СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ БЪЛГАРИЯ, СОФИЯ 1164 БУЛ. "ДЖЕЙМС БАУЧЪР" 5



**SOFIA UNIVERSITY FACULTY OF PHYSUCS** 1164 SOFIA, BULGARIA 5 JAMES BOURCHIER BLVD.

## ВАСИЛ АТАНАСОВ ВАЧКОВ

# Плазмени излъчващи структури на 2.45 GHz

## Научна специалност:

Радиофизика и физическа електроника, шифър 01.03.13

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен "доктор"

Научен ръководител: доц. д-р Живко Кисьовски

София 2015

#### Актуалност на темата

Плазмените антени са нова алтернатива на стандартните метални антени в мобилните комуникации, които бързо печелят популярност [1]. При този нов вид антени, вместо метални проводници се използва плазмена среда, като особенно внимание привличат монополните плазмени антени, създадени от високочестотни повърхнинни вълни [2,3]. Излъчването от плазмената антена може да се реализира с помощта на два източника, като от единия се черпи енергия за създаване на плазмата, а от втория се подава сигнал за излъчване от антената [4-6] като изтичащи вълни в радиочестотния обхват. Тази постановка усложнява приложението на плазмените антени и затова представлява предизвикателство да се създаде плазмена антена, захранвана от един генератор на фиксирана честота, на който част от енергията служи за създаване на плазмата а друга част се излъчва [2, 3] и то в микровълновия обхват, който се използва в съвременните комуникации. Тръбите, в които се осъществява разряда са диелектрични, като геометрични им размери са съобразени с възможността за възникване на стоящи вълни в плазмата. Изучаването и разработването на такива плазмени антени и структури е трудно поради това, че плазмата е самоорганизирана среда с променящи се параметри и импеданс в зависимост от приложената мощност за подържането й в диелектричната тръба. Съгласуването на плазмената антена, която е на практика променлив комплексен товар с подвеждащата линия, е основен проблем при изграждането на плазмени установки работещи в микровълновия обхват. При тези условия, плазмата на разряда си променя плътността, проводимостта и съответно стойността на импеданса спрямо подадената мощност от генератора. Променят се и излъчвателните характеристики на плазмената антена и диаграмата на излъчване в околното пространство. На плазмените антени се възлагат големи надежди свързани с предаването на сигнали на високи честоти до 90 GHz със скорости до 7 Gbps в стандарта Wi-Gig, където металните антени са неефективни. Разработката на реконфигурируеми антени с динамична пренастройка на честотната лента и диаграмата на насоченост, ниското ниво на шум, както и на интелигентни антени (SMART) за мобилните комуникации, са другите причини за разработване и изследване на нови конструкции плазмени антени [1].

#### Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертационния труд е да се моделира, конструира и експериментално да се изследва монополна плазмена антена на честота 2.45 GHz, захранвана от един микровълнов източник.

Формулировката на поставените задачи в дисертацията е следната:

- Конструиране и изработка на миниатюрна плазмена антена на честота
   2.45 GHz, захранвана от един микровълнов източник на сигнал.
- Числени експерименти за определяне на диаграмата излъчването на монополна плазмена антена при вариране на конструктивните размери и плазмените параметри.
- Оптимизации на конструкцията и параметрите на антената по отношение на излъчването на ЕМ вълни на честота 2.45 GHz и съгласуването със захранващата линия.
- 4. Експериментално определяне на параметрите на плазмата и на диаграмата на излъчване на миниатюрна цилинрична плазмена антена.
- 5. Теоретично описание на механизмите на излъчване от монополна плазмена антена при ниско налягане на неутралния газ.

#### Съдържание на дисертацията

Дисертацията се състои от увод и четири глави.

Глава 1 е Литературен обзор на основните характеристики и параметри на антените и методите за определяне на излъчването им в далечната зона. В тази глава са представени характеристиките на металните вибраторни антени и диелектричните антени които са сравнени с плазмените антени. Главите от 2 до 4 са посветени на експерименталните и теоретични изследвания по всяка една от задачите в дисертацията. В заключение са представени основните резултати и научни приноси от изследванията в дисертационния труд.

#### Кратко изложение на дисертацията

Втора глава е посветена на конструирането и практическата реализация на нова миниатюрна плазмена антена, измерването на плазмените параметри и

параметрите на излъчване на антената при ниско налягане в разряд на повърхнинни вълни (фиг.1). При конструиране на експерименталната плазмената монополна антена [7-9] е използвана материал кварц с диелектрична проницаемост  $\varepsilon_r = 3.8$ , от който е изготвена цилиндрична капилярна тръбичка, запълнена с газ аргон при ниско налягане. Долният край на капилярните тръбички е оформен с подходящ вдлъбнат отвор, в който се поставя възбудителят служещ за създаване разряд на повърхнинни вълни. Външния диаметър на капилярната тръбичка е R = 1.48 mm а вътрешния съответно R = 1 mm. Дължината на капилярката, която е най-пълно изследвана и са получени резултати при проведените практически измервания, е с дължина 21 mm, като излъчваща част е с дължина l = 16 mm при налягане на работния газ 0.026 Torr.



Фиг. 1 Конструкции на вертикална и хоризонтална монополни плазмени антени и коаксиалното възбуждащо устройство

Плазменият стълб в капилярката се образува, чрез подаване на микровълнов сигнал с честота f = 2.45 GHz от генератор MP6-4M (0-120) W към подвеждаща коаксиална линия с характеристичен импеданс  $Z = 50 \Omega$ . От изхода на коаксиалната линия сигналът постъпва към насочен отклонител *Pasternack-PE1124-30* (0-50)W, който служи за отклонение на отразената мощност от структурата и плазмената антена към измерителя на отразена мощност *HP-437B*, служещ за наблюдение. След това сигнала се насочва към *коаксиално възбуждащо устройство*, което е оразмерено с определена дължина, такава че да има максимум на електричното поле в края на металното жило, чрез което се създават условията за разряд на повърхнинни вълни в кварцовата капилярка. Тази система се състои от отрязъци от коаксиални линии, с дължина пропорционална на  $\lambda/4$  на микровълновия сигнал. Възбуждащо устройство е отворената коаксиална линия с дължина  $l \le \lambda/4$  с капацитивен характер на импеданса, което създава силно електрично поле в края на линията и води до пробив в газа и възбуждане на повърхнинни вълни в плазмата. Вторият перпендикулярен отрязък е отворена линия с дължина  $d \ge \lambda/4$  (Фиг. 2 а)), който служи за компенсация на капацитивното съпротивление на въбудителя и съгласуване на системата. Тази система е резонансна структура и в края на възбуждащото устройство е поставена кварцова капилярка, в която се запалва микровълновият разряд. За да има висока ефективност на излъчване, антената трябва да има оптимално съгласуване с подвеждащата линия и създадения разряд на повърхнинни вълни в кварцовата капилярка да е в режим на стояща вълна. За целта отразената микровълнова мощност трябва да е възможно най-малка, като това зависи от коефициента на отражение на структурата и се определя по следния начин:

$$\left|\Gamma\right|^{2}\left(z\right) = \frac{P_{ref}\left(z\right)}{P_{in}\left(z\right)} \tag{1}$$



