на супстрату, плаво – идеални модел.

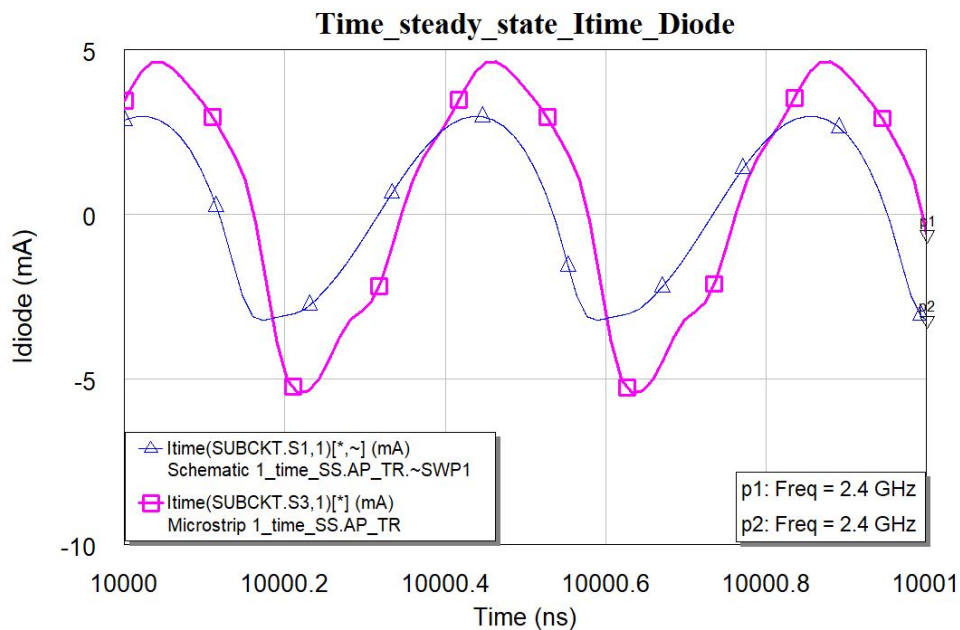
Како би се стекао бољи увид у начин функционисања диодног детектора, а и како би се проверило да ли ће се сви елементи у оквиру диодног детектора користити у дозвољеном опсегу рада, за диодни детектор спроведене су и анализе у временском домену. Пошто је временска константа паралелног RC кола доста већа од периода побудног сигнала, потребно је спровести анализу за велики број периода како би се успоставило стационарно стање (*steady state*). Посматраћемо у наставку и прелазни режим и стационарно стање. У Application Note-у NSR201MX шотки диоде наведене су дозвољене границе неких параметара при температури од 25°C. Уколико те границе пређемо, можемо оштетити диоду. Међу тим параметрима имамо напон (Reverse Voltage) који не сме прећи 2 V и струју директно поларисане диоде (Forward Current) која не сме прећи 50 mA. Анализом у временском домену проверићемо да ли ће ове вредности бити прекорачене.

На слици 3.7 приказана је струја диоде почевши од тренутка укључења побуде, то јест прелазни режим, за ниво улазне снаге сигнала 10 dBm. Са слике се може видети да док струја расте, кондензатор се пуни али пошто диода има коначно време искључивања, диода мало проводи и у другом смеру и то објашњава зашто струја има и негативне вредности.



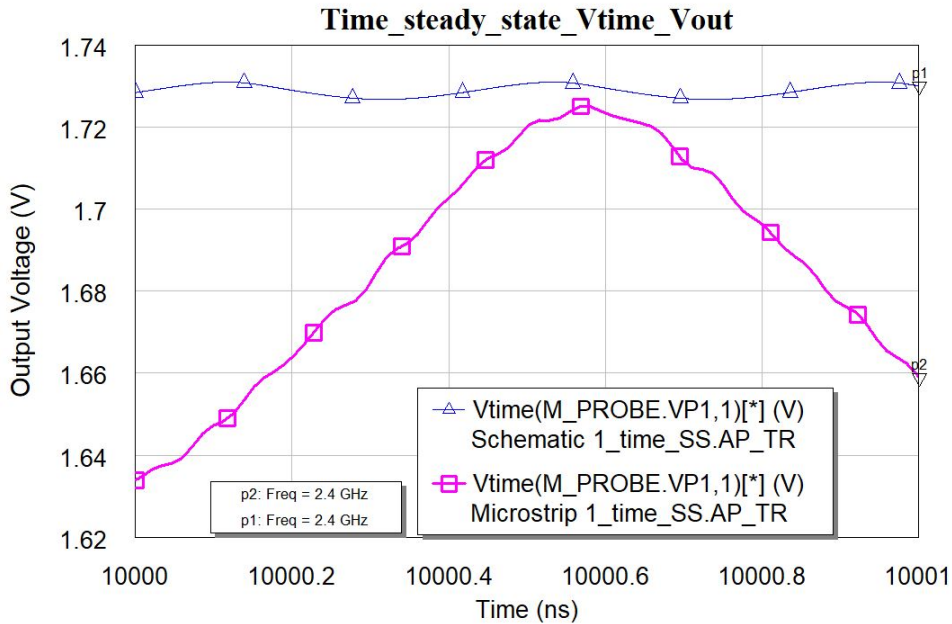
Слика 3.7. Струја диоде у прелазном режиму, розе – модел на супстрату, плаво – идеални модел.

