

# 一种基于 SPiN 二极管的高集成可重构天线

苏 汉, 王华剑

(武警工程大学信息工程学院, 西安, 710086)

**摘要** 针对现代通信技术的快速发展对天线的智能化和高集成提出越来越高的需求,设计并制备了一种基于 SPiN 二极管的硅基固态等离子体可重构天线,SPiN 二极管作为天线基本辐射单元设计在高电阻率的硅衬底上,通过施加合适的正向偏压在本征区内部形成固态等离子体区域,从而有效提升了天线系统集成度和动态可重构能力。仿真与实测结果表明,二极管本征区内部固态等离子体浓度超过了  $1.018 \text{ cm}^{-3}$ ,基于优化 SPiN 二极管的新型高集成可重构单极子天线通过控制天线不同单元的导通与截止实现了谐振频率在 8.83 GHz 和 9.71 GHz 的两种工作状态,在不同模式下的最大增益分别达到了 2.04 dB 和 1.68 dB。天线其他辐射参数也表现出良好的性能,为高性能可重构天线的设计和应用提供了一种新方法。

**关键词** SPiN; 固态等离子体; 可重构

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.05.009

**中图分类号** TN826 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)05-0056-05

## A High-Integration Reconfigurable Antenna Based on SPiN Diode

SU Han, WANG Huajian

(College of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

**Abstract** Being intelligence and high integration, solid state plasma reconfigurable antenna based on SPiN diode can be extensively used in modern communication system. A SPiN diode is designed on a high resistivity silicon wafer, and solid state plasma region is formed when a forward bias is applied on this diode, which greatly improves the antenna integration and reconfigurability. The simulation and experiment results show that the diode dimensions and boundary layers are optimized to trap carriers in well-defined channels approaching high concentration levels exceeding  $1.018 \text{ cm}^{-3}$ . Besides, the antenna's reconfigurability is demonstrated by turning different sections on or off to change the plasma region of the monopole. In this paper, there are two resonant frequencies at 8.83 GHz and 9.71 GHz are obtained, and the maximum gains of this monopole at two working states are 2.04 dB and 1.68 dB, respectively. Other radiation parameters of this antenna also show good performance, providing a new method for the design and application of high-performance reconfigurable antennas.

**Key words** surface PiN; solid state plasma; reconfigurable

随着无线通信、人工智能、卫星导航和移动终端 之间的联系越来越密切,通信需求的高速发展使得

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61474085); 武警工程大学校级立项项目(WKY202124、WJY202118)

作者简介: 苏 汉(1990—),男,安徽砀山人,讲师,博士,研究方向:硅基可重构天线。E-mail:suhanlq@163.com

**引用格式:** 苏汉,王华剑.一种基于 SPiN 二极管的高集成可重构天线[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(5):56-60. SU Han, WANG Huajian. A High-Integration Reconfigurable Antenna Based on SPiN Diode[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(5): 56-60.

传统天线系统面临着前所未有的挑战。传统天线设计在 PCB 或其他介质板上,该天线具有体积大、重构性能差以及集成度低等缺点。此外,金属(铜或铝)作为天线基本辐射单元,使得天线的隐身性能大大降低,限制了天线系统向小型化、智能化和集成化方向发展<sup>[1]</sup>。因此,利用可重构天线技术实现天线系统的智能化成为了无线通信领域的重要研究方向之一。目前,国内外研究人员通常采用两种方法实现天线性能的重构:一种是在预先设计的孔径上使用射频开关(PIN 二极管,场效应晶体管和 MEMS 等),另一种是采用多天线系统<sup>[2-4]</sup>。射频开关以及多天线系统的存在将会极大地降低天线系统集成度和重构灵活性,难以满足现代通信系统的需求。本文提出了一种基于固态等离子体表面 PiN(SPiN)二极管的新型高集成可重构天线,通过控制不同二极管单元的导通与截止实现天线系统的动态重构,具有工作频段切换灵活、辐射方向范围宽、高集成度易于实现小型化、且与半导体硅工艺相兼容等众多优势,未来在国防通讯与雷达技术方面具有重要的应用前景。