Фиг.2 Еквивалентна схема на микровълновата плазмена установка

Коефициента на отражение  $\Gamma$  се определя, като отношението на отразената и падналата мощност по цялата дължина *z* на структурата и се измерва на входа. Друг важен параметър, с който е свързан коефициентът на отражение на структурата и е определящ за съгласуването, е коефициентът на стояща вълна по напрежение (VSWR) по следния начин [12]:

$$VSWR = \frac{1 - \left|\Gamma\right|^2}{1 + \left|\Gamma\right|^2} \tag{2}$$

Стойността на VSWR (за съгласувана структура VSWR < 1.5) показва съгласуването на генератора с товара и от там и ефективността на работа на цялата структура с

плазмената антена. От съществено значение за ефективната работа на антената представлява импеданса на плазмения стълб, чиито стойности за реалната и комплексната част се определят от израза:

$$Z = \frac{\eta}{\tanh[\gamma l]}, \, \gamma = \alpha + j\beta$$
(3)

За оптимално изпълнение на условията за съгласуване на цялата структура с генератора е нужно да има стойност на *входния импеданс на структурата*  $Z_{in} = 50 \Omega$  зависещ едновременно от импеданса на плазмения стълб и импеданса на останалата част на структурата. Плазменият импеданс може теоретично да се определи, като преди това сме измерили коефициента на отражение на входа на системата. Антенната система е коаксиална линия с дължина  $z = \lambda$ , която е натоварена с импеданс  $Z'_{sys}$ , равен на импеданса на паралелно свързаните линия l и линия с дължина d в присъствието на плазмен стълб с импеданс  $Z_{pl}$ , като  $Z_0=50 \Omega$ :

$$Z'_{sys} = \left[\frac{1}{\tanh(jkd)}\right] + \left(\frac{Z_0 + Z_{pl}\tan(jkl)}{Z_{pl} + Z_0\tan(jkl)}\right)^{-1}$$
(4)

В този случай с вариране на дължината d се осъществява нулиране на имагинерната част на  $Z'_{sys}$ , което се постига при приблизително изпълнение на условието  $l+d=\lambda/2$ .

По този начин структурата има резонансни свойства и съответно стойностите на полетата на повърхността на капилярката имат максимални стойности, което позволява ефективно излъчване на внесената микровълнова мощност от плазмената антена [A3].

#### Хоризонтална конструкция на миниатюрна плазмена антена

Създадена е (паралелно на първата вертикална конструкия на монополна плазмена антена) втора хоризонтална монополна плазмена антена със същите геометрични размери. При нея възбуждането на повърхнинните вълни става странично на капилярната тръбичка със същото по размери и съгласуване възбудително коаксиално устройство, което има за цел да сигури необходимите аксиална  $E_z$  и радиална  $E_r$  компоненти на полетата в началото на капилярката, при което възниква разряд на повърхнинни вълни. Конструкцията на хоризонталната плазмена антена и възбуждащото устройство са показани също на фигура 1.

Измерванията и на двете антени са проведени при еднакви условия, като се използва заземен метален екран, поставен в основата на антената за подобряване на насочеността на диаграмата на излъчване. Измервания на излъчването са провеждани в два режима на работа на микровълновия генератор – непрекъснат и импулсен, като основно внимание е отделено на резултатите, получени при непрекъснат режим.





# Фиг. 3 Блок-схеми за експериментално измерване на ДИ на вертикалната и хоризонтална монополни плазмени антени.

От съществено значение за съгласуването на антената се оказва и дължината на жилото на възбудителя, което навлиза в отвора при основата на капилярната тръбичка. Схемите за експериментално измерване на ДИ при конструкциите за вертикална и хоризонтална монополна плазмена антена са представени на фигура 3.

За оптимална дължина на металното жило на възбудителя, при която има най-добро съгласуване на плазмената антена със системата, е взета като стойност от проведените предварително компютърните симулации с електромагнитните софтуерни симулатори. Антенните измервания по снемане на диаграмата на излъчване и определяне на излъчената мощност са проведение с помоща на измерител на мощността, спектрален анализатор, микровълнов генератор работещ на 2.45 GHz, съгласуващи устройства, измерител на отразена мощност, апаратура за спектрална диагностика на плазмата и въртящ се стенд, на който е поставена плазмената антена. Измерването на мощността на излъчване и снемане диаграмата на излъчване е извършено при непрекъснат режим на антената при фиксирано разстояние от 2.8 метра между антената и измерителя на мощност. Снети са вертикална и хоризонтална ДИ при различни мощности и налягания

на аргоновия газ. Измерената излъчена мощност има най-висока стойност при изпълване на целия обем на капилярката с плазма, защото при тези условия за дължина на антената и дължината на вълната в плазмата при съответната електронна концентрация се осъществява режим на стояща вълна, при което настъпва резонанс в структурата на плазмената антена и стойността на излъчените електромагнитни полета е най-висока [A4].

#### Оптичен метод за определяне на плазмените параметри

Стойността на електронната концентрация в плазмения стълб е измерена с помоща на апаратурата за оптична диагностика на фирмата *Ocean Optics Spectrometer HR 4000* по метода на отношение на интензитетите на определени спектрални линии (*Line Ratio Method*). Газовата температура е измерена по метода описан във [A5]. Оптичният спектър на микровълновия разряд е записан при газова температура  $T_g = 600 K$  в диапазона 640–840*nm* при налягане  $p = 2.6 \times 10^{-2} Torr$  и радиус на разрядната тръба от 1mm [A4, A6].