На слици 3.8 приказана је струја диоде у устаљеном режиму, такође за улазну снагу од 10 dBm. Струја ни у једном случају (прелазни режим и стационарно стање) не прелази постављену границу од 50 mA, па закључујемо да се пројектовани детектор може безбедно користити за мерење снага сигнала до 10 dBm.



Слика 3.8. Струја диоде у устаљеном режиму, розе – модел на супстрату, плаво – идеални модел.

На слици 3.9 приказан је напон на излазном (DC) приступу у устаљеном режиму у функцији времена. У случају идеалног модела, напон на излазу помало осцилује као последица пуњења и пражњења кондензатора. У случају модела пројектованог на супстрату та промена је нешто већа. Међутим, у оба случаја тај напон се практично може сматрати једносмерним, посебно због тога што је промена толико брза у времену, да обични волтметри не могу да је детектују.

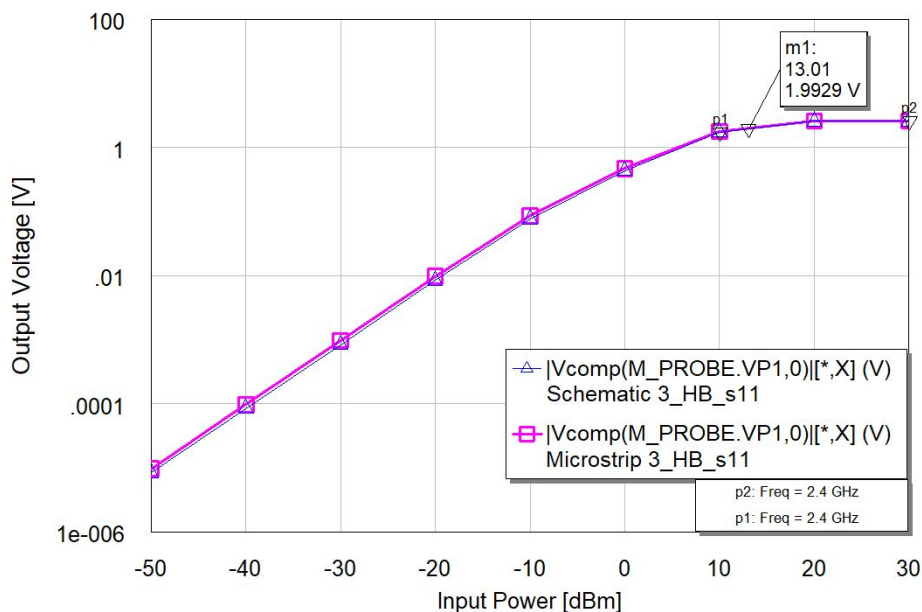


Слика 3.9. Напон на излазу диодног детектора у устаљеном режиму за улазну снагу од 10 dBm, розе – модел на супстрату, плаво – идеални модел.

На основу података произвођача диоде, за динамички опсег пројектованог детектора може се очекивати око 60 dB. Уколико бисмо проширили опсег улазне снаге сигнала преко 10 dBm, видели бисмо да преносна карактеристика диодног детектора почиње да се квари, као последица тога што диода постаје инверзно поларисана преко напона пробоја. Применом формуле за расположиву снагу генератора

$$P_p = \frac{V^2}{4R_g} \quad (3.1)$$

и уврштањем да је  $R_g = 50 \Omega$  и  $V = 2V$ , што је горња граница стреса при којем ће диода радити без проблема, добијамо да је  $P_p = 0,02 W$  или око 13,01 dBm. На слици 3.10 приказан је излазни напон диодног детектора у функцији улазне снаге за улазне снаге до 30 dBm. Са те слике јасно се види да се карактеристике детектора квари када се пређе улазни ниво сигнала од 13 dBm, као што је и предвиђено претходном краћом анализом.

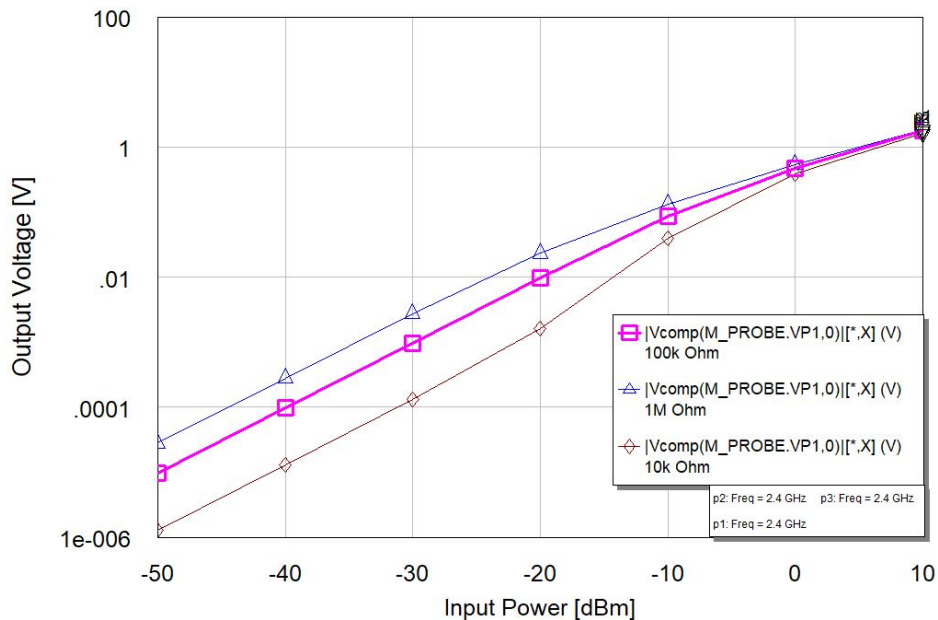


Слика 3.10. Изобличење преносне карактеристике диодног детектора ван препорученог опсега улазне снаге.