SPiN 二极管取代金属作为硅基天线的基本组成部分,当在该二极管上施加正向偏压时会在本征区内部形成固态等离子体区域。此时,本征区内的载流子浓度超过  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,二极管具备类金属特性可作为天线辐射单元,实现电磁波的辐射、传输与接收。由于等离子体区域的电导率与载流子浓度密切相关,SPiN 二极管阵列单元采用绝缘体上硅(SOI)技术将载流子限定在顶层硅中,使得本征区内部载流子的浓度进一步提升。本文设计了一种基于 SPiN 二极管的硅基可重构单极子天线,并通过控制不同辐射单元的导通与截止改变单极子天线的等离子体区域实现两种不同的工作状态。同时,高电阻率硅衬底的引入有助于减少衬底介质与外界电磁波之间的相互耦合,从而改善天线系统的集成度和天线的辐射性能<sup>[5-7]</sup>。

## 1 固态等离子体 SPiN 二极管

### 1.1 二极管工作机制

在传统天线系统中,PIN 二极管作为射频开关器件,是一种垂直器件,通过控制 PIN 二极管的状态实现天线性能的重构。与传统 PIN 二极管相比,硅基固态等离子体 SPiN 二极管是一种横向半导体器件,其结构示意图如图 1 所示。该二极管包含四个部分:有源区(P+和 N+)、本征区、二氧化硅层和金属接触区。根据理论分析和仿真优化结果,本

征区长度  $L$  为  $50 \mu\text{m}$ (由载流子扩散长度决定),本征区宽度为  $20 \mu\text{m}$ ,本征区深度  $D$  为  $80 \mu\text{m}$ (由电磁波频率和趋肤深度之间的关系确定)<sup>[8]</sup>。此外,该二极管在本征区四周还设置有环形绝缘体,隔离环的存在可避免载流子在两个相邻 SPiN 二极管之间的横向扩散,从而进一步提升本征区内部固态等离子体浓度和分布均匀性。

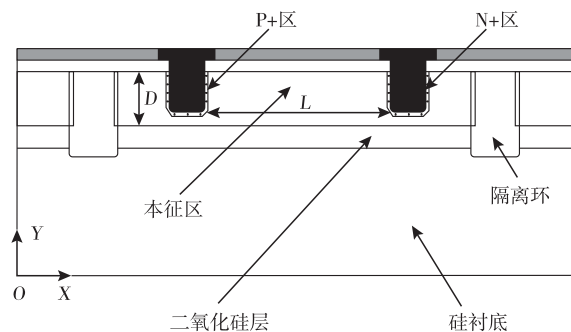


图 1 SPiN 二极管结构示意图

当在该二极管上施加正向偏压时,有源区(N+和 P+)内的载流子(电子和空穴)向本征区内部扩散并发生复合。当本征区内部载流子产生与复合达到动态平衡时,二极管处于稳定状态,此时本征区内部载流子浓度可超过  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,等离子体区域的电导率非常高,具备类金属特性,可作为天线基本辐射单元实现电磁波的辐射、接收和传输<sup>[9-11]</sup>。此外,当没有正向偏压施加在二极管两端时,二极管处于截止状态,此时本征区内部没有高浓度固态等离子体,二极管相当于一种电介质,不与外界电磁波相互耦合,大大提高了天线系统的隐身性能。

### 1.2 固态等离子体浓度和分布模型

固态等离子体浓度是 SPiN 二极管的主要特性参数,浓度大小和分布均匀性直接影响到硅基天线系统的辐射特性。因此,载流子在本征区内部浓度和分布模型的研究对硅基可重构天线的研究至关重要。