Фиг. 4 Интензитет на а) регистрираните оптичните линии в спектъра на аргона в относителни единици и б) експериментално определяне на електронната температура и концентрация.

При налягане от  $p = 2.6 \times 10^{-2} Torr$  електронната температура и концентрация на плазмата е оценена, чрез метода на пресечната точка на отношения на интензитети на аргонови спектрални линии (фиг. 4a). От този оптичен метод (фиг. 4б) е получена числената й стойност и тя е равна на  $n_e = 2.6 \times 10^{18} m^{-3}$  а електронната температура е  $T_e = 3.1$  eV. При вече известна стойност на електронната концентрация  $n_e$  при съответното налягане и отдадена микровълнова мощност в плазмата от генератора, с

помоща на разработен софтуер теоретично са пресметнати и останалите плазмени параметри, като честота на ударите между електрони и неутрали  $v_{ea}$ , диелектричната проницаемост на плазмата  $\varepsilon_{pl}$ , плазмена проводимост и други параметри [A4].

#### Резултати за диаграмата на излъчване на миниатюрната плазмена антена при различни налягания

Имерванията на диаграмата на излъчване на изследваните антени в азимутално направление спрямо плазмения стълб показаха, че тя е ненасочена в азимутално направление (omnidirectional), както при металните антени. За плазмена антена при ниско налягане p=0.026 Torr са проведени експериментални измервания за ДИ при две налягания на аргона в капилярната тръбичка. Нормираната вертикална ДИ по интензитет на полето на антената с дължина на излъчващата част на капилярката 16 мм е показана на фигура 5 а.



Фиг. 5 ДИ а) на плазмена антена при *p* = 0.026*Torr*, P = 12 W и б) ДИ на комерсиална метална рутерна антена

За сравнение на получените резултати от измерванията на плазмената антена са проведени и получени резултати от измерване на излъчената мощност и ДИ в непрекъснат режим при известни от производителя параметри на комерсиална метална рутерна антена с дължина  $l = \lambda/2$  (фиг. 5б).

Получените резултати показват, че плазмената антена при ниско налягане има ДИ като електричен монопол, каквато е рутерната антена. ДИ на рутерната анатена измерена с постановката за измерване на плазмената антена показва, че при условията на измерването не се получава формата на ДИ на монопол над безкрайна метална

повърхност а ДИ с главен лист под определен ъгъл в зависимост от отражението от хоризонталната повърхност в лабораторията.

#### Плазмена антена при налягане p=1.5 Torr

Измерена е вертикалната ДИ на създадената плазмена антена от капилярката и образувания плазмен стълб с дължина L = 2 cm при налягане 1.5 Torr в непрекъснат режим, като е построена нормирана диаграма по интензитет на полето и показана на фиг. 6. Главният лист, както при монополните метални антени е в посока перпендикулярна на оста на антената и се наблюдава малък страничен лист в посока на оста на антената.



Фиг. 6 ДИ при p = 1.5 Torr а) P = 10W, L = 2 cm в непрекъснат режим и б) при мощност P = 6W без плазмен стълб.

За измерване на излъчването от капилярката без наличие на плазмен стълб е снета вертикална диаграма на излъчване при налягане p=1.5 Torr и подадена мощност P=6W показана в нормиран вид. (фиг. 6 б). При тези условия се наблюдава отново главен лист под определен ъгъл, като измерената абсолютна мощност е около 40 пъти по-малка отколкото при наличие на плазмен стълб. Този резултат показва, че без плазмения стълб празната капилярка не е ефективен излъчвател. Излъчващият елемент е плазмения стълб, като това излъчване зависи от плазмените параметри.

За целите на моделирането на монополната плазмена антена в трета глава са използвани три различни електромагнитни симулатора, с които са проведени числените

експерименти и са получени резултати за дължината на вълната, разпределение на компонентите на ЕМ поле в плазмения стълб, в близката и далечната зона на антената (диаграмите на излъчване), S11 параметри, VSWR, излъчена мощност, ефективност на антената, импеданс на антената.

За описанието на плазмата като излъчваща среда, се използва израза за диелектричната проницаемост на плазмата в следния вид (модел на Друде):

$$\varepsilon_{pl} = 1 - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega(\omega - jv_{ea})}$$
(5)

където ω<sub>pl</sub> е плазмената честота, ω-ъгловата честота на сигнала, v<sub>ea</sub>-честоата на удари на електроните с неутралите [25]:

От теоретичният модел за повърхнинни вълни, при данните за плазмените параметри получени от експеримента и предположението за хомогенна плазма в капилярката, се изчисляват [A4] честота на удари  $v_{ea}$ , плазмената честота, реална и имагинерна част на диелектричната приницаемост, тангенс на ъгъла на загубите, дължината на вълната  $\lambda_g = 2\pi/\beta$  и коефициента на затихване  $\alpha$  на повърхнинните вълни в плазмата, както и радиалното разпредеделение на компонентите на ЕМ поле и вектора на Пойтинг.

Дисперсионното уравнение за ПВ в цилиндричен плазмен стълб и наложени гранични условия при структура плазма-диелектрик-вакуум има следния вид [25]:

$$-\frac{\kappa_{d}\varepsilon_{pl}}{\kappa_{p}\varepsilon_{d}}\frac{I_{1}(\kappa_{p}R)}{I_{0}(\kappa_{p}R)} = \frac{\delta_{1} + (\frac{\kappa_{d}}{\varepsilon_{d}})Z_{2}\delta_{2}}{\delta_{3} - (\frac{\kappa_{d}}{\varepsilon_{d}})Z_{2}\delta_{4}}$$

$$Z_{2} = \frac{1}{\kappa_{v}}\frac{K_{1}(\kappa_{v}(R+D))}{K_{0}(\kappa_{v}(R+D))}$$

$$\delta_{1} = K_{1}(\kappa_{d}R)I_{1}(\kappa_{d}(R+D)) - I_{1}(\kappa_{d}R)K_{1}(\kappa_{d}(R+D))$$

$$\delta_{2} = I_{1}(\kappa_{d}R)K_{0}(\kappa_{d}(R+D)) + I_{0}(\kappa_{d}(R+D))K_{1}(\kappa_{d}R)$$

$$\delta_{3} = I_{0}(\kappa_{d}R)K_{1}(\kappa_{d}(R+D)) + K_{0}(\kappa_{d}R)I_{1}(\kappa_{d}(R+D))$$

$$\delta_{4} = I_{0}(\kappa_{d}R)K_{0}(\kappa_{d}(R+D)) - I_{0}(\kappa_{d}(R+D))K_{0}(\kappa_{d}R)$$
(6)