### 3.3. Утицај промене отпорности и капацитивности у паралелном RC делу кола на карактеристике детектора

На слици 3.11 је приказана преносна карактеристика диодног детектора за три различите отпорности отпорника  $R$ . Са те слике можемо уочити да повећавањем отпорности  $R$  осетљивост пријемника расте, односно, за исти опсег улазних снага, добијамо већи опсег напон на излазу.

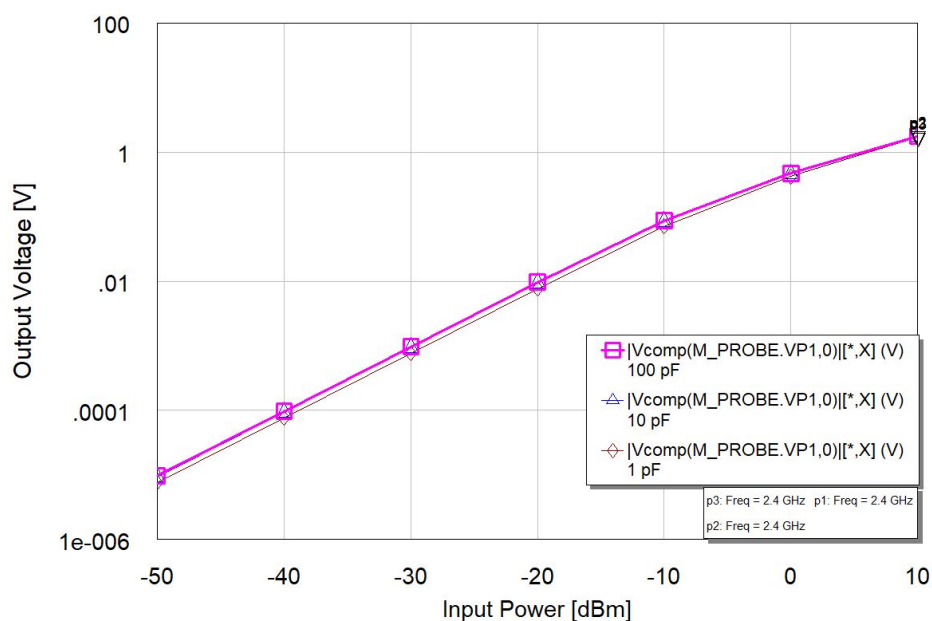


Слика 3.11. Зависност преносне карактеристике диодног детектора од отпорности  $R$ .

Слично томе, на слици 3.12 приказана је преносна карактеристика диодног детектора за три различите капацитивности кондензатора  $C$ . И у овом случају са повећањем капацитивности  $C$  осетљивост диодног детектора расте. Међутим, уколико узмемо веома велике  $R$  и  $C$ , временска константа диодног детектора

$$\tau = RC \quad (3.1)$$

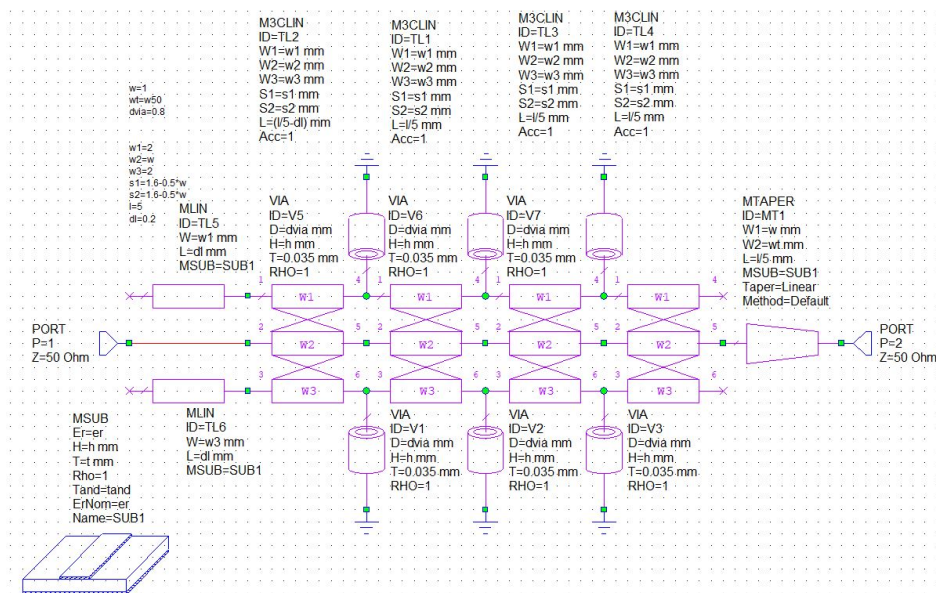
ће бити превелика, односно, време пражњења кондензатора на отпорнику ће бити велико и може проузроковати неправилно детектовање улазног RF сигнала. Због тога је, као компромисно решење, узето да је отпорност отпорника  $100 \text{ k}\Omega$ , а капацитивност кондензатора  $100 \text{ pF}$ .



