

文章编号: 2095-4980(2019)04-0657-04

## 基于 S-PIN 二极管的频率可重构天线设计

史向柱, 刘少斌, 唐 丹, 孔祥鲲

(南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 基于固态等离子体表面 P-I-N(S-PIN)二极管设计了一款可重构天线, 该天线用多个 S-PIN 单元代替金属作为辐射器。在一种激励模式下, 天线作为单极子天线辐射; 在另一种激励模式下, 天线作为偶极子天线进行辐射。天线实现了 X 波段到 Ka 波段的频率可重构, 即在 X 波段和 Ka 波段分别有 2 个工作频点, 2 个频段均有广泛用途, 可适用于一些要求宽频带范围内频率可重构的场合。

**关键词:** S-PIN 二极管; 固态等离子体; 单极子; 偶极子; 可重构天线

**中图分类号:** TN82

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201904.0657

## Frequency reconfigurable antenna design based on S-PIN diode

SHI Xiangzhu, LIU Shaobin, TANG Dan, KONG Xiangkun

(School of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 211100, China)

**Abstract:** A reconfigurable antenna based on a solid state plasma S-PIN diode is designed, which uses a plurality of S-PIN units instead of metal as the radiator. In one excitation mode, the antenna acts as monopole antenna; in another excitation mode, the antenna is radiated as dipole antenna. The antenna achieves frequency reconfiguration from X band to Ka band, which means that it can work well both in X band and Ka band. The two frequency bands have wide range of applications. It can also be applied to some occasions requiring frequency reconfiguration in wide frequency band.

**Keywords:** S-PIN diode; solid state plasma; monopole; dipole; reconfigurable antenna

随着电子侦察手段的不断进步, 如何减小天线雷达散射面积已经成为保护通信系统不受攻击的关键<sup>[1-2]</sup>。等离子体天线相比传统金属材料天线具有较小的雷达散射面积, 同时可以实现频率和带宽等的重构<sup>[3-4]</sup>。一些行业和组织也对等离子体天线技术给予了高度关注, 并将其应用在其产品与服务中, 如摩托罗拉的等离子体开关天线、科学和工业研究理事会(Council for Scientific and Industrial Research, CSIR)的等离子体开关控制的射电望远镜阵列天线以及 CEA 科技(CEA technologies)的应用于雷达的等离子体天线<sup>[5-6]</sup>。

等离子体天线的研究经历了从气态等离子体天线到固态等离子体天线的发展。气态等离子体天线研究得最早<sup>[7-8]</sup>, 但其等离子体密度不高, 尺寸较大, 难以集成。固态等离子体天线主要有光控等离子体天线和电控固态等离子体天线。光控固态等离子体天线需要光源阵列作为激励源, 同时使用遮光板实现天线重构, 难于集成<sup>[9]</sup>。电控固态等离子体天线成为了近年来的研究热点<sup>[10]</sup>。通过向高电阻率的硅中注入高浓度载流子形成表面 P-I-N(S-PIN)二极管。当二极管加正向偏压处于导通状态, I 区产生大量固态等离子体可与金属比拟; 加反向偏压时, I 区载流子耗尽, 为高阻抗硅, 可视作电磁隐身<sup>[11]</sup>。本文基于固态等离子体 S-PIN 二极管设计了一款可重构天线。

### 1 固态等离子体可重构天线设计

#### 1.1 S-PIN 二极管结构

在微波开关性能方面, 硅基 S-PIN 二极管具有明显的优势<sup>[12]</sup>。设计所采用的有绝缘层的 S-PIN 单元<sup>[13]</sup>, 结构如图 1 所示。硅衬底上的 SiO<sub>2</sub> 绝缘层将本征层与衬底隔开, 高浓度载流子注入, P+和 N+区域重掺杂, 载流

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61671238); 毫米波国家重点实验室开放课题基金资助项目(K201611); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20150757); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(NO.kfj20170413)

子浓度较高,表现出金属特性;I 区低掺杂其载流子浓度很低,宽度  $l$  达到  $0.2\text{ mm}$ ,电极间的寄生电容足够小,未被激励时,单元整体表现出介质属性。当单元被激励时,通过 PIN 管的电流使 I 区产生大量高浓度载流子,此时 S-PIN 单元表现出高导电性。PIN 单元结构的具体参数见表 1。

表 1 S-PIN 单元物理尺寸(单位:  $\mu\text{m}$ )  
Table1 Physical size of the S-PIN unit(unit: $\mu\text{m}$ )

| parameter | $h$ | $h_1$ | $l$ | $d$ | $h_2$ | $h_3$ |
|-----------|-----|-------|-----|-----|-------|-------|
| size      | 300 | 30    | 200 | 10  | 20    | 2     |