, където  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $K_0$ ,  $K_1$  са модифицирани Беселови функции а R и D са съответно радиуса и дебелината на кварцовата капилярка. Диелектричната проницаемост на плазмата  $\varepsilon_{pl}$  в дисперсионното уравнение зависи от плазмената честота  $\omega_{pl}$  и от честота на удари между електрони и неутрали и е определена от модела на Друде,  $n_e$ -

електронна плътност на плазмата, *e* - заряд на електрона, *m* - маса на електрона и съответно  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_d$  – са диелектричните константи на вакуума и диелектрика а k<sub>p</sub>, k<sub>d</sub> и k<sub>v</sub> са вълновите числа в плазмата, диелектрика и вакуума.

Получени са резултати за изменението на коефициентите  $\alpha$  и  $\beta$  с изменение на отношението  $\omega/\omega_{pl}$ . Те са получени чрез числено решаване на дисперсионното уравнение от разработения софтуер [A4] и представени във вид на фазова диаграма на повърхнинни вълни в плазмен стълб (фиг. 7) при налягане на неутралния газ p=0.026 Тогг. Стойностите на коефициента на затихване  $\alpha$  на повърхнините вълни са много по-малки от фазовата константа  $\beta$  (приблизително с 300 пъти). Това показва, че повърхнинните вълни са слабо затихващи при това налягане и при капилярка с крайни размери ще се появи стояща вълна. Плазмената плътност в разрядите на повърхнинни вълни вълни от фазовати константа  $\beta$  приблизително с зоо пъти). Това показва, че повърхнинните вълни са слабо затихващи при това налягане и при капилярка с крайни размери ще се появи стояща вълна. Плазмената плътност в разрядите на повърхнинни вълни вълни вълни от дължината на вълната на повърхнинните вълни, то може да се приеме в симулациите, че плазменият стълб е хомогенен в аксиално направление.



Фиг. 7 Фазова диаграма на повърхнинната вълна в цилиндричен плазмен стълб при промяна на електронната концентрация и съотношението ( $\omega/\omega_{pl}$ ).

На фигура 8 е показана конструкцията на плазмената антена изследвана в единия от симулаторите. Дължината на коаксиалната линия, чрез която се подава микровълнов сигнал към възбудителя на антената е  $1.\lambda = 12.24 \, cm$  а съответните дължини на хоризонталния стъб са  $d = 23.5 \, mm$  и на вертикалния стъб  $l = 17 \, mm$ . Възбуждането на повърхнинните вълни става чрез възбудител, представляващ част от металното жило на коаксиалната линия изведен над диелектричното запълване. След подаване на микровълнов сигнал, между жилото и металната изолация възниква силно електрично поле.



Фиг. 8 Модел на плазмена антена а) без екран и б) със екран.

Това поле възбужда в кварцовата капилярка ЕМ поле-радиална  $E_r$  и аксиална  $E_z$  компоненти, необходими за възникването и подържането на повърхнинни вълни в обема на структурата. Металният екран е разположен в основата на капилярката и съответно служи за формиране на по-добра насоченост в ДИ на монополната плазмена

Дефинирането на плазмата, като среда в симулатора, става чрез нейната диелектрична проницаемост, която има отрицателни стойности и тангенса на загубите. Стойностите им са получени от разработен софтуер, който решава дисперсионното уравнение за цлиндричен плазмен стълб при ниско налягане, в газ аргон, при въведени стойности за честота на удари между електрони и неутрали, газова температура, налягане, вътрешен радиус на кварцовата тръба от 1 mm и дебелина на стената 0.48 mm. Стойността на диелектричната проницаемост на изработената кварцовата тръбичка е  $\varepsilon_r = 3.8$ .

Първата симулация е при реалната дължина на капилярната тръбичка от 15.85 mm и изчислени стойности от теоретичния модел за реалната част на диелектричната проницаемост на плазмения стълб  $\varepsilon_{pl} = -33$  отговаряща на експериментално получената електронна концентрация  $n_e = 2.6 \times 10^{18} m^{-3}$  при тангенс на загубите  $tg\delta = 0.0028$  и подадена мощност от 1 W на входа на структурата чрез вълнов порт. Обемът около антената, в който искаме да получим диаграмата на излъчване се определя от размера на далечната зона на антената пресметната за честота 2.45 GHz, при която се извършва симулацията.

Дължината на вълната в свободното пространство е  $\lambda_0 = 0.1224$  m. При разпространение на ЕМ вълна в антенната структурата, където диелектричното

запълване на коаксиалната линия е от тефлон, имащ диелектрична проницаемост  $\varepsilon_r = 2.08$ , дължината на вълната се определя по формулата [11]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{0.1224}{\sqrt{2.08}} = 0.085 \, m \tag{7}$$

Дължината на коаксиалната линия от вълновия порт до точката на свързване с възбудителното устройство е избрана точно 0.085 m поради изискването да има максимум на амплитудата на Е полето в основата на вертикалния стюб. Възбудителното устройство на практика представлява отворена коаксиална линия с дължина $l \le \lambda/4$ , имащо свойствата на четвъртвълнов трансформатор, което служи да осигури максимална стойност на полето в основата на капилярката. Изследвани са в числения експеримент ДИ на плазмената антена при три различни концентрации - експериментално получената  $n_e = 2.6 \times 10^{18} m^{-3}$  (фиг. 9 а), при  $n_e = 5 \times 10^{18} m^{-3}$  (фиг. 9 б) и при най-висока концентрация  $n_e = 1 \times 10^{19} m^{-3}$  показана на фигура 9 в.





Фиг. 9 Диаграми на излъчване на плазмена антена при три стойности на електронната концентрация.