Слика 3.12. Зависност преносне карактеристике диодног детектора од капацитивности  $C$ .

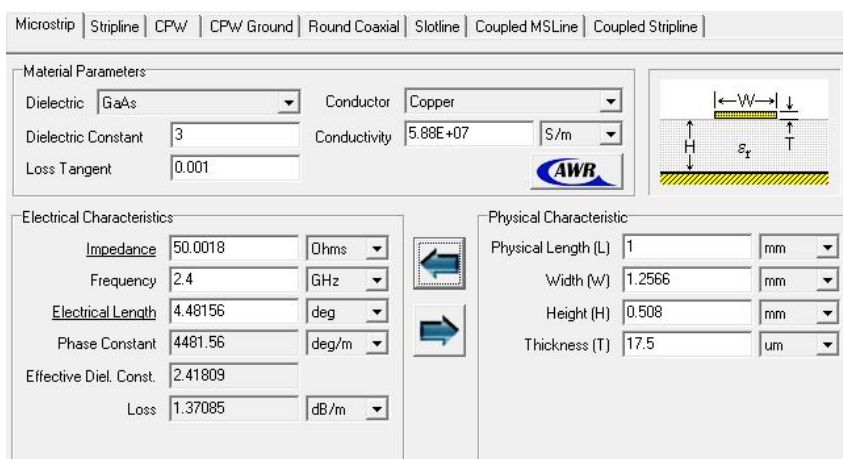
### 3.4. Неки детаљи дизајна

Диодни детектор реализује се у микротракастој техници и представља хибридно коло, јер се састоји од планарног дела и дискретних елемената: диоде, отпорника, калема и кондензатора који ће се директно лемити на плочицу. Пошто желимо да нам финална плочица буде што мања, трудићемо се да проводни водови који спајају наше дискретне компоненте, буду што краћи. Целокупан изглед диодног детектора у микротракастој техници био је приказан на слици 3.3, а прва компонента у ланцу, јесте SMA конектор. На слици 3.13 приказан је део планарног кола предвиђеног за лемљење SMA конектора.



Слика 3.13. Дизајн SMA конектора.

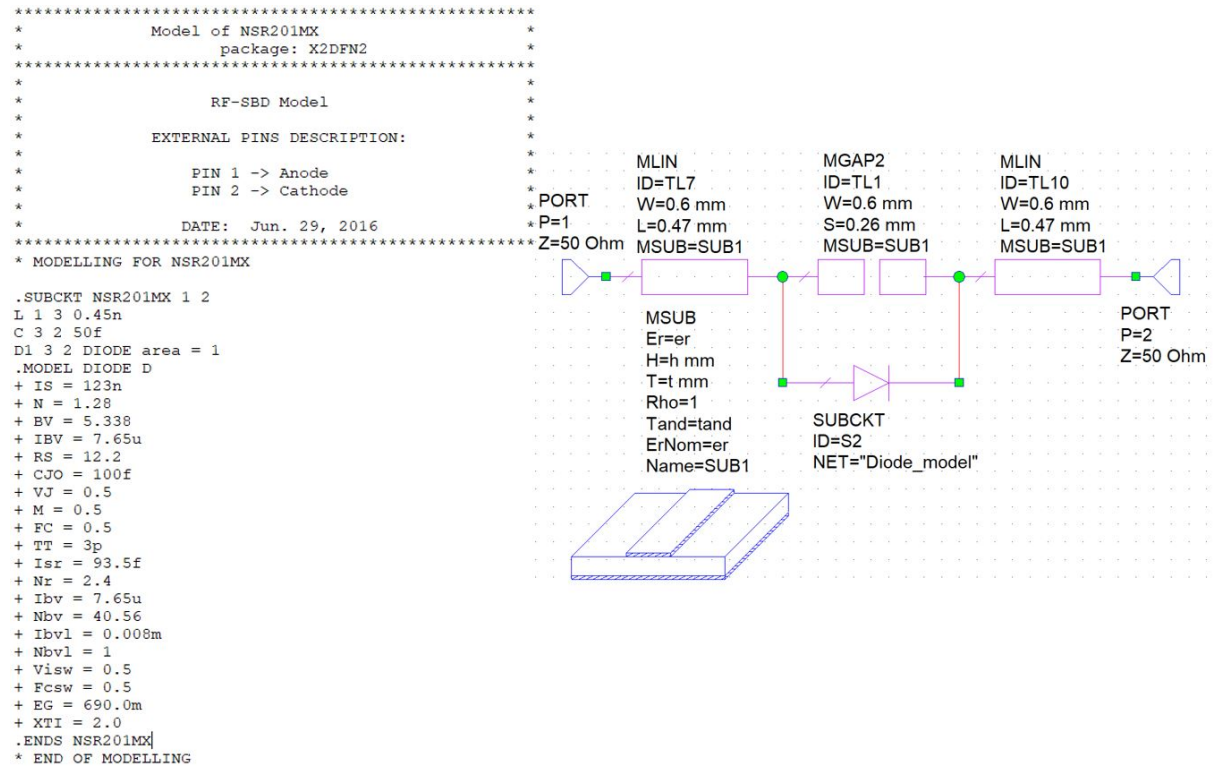
Мали зазор је направљен на почетку унутрашњег проводника SMA конектора, да би се спречило подливање калаја приликом лемљења конектора. На тај начин кратко би се спојили "врљи" проводник SMA конектора и "маса". Са MTAPER елементом је направљен прелаз између SMA конектора и 50-омског вода који води до диоде. Ширина 50-омског микротракастог вода (који ће бити израђен од бакра специфичне отпорности  $\sigma = 58 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ ) зависи од супстрата на којем се прави, то јест од диелектрика. Прорачун ширине вода извршен је у калкулатору параметара водова, то јест TXLINE интегрисаном у Microwave Office софтверском пакету, а изглед овог калкулатора приказан је на слици 3.14.