P 型有源区与本征区界面  $P_i$  结处的载流子浓度( $x = x_p$ )可以表示为:

$$p(x_p) = \frac{\gamma_1 (m_{op} + m_{oi} \gamma_1)}{1 - \gamma_1^2} \quad (1)$$

$$\gamma_1 = \exp[(V_{P_i} - V_{D1})/\varphi_T] \quad (2)$$

$$m_{op} = p_{op} - n_{op}, m_{oi} = n_{oi} - p_{oi} \quad (3)$$

式中: $V_{P_i}$ 是  $P_i$  结的电压; $V_{D1}$ 是  $P_i$  结的接触电势差。 $m_{op}$ 和  $m_{oi}$ 是本征区的多数载流子; $p_{op}$ 和  $n_{op}$ 是 P+ 区的稳定空穴和电子浓度; $p_{oi}$ 和  $n_{oi}$ 是本征区的稳定空穴和电子浓度<sup>[12]</sup>。

假设杂质完全电离,则式(1)可表示为:

$$p(x_p) = \frac{\gamma_1 \left( N_{Asi} - \frac{n_{ieff}^2}{N_A} + \left( N_d - \frac{n_i^2}{N_d} \right) \gamma_1 \right)}{1 - \gamma_1^2} \quad (4)$$

式中:  $N_A$  是 P+ 区域的掺杂浓度;  $N_d$  是本征区的掺杂浓度。式(4)可以简化为:

$$p(x_p) \approx \gamma_1 N_A \quad (5)$$

类似的, N 型有源区与本征区界面 Ni 结处的载流子浓度 ( $x = x_n$ ) 可以表示为:

$$p(x_n) \approx \gamma_2 N_D \quad (6)$$

式中:  $N_D$  是 N+ 区的掺杂浓度。

因此, 载流子浓度公式的系数可以表示为:

$$A = \frac{\gamma_1 N_A \exp\left(-\frac{x_n}{L_a}\right) - \gamma_2 N_D \exp\left(-\frac{x_p}{L_a}\right)}{\exp\left(-\frac{x_n - x_p}{L_a}\right) - \exp\left(\frac{x_n - x_p}{L_a}\right)} \quad (7)$$

$$p(x) = \frac{N_A \exp\left[\frac{q(V_{Pi} - V_{D1})}{kT} - \frac{x_n}{L_a}\right] - N_D \exp\left[\frac{q(V_{Ni} - V_{D2})}{kT} - \frac{x_p}{L_a}\right] \exp\left(\frac{x}{L_a}\right) + N_A \exp\left[\frac{q(V_{Pi} - V_{D1})}{kT} + \frac{x_n}{L_a}\right] - N_D \exp\left[\frac{q(V_{Ni} - V_{D2})}{kT} + \frac{x_p}{L_a}\right] \exp\left(-\frac{x}{L_a}\right)}{\exp\left(\frac{x_n - x_p}{L_a}\right) - \exp\left(-\frac{x_n - x_p}{L_a}\right)} \quad (9)$$

基于以上研究, 得到了本征区内部固态等离子体浓度和分布模型, 为二极管和硅基天线的理论仿真与工艺制备奠定了基础, 验证了 SPiN 二极管设计的有效性。

## 2 二极管实验分析

图 2 为制备的 SPiN 二极管样品, 通过二极管结构尺寸参数以及理论模型的优化, 得到了具有高浓度载流子的等离子体器件。通过在金属电极上施加正向偏压以产生高浓度的固态等离子体区域, 同时在本征区四周形成环形绝缘实现载流子隔离。SPiN 二极管在 SOI 衬底上制备而成, 实验中选用高电阻率的硅衬底: 相对介电常数为 11.8, 损耗角正切为 0.01, 电导率约为 3 S/m, 有助于弱化硅衬底与外界电磁波之间的耦合, 从而进一步改善天线系统的集成度和辐射性能。二极管制备的整个过程均在室温下进行。

制备的 SPiN 二极管正向 I-V 特性仿真和实验结果如图 3 所示。从图中可以看出, 该二极管的开启电压约为 0.8 V, 此时载流子处于大注入水平, 随着电压的进一步增加, 二极管达到平衡状态, 稳态电压和电流分别为 2 V 和 0.1 A。同时, 该二极管具有良好的正向特性, 实验与仿真结果吻合良好。