Тези резултати показват, че основния лист на ДИ променя слабо насочеността си с n<sub>e</sub>, а интензитета на излъченото електрично поле нараства

Получени са резултати и за поведението на реалната и имагинерната част на входния импеданс на системата при наличие на монополна плазмена антена за трите





Фиг. 10 Поведение на реалната и имагинерната част на входния импеданс при наличие монополна плазмена антена при трите стойности на електронната концентрация.

От Фиг. 10 се вижда, че имагинерната част се нулира при честота 2.58 GHz а реалната има стойност около 190  $\Omega$  и също при 2.78 GHz, като за реална част стойността е около 12  $\Omega$ . При по-високата концентрация фигура 10 отново резултатите показват нулиране на имагинерната част на входния импеданс при честотите 2.33 GHz и 2.74 GHz, като стойността на реалната част има стойности съответно 14  $\Omega$  и 245  $\Omega$ . При най-високата концентрация то симулацията показват нулиране на имагинерната част на входния импеданс при честота 2.5 GHz и съответно стойността на реалната част е 285  $\Omega$ . Тези резултати показват, че с промяна на концентрацията на плазмата в антената се променя и входния импеданс на антенната система, което налага допълнително съгласуване с микровълновия генератор. При отимизиране на системата може да се постигне (фигура 10) нулиране на имагинерната част на входния импеданс и да се съгласува само реалната част, но такъв режим би бил силно неустойчив поради флуктуации на плътността и температурата.

Наличие на стояща вълна е изследвано при средната електронна концентрация като резултата за стойностите на Е полето по дължина на стълба в плазмения стълб са представени на фиг. 11 а. Понеже плазмата при дадените параметри не допуска разпространение на ТЕМ вълна постъпваща директно на вълновия порт, се наложи използването на *Lumped port*, при който се определя само посока на тока в антената, върху плазмен стълб без подвеждаща линия. Резултатът от симулацията е максимум на полето е по средата на стълба и два минимума в краища [10]. Това предполага синусово

разпределение на амплитудата на полето, което е характерно за вибраторните антени в зависимост от отношението  $l/\lambda_{p}$  и определящо за насочеността на ДИ.



Фи.11 Стояща вълна в плазмения стълб и честотна лента на антената при

$$n_{e} = 5 \times 10^{18} \, m^{-3}$$

Получена е честотната лента на антената чрез представяне на обратните загуби (Фиг. 11 б), при  $n_e = 5 \times 10^{18} m^{-3}$  и постоянна диелектрична проницаемост. В тази честотна лента попадат честотите около 2.6 GHz и 3.5 GHz се използват при LTE стандарта.

Изследвано е влиянието на металния екран върху съгласуването и промяната на насочеността на ДИ чрез симулациия на разпространението на сигнала в цялата антенна система. Използвани са четири различни по големина диаметъра на металните екрани при фиксирана електронна концентрация от  $n_e = 1 \times 10^{19} m^{-3}$ , дължина на капилярната тръбичка от 15.85 mm и подадена мощност 1 W през вълновия порт на антенната система, като получените резултати за ДИ са представени на фигури 12 а – б и 13 а-б.



Фиг. 12 а) Диаметър на екрана 120 mm и б) диаметър на екрана 370 mm



Фиг. 13 а) Диаметър на екрана 500 mm и б) диаметър на екрана 720 mm

Както се вижда от резултатите, при най-малкият диаметър на металния екран има главен лист на ДИ под ъгъл спрямо вертикалната ос, като с увеличаване на диаметъра той се ориентира в напречно направление и съответно при диаметър 720 mm е близък до 90°, както при монополна метална антена над безкрайна проводяща повърхност. Стойностите на излъченито електрично поле от антената слабо нараства в далечната зона при увеличаване диаметъра на металния екран.

За четири различни дължини на капилярката, при електронна концентрация  $n_e = 1 \times 10^{19} m^{-3}$  ( $\lambda_g = 0.063$  m) е изследвано излъчването на плазмената антена. При промяна на дължината на капилярката се променя отношението  $l/\lambda_g$  на антената от там и вида на разпредлението на наведения ток, който променя ДИ. Резултатите от симулацията за тримерните диаграми на излъчване при две различни дължини на кварцовата капилярка са представени съответно на фигура 14 а – б. От получените резултати за ДИ се забелязва промяна в посоката на главния лист при увеличаване дължината на капилярката от 25 mm до 30 mm, появата на странични листи и нарастване на полето в далечната зона. Този начин за управление на ДИ на плазмената

антена е ефективен но не е подходящ за практическа реализация, затова стремежът е да се създаде реконфигуруема антена чрез контрол на плътността на плазмата в капилярката.



Фиг. 14 а) Дължина на капилярката 25 mm и б) Дължина на капилярката 29 mm

За получаване на ДИ е използван втори симулатор [А2], който директно изчислява плазмените параметри, като отчита честотната зависимост на диелектричната проницаемост. Резултатите за тримерните и вертикалните нормирани диаграми на излъчване на плазмената антена със заземен метален екран при трите електронни концентрации, са показани на фиг. 15, 16 и 17.



Фиг. 15 Тримерна ДИ а) и вертикална нормирана ДИ б) при  $n_e = 2.6.10^{18} m^{-3}$ 

При изследването на антената при различните електронни концентрации се използва метален екран с радиус 150 mm служещ за подобряване на насочеността на антената,

който е поставен на позиция в основата на капилярната тръба и той оказва силно влияние върху съгласуването й с коаксиалната линия. В симулацията металният екран няма допирна точка с антената и е на разстояние от 1.5 mm от нея, поради което се получават задни листи в ДИ под нивото, на което е поставен екрана. Главните листи са насочени под ъгъл  $\theta = 60^{\circ}$ , които са симетрични спрямо аксиалната ос на антената и са показани при вертикалната нормирана ДИ на антената. Съгласуването на плазмената антена с генератора при 2.45 GHz показва стойности за обратните загуби от -22 dB, VSWR = 1.34 и ефективност на излъчване от 62%. Насочеността на плазмената антена е D= 3.04 съответно G=1.88.



фиг. 16 Тримерна ДИ а) и вертикална нормирана б) при  $n_e = 5.10^{18} m^{-3}$ 

При средната електронна концентрация са получени резултати от симулацията за обратните загуби от -29 dB, VSWR = 1.1 и ефективност от 82%.