1.2 天线设计

本文提出的固态等离子体可重构天线的结构如图 2 所示。因为 S-PIN 只能单面掺杂,为了适应加工工艺的需要,该天线设计为在两块板子上分别加工,然后背对背贴合在一起(如图 2 侧视图所示),组成一个完整的天线。

图 2 所示天线正面包含了部分单极子的金属线以及 S-PIN;正面①、④2 个矩形区域为多个 S-PIN 单元按照图 1 所示 P-N-P 方式进行串联形成的长条(此处为了方便读者阅读,将该区域图进行了简化)。天线背面为天线的局部地以及②、③2 块可重构区域。当①、②、③3 个区域被激励,而④区域未被激励时,可以清晰地看出这相当于一个平面偶极子天线;当①、②、③3 个区域未被激励时,此区域相当于介质,区域④被激励,此时天线相当于一个单极子天线。该天线采用侧馈的馈电方式,天线的介质基板为含有  $\text{SiO}_2$  薄层的硅,其相对介电常数为 11.9,损耗角正切为 0.004。使用全波仿真软件对天线进行仿真,仿真过程中使用等离子体的 Drude 模型仿真其性能<sup>[14]</sup>,在 Drude 模型中,图 1 所示的重掺杂区域 N+与 P+的等离子体频率以及碰撞频率相同,其中等离子体频率为  $1.78\times 10^{14}\text{ rad/s}$ ,等离子体碰撞频率为  $14.05\times 10^{12}\text{ s}^{-1}$ ;而低掺杂区 N-的等离子体浓度为  $1.78\times 10^{12}\text{ rad/s}$ ,等离子体碰撞频率为  $1.76\times 10^{12}\text{ s}^{-1}$ 。介质基板宽度  $W$  为  $5.8\text{ mm}$ ,长度  $L$  为  $8\text{ mm}$ ,其余具体参数见表 2。

当天线作为单极子进行辐射时,工作在 X 波段(称为模式一)。使用全波分析软件对天线模式一进行仿真,结果如图 3 所示。图 3 中横轴表征频率,纵轴表征  $S_{11}$ (天线反射系数),在  $8.3\sim 11.2\text{ GHz}$  内天线  $S_{11}$  小于  $-10\text{ dB}$ ,满足阻抗匹配要求,且阻抗匹配带宽达  $29.74\%$ 。

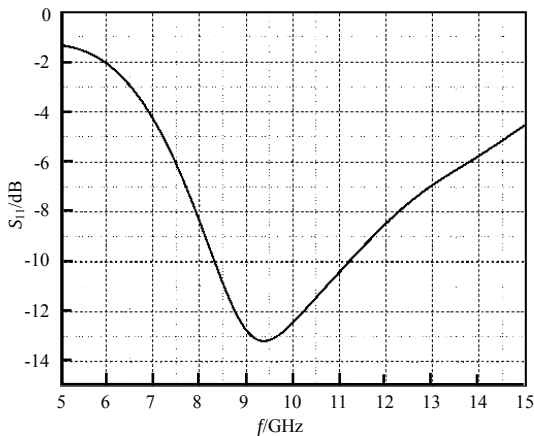


Fig.3  $S_{11}$  of mode I  
图 3 天线工作于模式一  $S_{11}$

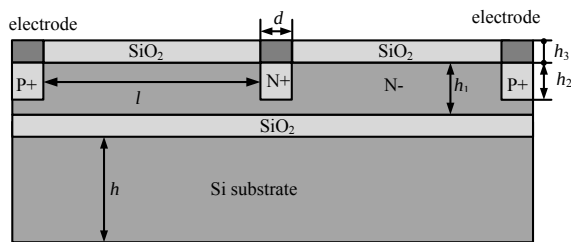


Fig.1 Cross section of S-PIN diode  
图 1 S-PIN 二极管横截面图

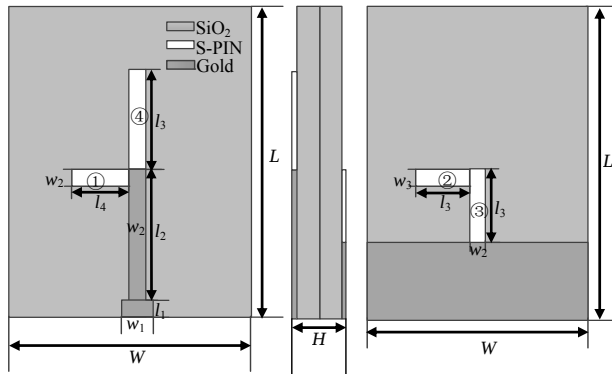


Fig.2 Top view,side view and back view of the antenna  
图 2 天线的正视图、侧视图与后视图

表 2 天线物理尺寸(单位: mm)

| Table2 Physical size of the antenna(unit:mm) |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| parameter                                    | $w_1$ | $w_2$ | $l_1$ | $l_2$ | $l_3$ | $l_4$ |
| size                                         | 0.52  | 0.4   | 0.3   | 4.17  | 2.46  | 1.64  |