为了进一步研究该二极管的固态等离子体微波特性, 本文分析了二极管内部载流子浓度和分布情况, 如图 4 所示。

$$B = \frac{\gamma_1 N_A \exp\left(\frac{x_n}{L_a}\right) - \gamma_2 N_D \exp\left(\frac{x_p}{L_a}\right)}{\exp\left(\frac{x_n - x_p}{L_a}\right) - \exp\left(-\frac{x_n - x_p}{L_a}\right)} \quad (8)$$

其中:

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si} N_A V_{D1}}{q N_d (N_A + N_d)}}$$

$$x_n = L - \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si} N_D V_{D2}}{q N_d (N_D + N_d)}}$$

式中:  $V_{D2}$  是 Ni 结的接触电势差。

因此, 本征区内的固态等离子体浓度模型可以描述为:

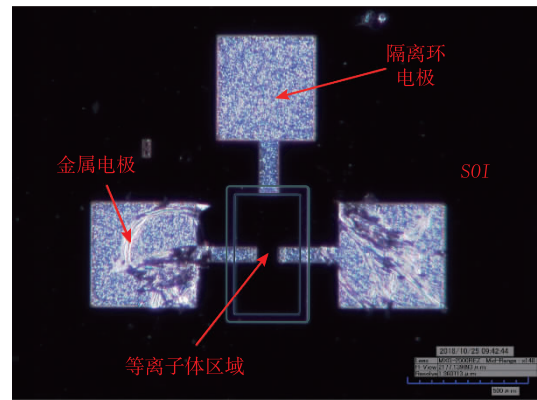


图 2 SPiN 二极管样品

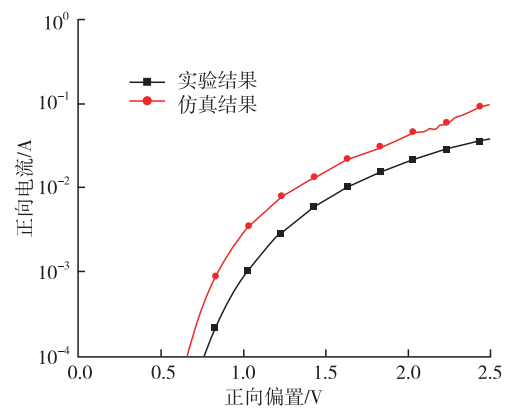


图 3 SPiN 二极管 I-V 特性

从图 4 中可以看出, 二极管内部固态等离子体浓度超过  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 且浓度最小值达到了  $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。此时, 等离子体区域的电导率非常高, 代替金属与外界电磁波相互耦合, 可以极大地改善天线的性能。由式(9)可得到二极管内部载流子分布模型, 载流子在本征区内部呈现一种“悬链式”分布, 二

极管两端浓度最高,越往中心区域浓度越低,这是由于电子和空穴的复合形成的。此外,二极管正向特性的仿真与实验结果相互吻合,结果之间微小的偏差可能来源于载流子掺杂和扩散不均匀。