фиг. 17 Тримерна ДИ а) и вертикална нормирана б) при  $n_e = 1.10^{13} m^{-3}$ 

При най-високата концентрация получените резултати за обратните загуби са -42 dB, VSWR = 1.02 и ефективност на излъчване 89%, която е и най-висока. При това отлично съгласуване обаче, насочеността на антената е D=1.56 и съответно G=1.39.

Понеже в симулацията металния екран няма допирна точка с антената и има разстояние от 1.5 mm се получават задни листи в ДИ под нивото, на което е поставен. Главните листи са насочени под ъгъл  $\theta = 60^{\circ}$ , които са симетрични спрямо аксиалната ос на антената и са показани при вертикална нормираната ДИ на антената. Съгласуването на антената със системата при 2.45 GHz показва ефективност на излъчване от 62%. Получените резултати от HFSS за ДИ са в много добро съгласие с резултата за ДИ получен от CST, което показва възможноста за използване на последните версии на HFSS за симулиране на плазма с отрицателна диелектрична проницаемост макар с ограничени възможности за визуализация на вълните в нея.

Проведени са симулации и на къса плазмена пач антена разположена върху диелектрична подложка и копланарен възбудителен пръстен. Моделите използвани при симулацията представляват три цилиндрични къси плазмени антени, като плазмата в работния обем преди симуацията е предварително дефинирана, чрез реалната част на диелктричната проницаемост  $\varepsilon_{pl}$  и тангенса на загубите  $tg\delta$  със стойности изчислени за съответните електронни концентрации работещи при честоти 2.45 *GHz* и 1.8 *GHz*. При тези модели се цели симулиране работата на антената и получаване на резултати за ДИ и обратните загуби, както и разпределенията на полетата в структурата. Конструкцията на късата плазмена антена работеща на 2.45 GHz е разположена върху тефлонова подложка с диелектрична проницаемост  $\varepsilon_r = 2.08$  и с размери 81х61 mm захранвана с микролентова линия свързана към копланарен възбудител (фиг.18).



Фиг. 18 Симулационен модел на къса плазмена антена и копланарен възбудител

Получени са резултати за тримерната ДИ и вертикалната нормирана (фиг.19 а) и б)).



Фиг. 19 Тримерна ДИ а) и б) Вертикална нормирана

Резултатите от симулацията на късата плазмена антена показват ефективност от 92%.

Други получени резултати за разпределенията на полетата са при симулиране на честота от 1.8 GHz с който се показва разпространението на *TM*<sub>01</sub> мода (фиг. 20, 21, 22).



Фиг. 20 Разпределение на аксиалната  $E_z$ компонента на електричното поле



Фиг. 21 Разпределение на радиалната Е, компонента на електричното поле



Фиг. 22 Разпределение на азимуталната  $H_{\varphi}$  компонента на магнитното поле

На фигура 23 е показан резултат за VSWR при антената работещана 2.45 GHz.



Фиг. 23 Стойности на коефициента на стояща вълна по напрежение

Глава четвърта от дисертацията представя резултати [A1] от теоретичното изследване на миниатюрната плазмена антена при ниско налягане и ниска плътност на плазмата, като се цели определяне на механизма на излъчване на антената [17-21, 23-24]. При моделирането се предполага разпространението на азимутално симетричен мод  $TM_{01}$  [22] в плазмения стълб, при което антенната конструкция има резонансни свойства. Това е така понеже диелектричната тръба е с крайни рзмери, при което възникват условия за отражение в краищата и на повърхнинната вълна а от там и образуването на стоящи вълни. Тези условия за резонанс в плазмения стълб довеждат до максимум на полетата по стените на стълба и от там следва излъчването на структурата като плазмена антена. Моделът на цилиндричния плазмен стълб е показан на фигура 24.



Фиг. 24 Модел на плазмен стълб

Разглеждането се извършва в цилиндрична координатна система ( $\rho$ ,  $\phi$ , z) при което се определят първоначално граничните условия породени от разпространението на повърхнинната вълна  $SW(E_r, E_z, H_{\varphi})$ 

По околните стени (sidewall) на диелектричната капилярка [13-16] за гранично условие се приема плътността на електричните токове **J**= 0 а на магнитните да имат компонента определена от израза:

$$\begin{vmatrix} \rho & \varphi & z \\ E_{\rho} & E_{\phi} & E_{z} \\ n_{\rho} & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0, E_{z}n_{\rho}, -E_{\phi}n_{\rho}$$

$$\tag{8}$$

Тези компоненти определят излъчването през околните стени на капилярката а за излъчването от горната основа на капилярката се използват граничните условия (top):

.

$$\begin{vmatrix} \rho & \varphi & z \\ E_{\rho} & E_{\phi} & E_{z} \\ 0 & 0 & n_{z} \end{vmatrix} = E_{\phi} n_{z}, -E_{\rho} n_{z}, 0$$
(9)

След което за намиране на излъчването в далечната зона се използва сферична координатна система (r, φ, θ) на която координатите се изчисляват чрез трансформация от цилиндрична към сферична, чрез следните отношения:

$$M_{r} = M_{\rho'} \sin \theta + M_{z'} \cos \theta$$
$$M_{\theta} = M_{\rho'} \cos \theta - M_{z'} \sin \theta$$
$$M_{\varphi} = M_{\varphi'}$$
(10)

След трансформацията се получават отделните компоненти от следните изрази:

$$M_{\theta} = M_{\rho} \cos\theta \cos(\phi - \phi') + M_{\phi} \cos\theta \sin(\phi - \phi') - M_{z} \sin\theta$$
$$M_{\varphi} = -M_{\rho} \sin(\phi - \phi') + M_{\phi} \cos(\phi - \phi')$$
(11)

Използваме модела описващ диелектричните резонаторни антени, от който използваме изразите за компонентите на еквивалентните магнитни токове, които се заместват в изразите за електричните векторни потенциали, при което задачата се свежда до аналитично решаване на следните неопределени интеграли:

$$F_{\theta} = \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iiint M_{\theta} e^{jk_0 \left[\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi') + z' \cos\theta\right]} \rho' d\rho' d\phi' dz$$
(12)

$$F_{\phi} = \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iiint M_{\phi} e^{jk_0 \left[\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi') + z' \cos\theta\right]} \rho' d\rho' d\phi' dz$$
(13)

Това са компонентите на електричния векторен потенциал  $F_M$  от който се определят полетата  $E_{\theta}$  и  $H_{\varphi}$  в далечната зона а от там и диаграмата на излъчване.