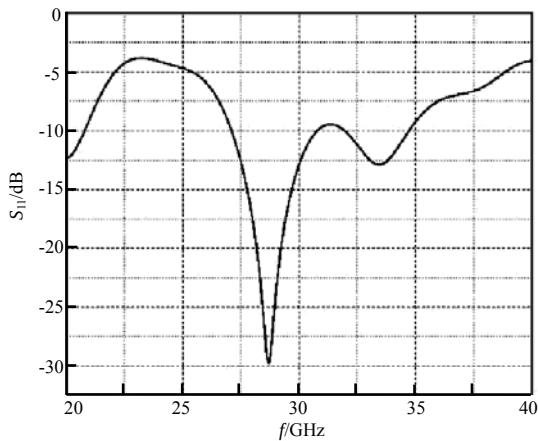


Fig.4  $S_{11}$  of mode II  
图 4 天线工作于模式二  $S_{11}$

当天线作为偶极子天线进行辐射时,工作在 Ka 波段(称为模式二),如图 4 所示。在 27.4~31.5 GHz 内天线  $S_{11}$  小于 -10 dB。阻抗匹配带宽为 13.92%。

此外,通过仿真软件对天线的表面电流分布进行仿真,能够更加直观地看出天线的辐射机理。图 5 为天线在 2 种模式下的表面电流分布,由模式一的表面电流分布可以看出,电流主要分布在正面金属线及④区域上,与单极子天线的表面电流分布十分相似。在模式二时,区域④电流分布较少,而①,②,③3 个区域电流较强,这也与偶极子天线的表面电流分布十分相似。图 6 为 2 种模式下的辐射方向图,低频方向图与单极子天线的辐射方向图符合较好,而高频方向图效果较差,主要问题在于天线高频的方向图本身更容易发生畸变。本设计中用到多个 S-PIN 单元结构,较为复杂,在进一步优化高频方向图上有些困难。