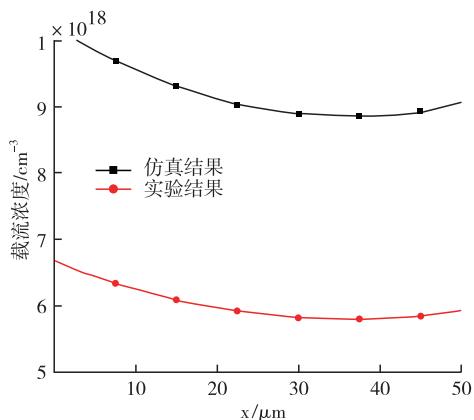


图 4 载流子浓度和分布

### 3 硅基可重构单极子天线

基于以上研究成果,本文设计了一种基于优化 SPiN 二极管的硅基固态等离子体可重构单极子天线,其结构示意图见图 5。

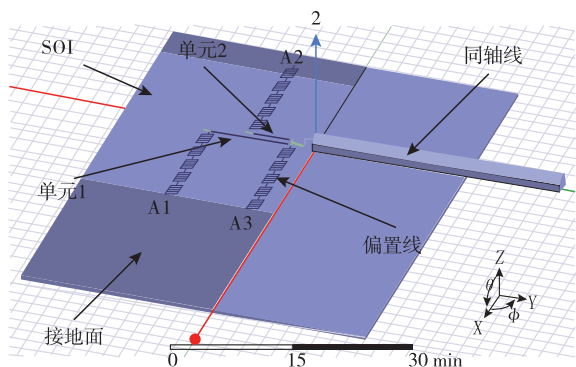


图 5 可重构单极子天线结构示意图

从图中可以看出,该单极子天线系统由 5 个部分组成:天线导体(单元 1 和单元 2),同轴线,偏置线(A1,A2 和 A3),接地面和 SOI 衬底。该单极子天线水平放置,并且所有系统部件均通过半导体工艺设计在单个硅衬底上。该天线包含两部分等离子体区域:单元 1 和单元 2,单元 1 的长度为 8.5 mm,单元 2 的长度为 7.5 mm,不同导体单元均由相同的优化 SPiN 二极管排列串联而成。表 1 为天线的两种工作状态,通过动态控制不同单元的导通与截止来改变等离子体区域的有效长度从而实现天线性能的重构,使其重构性能和集成性能相比于金属天线系统大大提升。

可重构单极子天线在两种工作状态下的 S 参数随频率变化的曲线如图 6 所示。从图中可以看出,

所设计的硅基单极子天线实现了谐振频率在 8.83 GHz 和 9.71 GHz 的两种重构模式,且  $|S_{11}|$  最小值达到了 -20 dB 左右。

表 1 单极子天线重构模式

偏置线	A1	A2	A3
模式 1	ON	OFF	ON
模式 2	OFF	ON	ON

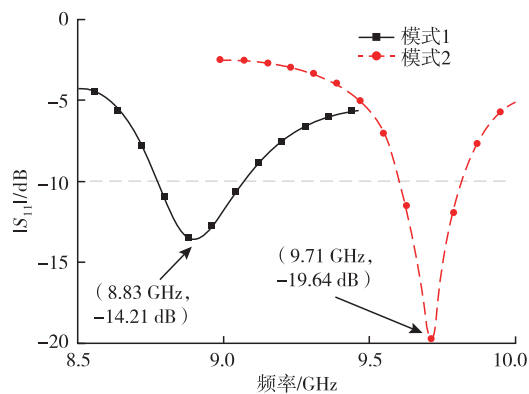


图 6 可重构单极子天线 S 参数

图 7 为该单极子天线在两种状态下的辐射方向图( $\theta=90^\circ$ 和 $\varphi=0^\circ$ )。从图中可以看出,该天线显示出良好的辐射性能,在两种工作状态下的最大增益分别达到了 1.68 dB 和 2.04 dB。表 2 为该可重构单极子天线的其他辐射参数。

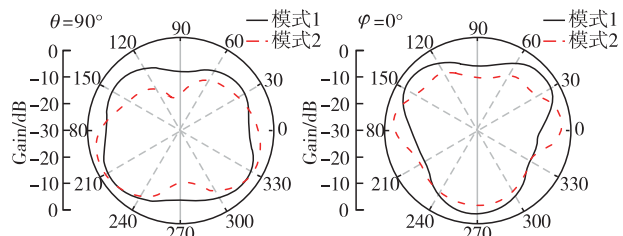


图 7 单极子天线辐射方向图

表 2 单极子天线其他辐射参数

天线	VSWR	Radiation Efficiency/%
模式 1	1.26	36.42
模式 2	1.17	40.09

图 8 为该硅基单极子天线在不同工作状态下的表面电流和电场强度分布。从图 8(a)中可以看出,在工作模式 1 下单元 1 的表面电流分布很强,验证了该天线谐振模式在 8.8 GHz 时的工作状态主要由单元 1 被激励。同时,单元 2 的表面电流分布很小,在这种情况下,该部分类似于电介质材料不与外界电磁波相互耦合。类似地,当该单极子天线工作在模式 2 时,单元 2 上会产生很强的表面电流分布。此外,本文还研究了单极子天线在两种状态下的电场强度分布,如图 8(b)所示,验证了硅基天线设计的有效性。