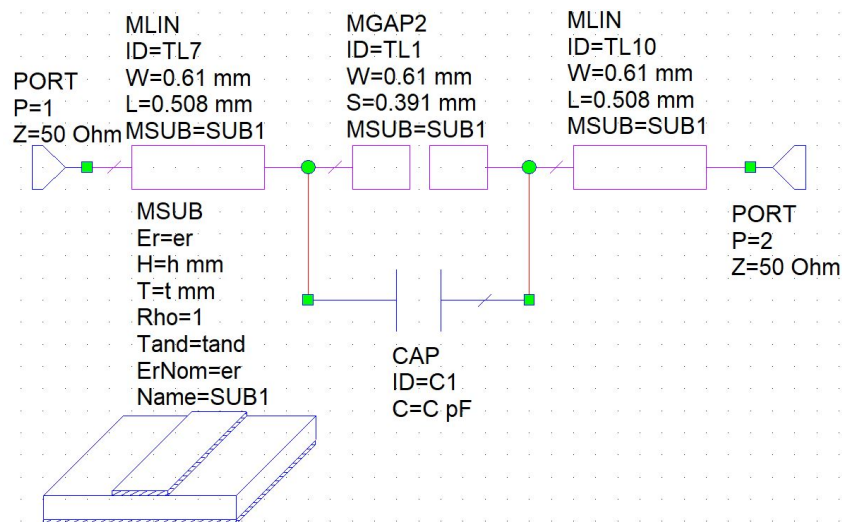
Слика 3.14. Прорачун ширине 50-омског вода.

SPICE модел диоде, као и величине параметара педова диоде преузети су из Application Note-a NSR201MX и приказани су заједно на слици 3.15. На слици 3.15 приказан је и начин на који је у Microwave Office-у обезбеђено да се у лејауту комплетног кола лепо добију и педови за лемљење диоде,

а на слици 3.16 слично је приказано и за кондензатор (димензије падова су исте за отпорник, кондензатор и калем пошто су у истом 0402 паковању).



Слика 3.15. SPICE модел диоде (лево) и модел диоде са падовима (десно).



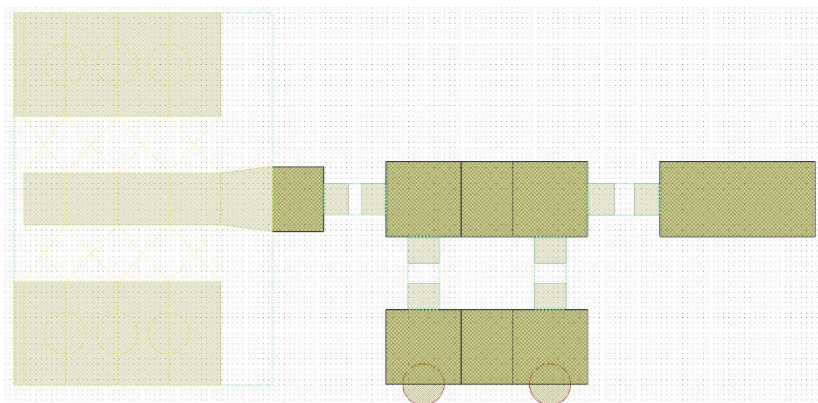
Слика 3.16. Модел кондензатора са падовима.

У моделу диодног детектора постоји укупно осам вија и све су истог пречника од 0,8 mm. Шест их се налази у оквиру дизајна места за лемљење SMA конектора док су друге две постављене непосредно испод кондензатора и калема. Ради компактности плочице и с обзиром на то да радимо са релативно малим дискретним компонентама, било је неопходно да водови између њих буду кратки. Због тога су вод између SMA конектора и диоде и водови који раздвајају отпорник и кондензатор свега 1 mm дужине, док је вод иза калема дужине 3 mm.

Међусобно спајање три приступа у једну тачку извршено је помоћу Т спојева (односно МТЕЕ елемената). МТЕЕ модел користи изразе у затвореном облику добијене интерполацијом и апроксимацијом нумеричких резултата и најтачније резултате даје када се на њега повеже МСТЕР елемент. МСТЕР елемент моделује ефекте који постоје на споју водова различитих ширина. Коначан изглед целокупног диодног детектора са свим елементима је приказан на слици 3.3.