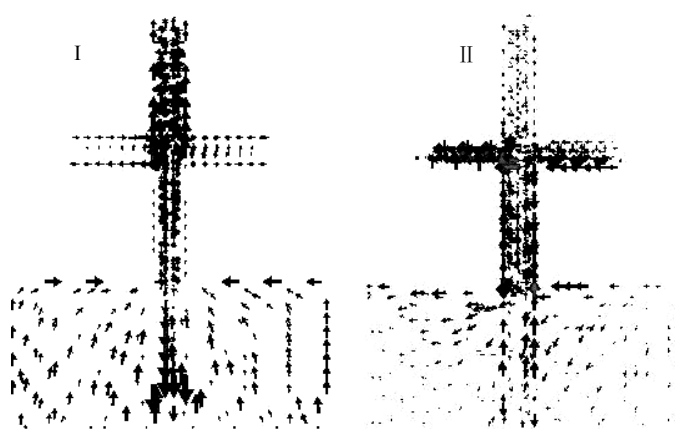


Fig.5 Current distribution of mode I and mode II

图 5 模式一及模式二的电流分布

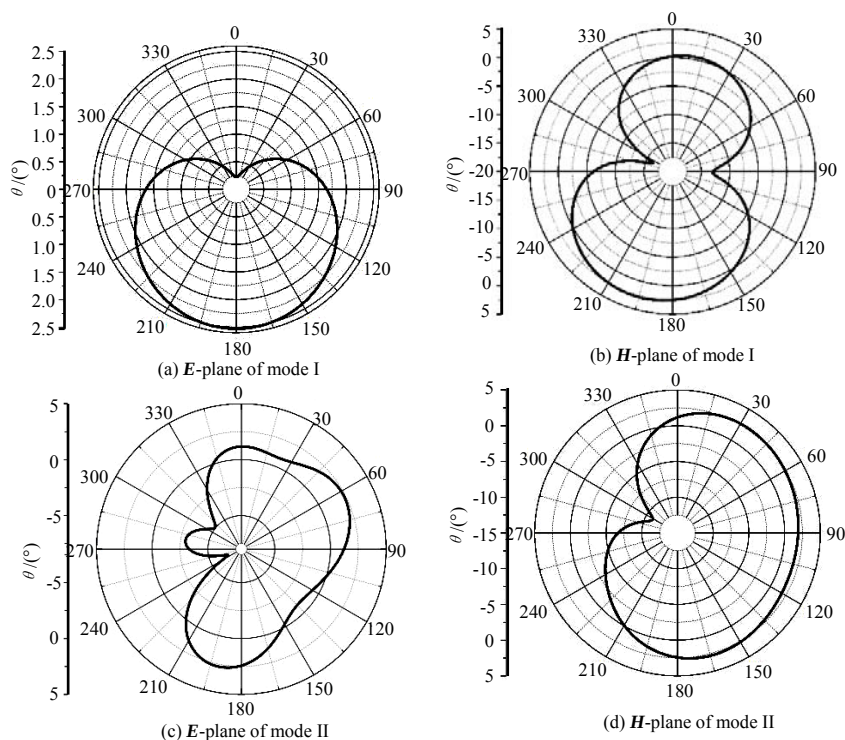


Fig.6 Antenna radiation pattern

图 6 天线辐射方向图

## 2 结论

本文设计了一款基于固态等离子体 S-PIN 二极管的可重构天线。天线实现了单极子和偶极子 2 种工作状态,实现了 X 波段到 Ka 波段的频率可重构,具有尺寸小,易于集成的优点。同时,该天线以等离子体为辐射器降低了雷达散射面积,有利于保护通信系统不受攻击。

## 参考文献:

- [1] 陈林松,马红星. 等离子体技术在天线隐身中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2005,3(3):140-143. (CHEN Linsong, MA Hongxing. The application of plasma to design of antenna[J]. Radar Science and Technology, 2005,3(3):140-143.)

- [2] 黄方意,林志丹,王超. 等离子体天线技术原理分析[J]. 舰船电子对抗, 2013,36(1):76–79. (HUANG Fangyi,LIN Zhidan,WANG Chao. Analysis of plasma antenna technology principle[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2013,36(1):76–79.)
- [3] KUMAR R,BORA D. A reconfigurable plasma antenna[J]. Journal of Applied Physics, 2010,107(5):3272.
- [4] MATHEW J,MEGER R A,FERNSLER R F,et al. Electronically steerable plasma mirror based radar antenna[C]// Antennas and Propagation. Edinburgh,UK:[s.n.], 1997:469–473.
- [5] BORG G G,HARRIS J H,MARTIN N M,et al. Plasma-as antenna:theory,experiment and applications[J]. Physics of Plasma, 2000,7(5):2198–2202.
- [6] YASHCHYSHYN Y,MARCZEWSKI J,TOMASZEWSKI D. Investigation of the S-PIN diodes for silicon monolithic antennas with reconfigurable aperture[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques, 2010,58(5):1100–1106.
- [7] YASHCHYSHYN Y,DERZAKOWSKI K,BAJURKO P R,et al. Time-modulated reconfigurable antenna based on integrated S-PIN diodes for mm-wave communication systems[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015,63(9):4121–4131.
- [8] 连铎,郭庆功. 一种小型化超短波单极子天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):416–419. (LIAN Hua, GUO Qinggong. Design of a small ultra-short wave monopole antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):416–419.)
- [9] YASHCHYSHYN Y,DERZAKOWSKI K,BOGDAN G,et al. 28 GHz switched-beam antenna based on S-PIN diodes for 5G mobile communications[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017(99):1.
- [10] WEI L I,ZENG F,ZHANG T. Simulation of solid state plasma S-PIN diode[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(2):177–181.
- [11] 许小仓. 横向 S-PIN 固态等离子体偶极子天线设计研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015. (XU Xiaocang. Research of lateral S-PIN solid state plasma dipole antenna[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2015.)
- [12] 尹昌刚. 等离子体天线的理论与应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009. (YIN Changgang. Research on theory and application of plasma antennas[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.)
- [13] NORRIS E G,ANDERSON T,ALEXEFF I. Reconfigurable Plasma Antenna US Patent:6,369,763[P]. 2002.
- [14] KIM D J,PARK J S,KIM C H,et al. Reconfigurable Yagi-uda antenna based on a silicon reflector with a solid-state plasma[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):17232.

#### 作者简介:



史向柱(1995–),男,江苏省淮安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为可重构天线、特征模理论.email:Alex\_Shii@foxmail.com.

刘少斌(1965–),男,南京市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算电磁学、等离子体隐身技术、目标与环境电磁特性等.

唐丹(1994–),女,重庆市人,在读硕士研究生,主要研究方向为等离子体、可重构天线.

孔祥鲲(1979–),男,江苏省镇江市人,副研究员,研究方向为人工电磁材料、等离子体光子晶体、计算电磁学等.