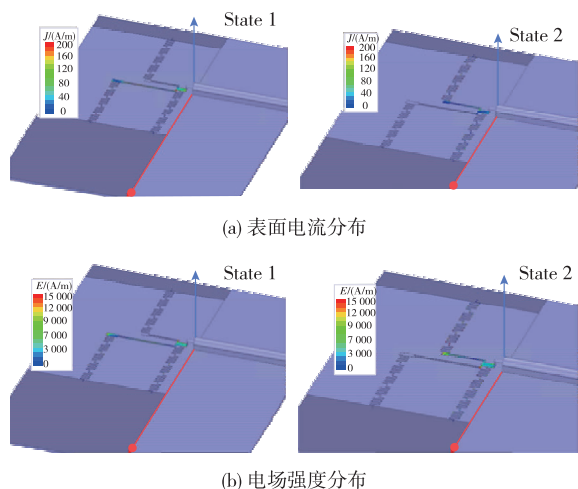


图8 天线在不同工作状态下的电流和电场强度分布

## 4 结语

本文研究了一种基于 SPiN 二极管的新型硅基固态等离子体可重构单极子天线,优化并制备了 SPiN 二极管阵列单元,仿真和实验结果表明,二极管本征区内部的载流子浓度超过  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。此外,SOI 技术的引入可进一步提高二极管的性能。基于优化得到的高性能 SPiN 二极管,提出了一种硅基固态等离子体可重构单极子天线,得到了两种谐振频率(8.83 GHz 和 9.71 GHz)的重构状态,天线其他辐射参数也表现出良好的辐射性能,具有工作频段切换灵活、辐射方向范围宽、高集成度易于实现小型化、且与半导体硅工艺相兼容等众多优势,为硅基固态等离子体可重构天线的设计与应用提供了有益的参考和指导。

### 参考文献

[1] NIE L Y, LIN X Q, YANG Z Q, et al. Structure-Shared Planar UWB MIMO Antenna with High Isolation for Mobile Platform[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4):2735-2738.  
 [2] YASHCHYSHYN Y, DERZAKOWSKI K, BOGDAN G, et al. 28 GHz Switched-Beam Antenna Based on SPiN Diodes for 5G Mobile Communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,

2018, 17:225-228.

- [3] ZHAO X, YEO S P, ONG L C. Planar UWB MIMO Antenna with Pattern Diversity and Isolation Improvement for Mobile Platform Based on the Theory of Characteristic Modes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1):420-425.  
 [4] TAO J, FENG Q. Compact Ultrawideband MIMO Antenna with Half-Slot Structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16:792-795.  
 [5] SHIRAZI M, HUANG J, LI T, et al. A Switchable-Frequency Slot-Ring Antenna Element for Designing a Reconfigurable Array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(2):229-233.  
 [6] AFZALIAN A, FLANDRE D. Characterization of Quantum Efficiency, Effective Lifetime and Mobility in Thin Film Ungated SOI Lateral PIN Photodiodes[J]. Solid-State Electron, 2007, 51(2):337-342.  
 [7] KIM S H, LEE S H, JANG J. Fabrication and Characterization of Low-Temperature Poly-Silicon Lateral p-i-n Diode[J]. IEEE Electron Device Letters, 2010, 31(5):443-445.  
 [8] BYFORD J A, PARK K Y, CHAHAL P, et al. Frequency Reconfigurable Patch Antenna Array[J]. Electronics Letters, 2015, 51(21):1628-1630.  
 [9] AFZALIAN A, FLANDRE D. Physical Modeling and Design of Thin-Film SOI Lateral PIN Photodiodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(6):1116-1122.  
 [10] FATHY A E, ROSEN A, OWEN H S, et al. Silicon-Based Reconfigurable Antennas-Concepts, Analysis, Implementation, and Feasibility[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(6):1650-1661.  
 [11] LIU J, LI J, XU R. Design of Very Simple Frequency and Polarisation Reconfigurable Antenna with Finite Ground Structure[J]. Electronics Letters, 2018, 54(4):187-188.  
 [12] GE L, LUK K M. A Magneto-Electric Dipole for Unidirectional UWB Communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(11):5762-5765.

(编辑:徐楠楠)