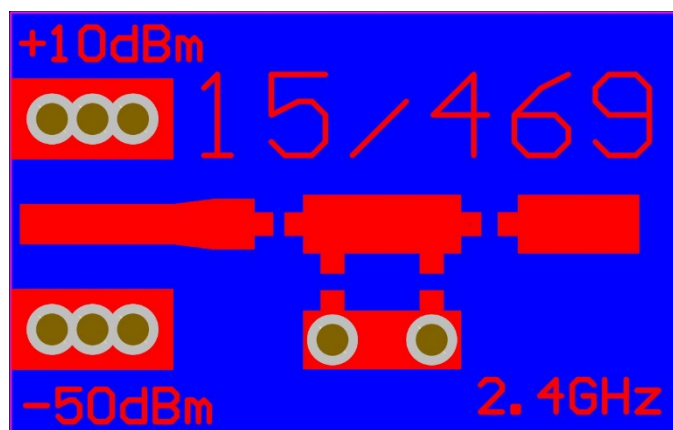
## 4. Изглед лејаута

У Microwave Office програму програму, након састављања финалне шеме диодног детектора у микротракастој техници на MSUB супстрату, можемо одмах видети и изглед лејаута, као што је приказано на слици 4.1.



Слика 4.1. Изглед лејаута диодног детектора у Microwave Office програму.

Из Microwave Office програма лејаут се може директно извести и увести у друге програмске пакете, намењене за цртање шема за израду самих плочица. Један од таквих програма је и Altium Designer, а изглед пројектованог диодног детектора у том програму је приказан на слици 4.2.

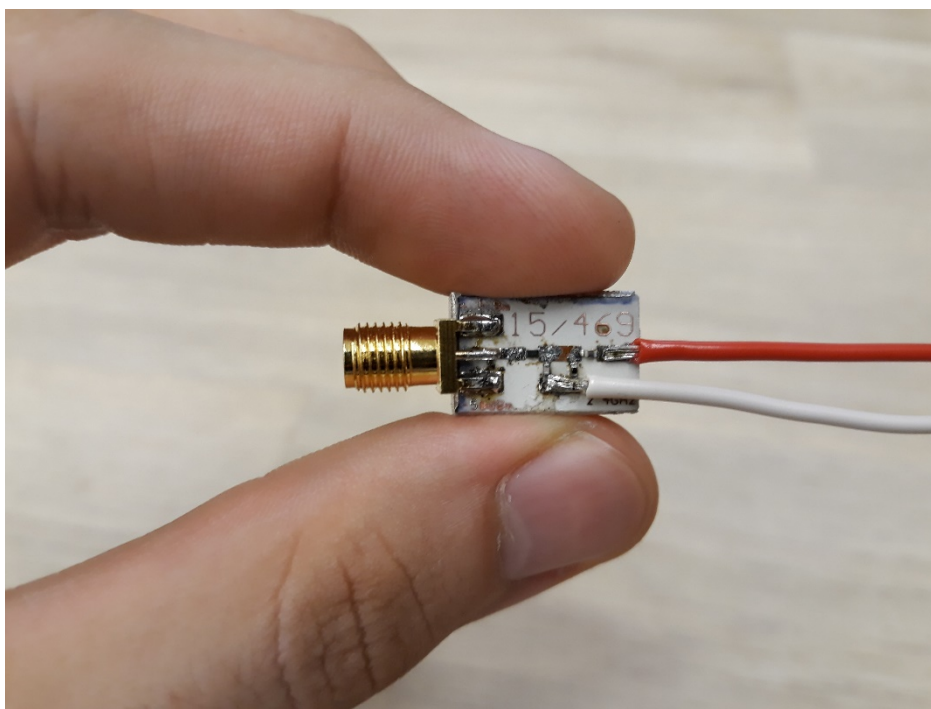


Слика 4.2. Изглед прототипа диодног детектора у Altium Designer-у.

Овај прототип има само неколико слојева. Први је top layer који чини проводне водове (вруће или сигналне проводнике), а на слици 4.2 представљен је црвеном бојом. Други је bottom layer који чини проводна површ (маса), а на слици 4.2 означен је плавом бојом. Вије се налазе у multilayer-у, а на слици 4.2 означене су браон-сивим круговима. Коначно, keep-out layer-ом, означеним са љубичастом бојом на слици 4.2 су означене границе прототипа диодног детектора. Тачне димензије прототипа износе 16,54 mm x 10,46 mm.