Интегрирането се извършва по околните стени на цилиндъра с площ *S* и радиус *а* при който израза за електричния векторен потенциал придобива вида:

$$\mathbf{F}_{M} = \frac{\varepsilon.a}{4\pi} \iint_{S} M_{S} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' = \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi R} L$$
(14)

След заместване на компонентите на еквивалентните магнитни токове в изразите за магнитните векторни потенциали се получават следните изрази:

$$F_{\theta} = \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} a \iint_{S} M_{\varphi} \cos\theta \sin(\varphi - \varphi') e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')} e^{jkz' \cos\theta} d\varphi' dz'$$

(15)

$$F_{\varphi} = \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} a \iint_{S} M_{\varphi} \cos(\varphi - \varphi') e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')} e^{jkz' \cos\theta} d\varphi' dz'$$
(16)

Решаването на интегралите показва, че една от компонентите  $F_{\theta} = 0$  а другата има следния израз, който служи за при определяне на полетата в далечната зона.

$$F_{\varphi} = j \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} a E_{z0} \cdot 8\pi^2 d \frac{\cos(\kappa_0 d \cos\theta)}{\pi^2 - 4d^2 \kappa^2 \cos^2\theta} J_1(\kappa_0 \sin\theta)$$
(17)

Компонентите на полетата намираме от следните изрази представени във вида:  $E_{\theta} = -j\omega\eta F_{\varphi}$  за електричната компонента на полето в далечната зона  $H_{\varphi} = -j\omega F_{\varphi}$  за магнитната компонента на полето в далечната зона След заместването на получения израз за  $F_{\theta}$  в изразите на полетата се получава:

$$E_{\theta} = \kappa E_{z0} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} 2\pi .a.d \frac{4\pi \cos(\kappa_0 d\cos\theta)}{\pi^2 - 4d^2 \kappa_0^2 \cos^2\theta} J_1(\kappa_0 a\sin\theta)$$
(18)

$$H_{\varphi} = -j\omega F_{\varphi} = \omega \varepsilon \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} E_{z_0} \cdot 2.a.d \frac{4\pi \cos(\kappa_0 d\cos\theta)}{\pi^2 - 4d^2 \kappa_0^2 \cos^2\theta} J_1(\kappa_0 a\sin\theta)$$
(19)

Като извод от анализа следва че:

Диаграмата на излъчване на миниатюрната плазмена антена зависи от стойността на електричното поле излъчено от околните стени на капилярката, които не са пряко свързани с тока протичащ в обема на плазмения стълб. Изчислената диаграма на излъчване е както при диелектричните резонаторни антени, които са разположени върху заземен метален екран, която е показана на фигура 25.

Резултата показва диаграма на излъчване, която е сходна с диелектричните резонаторни антени при възбуждане на  $TM_{01}$  мод в тях. От своя страна, диелектричните резонаторни антени при този мод имат излъчване аналогично на метална монополна антена но без да притежават проводимостта на металите.



Фиг. 25 Пресметната диаграма на излъчване

Следователно, при ниско налягане в капилярната тръба и ниска плътност на плазмата, излъчването на антената може да бъде обяснено с резонансните свойства на структурата. При виски на налягания на неутралния газ, висока честота на удари електрони-неутрали и висока плазмена плътност, може да се търси аналогия в работата на плазмените антени с металните антени и да се прибягва към описанието с наведения ток [2] протичащ в плазмения стълб аналогично на вибраторните метални антени.

Сравнението между симулирана и измерена диаграма на излъчване е показано на фигура. 26 при налягане p = 0.026 Torr в капилярната тръба, което показва много сходна зависимост от вертикалния ъгъл в който е насочен главния лист. Излъчването при металните монополни антени със заземен екран повдигнати над земната повърхност се характеризира с наличието на главен лист под ъгъл спрямо хоризонталната равнина и допълнителните листи в диаграмата на излъчване. Следователно, разглеждайки симулираната структура и реалната плазмена антена, може да приемем, че това са основните фактори излъчването на плазмената антена да е под определен ъгъл. Плазмената плътност оказва влияние на посоката на главния лист, но изменението на ъгъла е сравнително малко, което се потвърждава и от други автори. След заместване в тези изрази на стойността на аксиалното електрично поле получено от симулациите, се получават резултати, които в добро съгласие с резултатите от измерванията.



Фиг. 26 Сравнение между измерена (непрекъсната) и симулирана (прекъсната) на диаграмите на излъчване на плазмена антена при p=0.026 Torr

Сравнението на диаграмите на излъчване получени от теоретичния модел (Фиг.25) и експериментално измерената ДИ на антената и симулираната ДИ (фиг. 26) показват, че главните листи са разположени между 60 и 70 градуса а не 90 градуса, което се дължи на конструктивните особености на антенната система.

След заместване в израза на стойността на аксиалното електрично поле получено от симулациите, се получават резултати, които в са добро съгласие с резултатите от измерванията.

### Приноси на дисертационния труд

- 1. Конструирана и изработена е нова миниатюрна цилиндрична плазмена антена, работеща на честота 2.45 GHz и захранвана от един микровълнов източник.
- Експериментално са измерени плазмените параметри в работен режим и едновременно с това са определени параметрите на излъчване на антената. Определено е влиянието на плазмената плътност върху диаграмата на излъчване.
- 3. Моделирано е излъчването на три различни нови конструкции на монополни плазмени антени. Получени са различни по форма диаграми на излъчване, като е установено, че това се дължи не само на плазмената плътност, но и на конструкцията на антените и начина на съгласуване.
- Резултатите от симулираното разпространение на ЕМ вълни в цялата антенна конструкция ( от източника на сигнал до излъчвателя) дадоха възможност да се оптимизират размерите на съгласуващите елементи.
- Достигнати са отлично съгласуване и висока ефективност при моделната оптимизация на плазмените антени, което показва потенциалната приложимост на тези антени в съвременните комуникации.
- 6. Предложен е нов теоретичен модел, изясняващ излъчването на плазмената антена при ниски налягания, като са получени изрази за електричното и магнитно поле в далечната зона на антената.