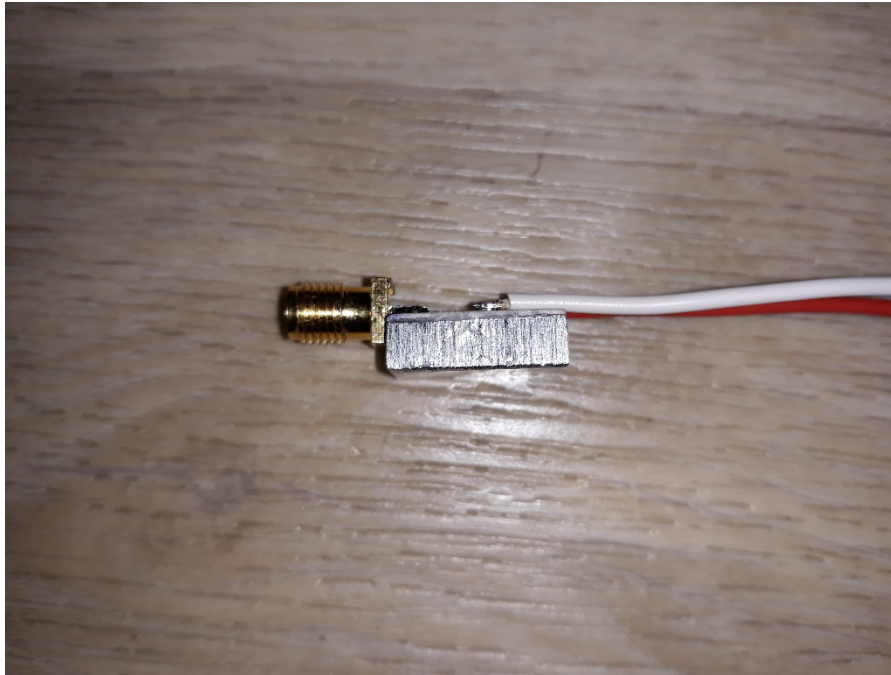
## 5. Израда прототипа

Израда прототипа се састојала од тога да на плочицу димензија 16,54 mm x 10,46 mm и дебљине 0,543 mm (0,508 mm дебљина супстрата и 2 x 17,5  $\mu$ m дебљина метализације), залемимо SMA конектор и четири дискретне компоненте, диоду димензија 1 mm x 0,6 mm и дебљине 0,37 mm, кондензатор димензија 1 mm x 0,5 mm и дебљине 0,5 mm, отпорник димензија 1 mm x 0,5 mm и дебљине 0,3 mm и калем димензија 1,19 mm x 0,64 mm и дебљине 0,66 mm. Због врло малих димензија компоненти и плочица, голим оком је било скоро немогуће извршити лемљење. Неопходно је било користити пинцете за руковање ситних компоненти и наношења врло мало течног калаја на тачно одређена места, прецизних лемилница као и доста лупа, специјалних наочара и камера за увељичавање. Изглед прототипа диодног детектора са зелемљеним компонентама и SMA конектором приказан је на слици 5.1, где је уједно представљена и величина плочице у односу на људску руку.



Слика 5.1. Изглед прототипа диодног детектора

Приликом израде прототипа, наишли смо на два проблема. Први проблем је био тај што нам је диода пуцала након што би је залемили за плочицу. Разлог томе је био тај што се тефлон (који је лако савитљив у односу на FR-4) приликом хлађења мало савијао и то је доводило до напрснућа диоде. Међутим, тефлон генерално даје боље резултате, па зато нисмо одустали од њега. Као решење овог проблема на доњу страну плочице залепили смо дебљи слој алуминијума, који је имао задатак да спречи савијање плочице, а самим тим и пуцање диоде. Бочни изглед плочице приказан је на слици 5.2.



Слика 5.2. Изглед бочне стране прототипа диодног детектора са нанетим алуминијумом

Други проблем се јавио приликом мерења карактеристике диодног детектора. Иницијално је планирано да се као извор микроталасне енергије користи анализатор мрежа коме је могуће мењати ниво инцидентне снаге. Променом те снаге и мерењем DC напона на излазу детектора снимила би се карактеристика детектора. Међутим, касније је утврђено да се приступ анализатора мрежа не може посматрати као једноставан извор микроталасног сигнала (прилагођени генератор), већ да испред тог еквивалентног генератора постоји блокатор DC сигнала који служи да заштити унутрашње склопове анализатора мрежа од преоптерећења DC сигнаlima. Овај DC блокатор може се разумети и као кондензатор редно везан за еквивалентним прилагођеним генератором. Према томе, све укупно, приступ анализатора мрежа може се разумети као идеални напонски генератор променљиве инцидентне снаге, редно везан са отпорником отпорности  $50 \Omega$  и кондензатором. Напон на излазу диодног детектора је сложенопериодичан са доминантном једносмерном компонентом која би се мерила волтметром. У електричном колу које се састоји од диодног детектора напајаног анализатором мрежа, блокатор DC сигнала (кондензатор редно повезан са прилагођеним генератором) онеспособљава успостављање једносмерног напона на излазу детектора. Због тога се на излазу детектора напајаног анализатором мрежа добија (практично) нулти једносмерни напон. Ово је потврђено и експериментом.

Као решење овог проблема било је потребно наћи извор високофреквентног сигнала који у себи не садржи DC блокатор. У ове сврхе искоришћен је (прилагођени) генератор сигнала који је могао да генерише сигнал учестаности до 10 MHz. Међутим, тај генератор сигнала није имао опцију подешавања снаге сигнала директно, већ само амплитуде сигнала. Амплитуда овог сигнала мерена је осцилоскопом. Изглед мерне поставке са генератором сигнала и осцилоскопом приказан је на слици 5.3.



Слика 5.3. Изглед мерне поставке са генератором сигнала (лево) и осцилоскопом (десно).

Да бисмо добили снагу сигнала, прво смо на основу амплитуде напона ( $U_{amp}$ ) израчунали ефективну вредност,

$$U_{eff} = \frac{U_{amp}}{\sqrt{2}} \quad (5.1)$$

а затим ту ефективну вредност напона конвертовали у снагу инцидентног таласа изражену у dBm, подразумевајући номиналну импедансу  $Z_c = 50 \Omega$ .

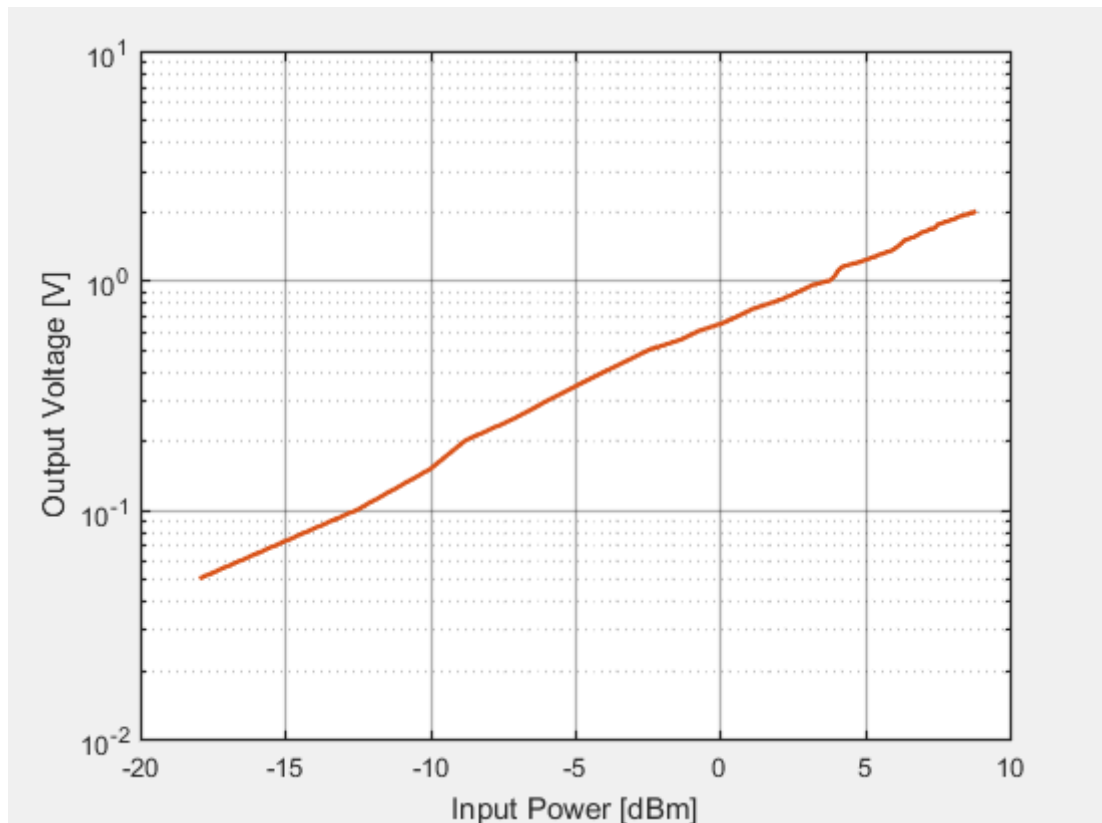
$$P_{in} = 10 \log_{10} \left( \frac{U_{eff}^2}{4Z_c} \right) \quad (5.2)$$

На излазу плочице се очитаво DC напон помоћу мултиметра. Изглед целокупне мерне поставке за мерење преносне карактеристике прототипа диодног детектора приказан је на слици 5.4.



Слика 5.4. Мерна поставка прототипа диодног детектора.

Измерена преносна карактеристика прототипа диодног детектора за улазну снагу сигнала од  $-20$  dBm до  $10$  dBm, приказана је на слици 5.5. Иако су резултати ових мерења добијени за другачију поставку у односу на резултате симулација, резултати са слике 5.5 и слике 3.4 поклапају се доста добро, тако да се на основу ових резултата мерења може закључити да диодни детектор функционише као што је и планирано.



Слика 5.5. Измерена преносна карактеристика прототипа диодног детектора.



## 6. Закључак

Диодни детектор не представља претерано комплексан склоп. Са друге стране, једноставна електрична шема, дизајн и принцип рада чине га врло једноставним за разумевање. Додатно, управо је та једноставност допринела да диодни детектор има велики број примена и да је широко распрострањен.

У оквиру овог рада пројектован је диодни детектор за микроталасну учестаност 2,4 GHz. Приликом пројектовања конструисан је сложен и прецизан микроталасни модел који је у обзир узео све најважније ефекте. Спроведене су анализе у временском домену и у фреквенцијском домену.

Направљен је и премерен прототип. Због врло малих димензија прототипа, монтирање дискретних компоненти било је врло захтевно. У оквиру израде овог рада наишло се и на одређен број потешкоћа. Све потешкоће успешно су превазиђене, а превазилажење неких од њих додатно је допринело бољем разумевању начина рада диодног детектора. Резултати симулација и мерења поклапају се доста добро.