Списък на научните публикации по темата на дисертацията A1 Zh. Kissovski, V. Vachkov *"Model of miniature plasma antenna"* IJEAT, V, 4, p 330 (2015)

A2 Vachkov V, and Kissiovski Zh., "Miniature plasma antenna at 2.45 GHz", EPJAP, 2015 –in processing

A3 V. Vachkov, Zh. Kiss'ovski, A Ivanov, "Matching of variable complex load to microwave generator", *Annual J. of Electronics* **4**, N2, 70 (2010)

A4 Zh Kiss'ovski, V Vachkov, S Iordanova, I Koleva "Microwave discharge in a finite length vessel", *J. Phys.: Conf. Ser.* **356** 012009 (2012)

A5 Zh Kiss'ovski, N Djermanova, D Mitev and V Vachkov, *Journal of Physics: Conference Series* **514**, 012007(2014)

A6 Zh. Kiss'ovski, St. Kolev, V. Vachkov, N. Ezumi, "Diagnostics of a Small Microwave Plasma Source at Atmospheric Pressure",12<sup>th</sup> International Conference on Global Research and Education *-Inter Academia 2013* (Sofia, Bulgaria) September 23-27 –accepted

A7 V Vachkov, J Dervishev, Zh Kiss'ovski, 2<sup>nd</sup> National Congress on *Physical Science*, 25-29 September (2013), Sofia, Section: Atomic Physics and Plasma Physics, page 424-425

A8 Djermanova, N., J. Kiss'ovski, V. Vachkov, Y. Todorov, D. Damyanov..*Annual J. of Electronics* **9**, 163 (2015)

#### Литертура

- 1. Dr. Ted Anderson *Plasma Antenna book*, Theodore Anderson, Haleakala Research and Development, inc ISBN 978-1-60807-143-2 Copyright, 2011
- 2. Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Тараканов В.П., Сергейчев К.Ф., Трефилов А.Ю. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной // Физикаплазмы. 2006. Т. 32. №4.
- 3. Минаев И.М., Рухадзе А.А., Сергейчев К.Ф., Трефилов А.Ю. Активная плазменная ВЧ-антенна, самосогласованная с источникомколебаний.//Краткиесообщенияпофизике ФИАН. — №12. — 2005 г.
- Borg G. G., Harris J. H., Martin N. M., Thorncraft D., Milliken R., Mitjak D.G., Kwan B., Ng T., Kircher J. //Plasmas as antennas: Theory, experiment and application. (Australian National University, Canberra, Australia), Physics of Plasmas, 2000, V. 7. P. 2198. 2202.
- Gerard G. Borg and Jeffrey H. Harris, *Application of plasma columns to* radiofrequency antennas, APPLIED PHYSICS LETTERS, VOLUME 74, NUMBER 22, 31 MAY 1999
- 6. J.P. Rayner, A.P. Whichello, A.D. Cheetham, IEEE Trans. Plasma Sci. 32, 269 (2004)
- 7. Constantine A. Balanis Antenna Theory *Analysis and design*, Second Edition, Arizona State University, 1997
- 8. Constantine A. Balanis Antenna Theory- *Analysis and design*, Third Edition, Published by John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
- 9. Sophocles J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, 2008
- Nikolay N. Bogachev, Irina L. Bogdankevich, Namik G. Gusein-zade, Konstantin F. Sergeychev, *Operation Modes And Characteristics Of A Plasma Dipole Antenna*, Acta Polytechnica 55(1):34-38, 2015, Czech Technical University in Prague, 2015
- 11. Стефан Иванов, Излъчване и разпространение на електромагнитни вълни
- 12. Данков П., Микровълнови измервания, (Херон Прес, София) 2007

- Darko Kajfez and Ahmed A. Kishk, DIELECTRIC RESONATOR ANTENNA POSSIBLE CANDIDATE FOR ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS, University of Mississippi, USA
- 14. STUART A. LONG, senior member, IEEE, MARK W. MCALLISTER, and LIANG C. CHEN, senior members, IEEE, *The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna*, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. AP-31, NO, 3, MAY 1983
- 15. K. M. Luk and K. W. Leung, Both of the City University of Hong Kong, *Dielectric Resonator Antennas*, Research Studies Press LTD. Baldock, Hertfordshire, England
- 16. J.T.H. ST. MARTIN, Y.M.M. ANTAR, A.A. KISHK and A. ITTIPIBOON:
  "Dielectric resonator antenna using aperture coupling" *Electron. Lett.*, 26, pp. 2015-2016, 1990
- 17. W.X. ZHANG and L. ZHU: 'New leaky-wave antenna for millimeter waves constructed from groove NRD guide', *Electron. Lett.*, **23**, pp. 1191-1192, 1987
- 18. Fabrizio Frezza, Introduction to Traveling-Wave antennas, March 19, 2006
- 19. C. H. Walter: *Traveling Wave Antennas*, McGraw Hill, Dover, 1965-1970, reprinted by Peninsula Publishing, Los Altos California, 1990.
- 20. A.A. OLINER: 'New leaky wave antennas for millimeter waves', *International Symposium on Antenna and Propagation*, ISAP Digest, pp. 89-92, 1985
- A. SANCHEZ and A.A. OLINER: 'Accurate theory for a new leaky-wave antenna for millimeter waves using non-radiative dielectric waveguide' Radio Sci., 19(5), pp. 1225-1228, 1984
- 22. R. K. Mongia, A. Ittipiboon, P. Bhartia and M Cuhaci *Electric-Monopole Antenna* Using A Dielectric Ring Resonator, Electronics Letters 19<sup>th</sup> August 1993 Vol. 29 No.17
- 23. Ki Young Kim, *Thesis for the Degree of Ph. D. Guided and Leaky Modes of Circular Open Electromagnetic Waveguide*, Department of electronics, Major in Wave Propagation Engineering, The Graduate School

- 24. A. Mahmoudian, H. DaliliOskouei, and K. Forooraghi, *Planar Leaky-wave Antenna with Aperture Coupled Feed*, PIERS Proceedings, Hangzhou, China, March 24-28, 2008, Microwave Lab., Department of Electrical Engineering, Tarbiat Modares University Tehran, Iran
- 25. Yu.M. Aliev, H. Schlüter and A. Shivarova, *Guided wave-produced plasmas* (Springer, Berlin, 2000)