

二极管选型对能量选择表面天线罩的性能影响

李安淇, 吴雄斌, 徐一昊, 周永金

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海, 200444)

摘要 能量选择表面技术主要通过周期结构加载非线性器件可自适应实现对高功率入射波的非线性响应, 即“低通高阻”。以二极管选型对能量选择表面天线罩性能的影响为研究目的, 首先, 通过注入实验评估不同型号二极管在高功率信号输入时的功率毁伤阈值, 并进行相应的毁伤测试分析, 实验结果表明: 当输入功率达到 47 dBm 时, BAP65 二极管内部电流过载引发热失控, 导致毁伤; 其次, 选择 4 种不同型号的二极管评估它们对能量选择表面天线罩的插入损耗和屏蔽效能的影响, 实验结果表明: 在 0.75~0.9 GHz, 加载 MMP4401 二极管的能量选择表面具有低于 0.5 dB 的插入损耗和大于 15 dB 的屏蔽效能。此外, 双管并联的能量选择表面表现出较好的屏蔽效果, 而单管则具有更低的插入损耗。

关键词 能量选择表面; 高功率微波; PIN 二极管; 毁伤阈值

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.002

中图分类号 TN820; TN312 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0012-05

The Impact of Diode Selection on the Performance of Energy Selective Surface Radome

LI Anqi, WU Xiongbin, XU Yihao, ZHOU Yongjin

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,

School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract Energy Selective Surface (ESS) is an effective technology in blocking high-power microwave to damage electronic equipment systems through front-door coupling. Such a technology can adaptively respond to incident high-power waves by loading nonlinear components such as diodes in a “low-pass high-resistance” way through periodic structures. In this study, the impact of diode selection on the performance of ESS radome is investigated. Firstly, the damage threshold of the diodes is evaluated through injection experiments under high-power signal input and conducted corresponding damage testing and analysis. The experimental results show that the current being overloaded, BAP65 diode is out of use when the input power reaches 47 dBm. And then, four kinds of diodes are selected to assess their effects on the insertion loss and shielding effectiveness of the ESS radome. The experimental results show that the energy selective surface loaded with MMP4401 diodes exhibits a shielding effectiveness with insertion loss being below 0.5 dB and shielding effectiveness exceeding 15 dB within the frequency range of 0.75 to 0.9 GHz. Additionally, the dual-diode configuration shows a superior shielding effectiveness, whereas the single-diode configuration exhibits a good insertion loss.

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61971469)

作者简介: 李安淇(1997-), 男, 安徽阜阳人, 硕士生, 研究方向为能量防护天线罩等。E-mail: anqi_li2021@163.com

通信作者: 周永金(1982-), 男, 山东荣成人, 教授, 研究方向为智能超表面、新型天线与传感系统。E-mail: yjzhou@shu.edu.cn

引用格式: 李安淇, 吴雄斌, 徐一昊, 等. 二极管选型对能量选择表面天线罩的性能影响[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 12-16. LI Anqi, WU Xiongbin, XU Yihao, et al. The Impact of Diode Selection on the Performance of Energy Selective Surface Radome[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 12-16.

Key words ESS; high power microwave; PIN diode; damage threshold

随着现代通信和电子技术的快速发展,通信电子设备面对的电磁环境越来越复杂,高功率微波对电子设备的威胁愈发明显。传统无源频选天线罩(frequency selective surface, FSS)可以实现带内透波以及带外电磁波屏蔽(反射或吸收)的功能^[1]。有源频选天线罩可以实现带内透波和屏蔽,但需要外加偏置网络以实现带内透波到带内屏蔽的切换,因而难以应对瞬时高功率电磁脉冲对系统的干扰^[2]。为解决强电磁脉冲的防护问题且不影响装备的正常使用,2009年,相关研究人员基于频率选择表面提出了能量选择表面(energy selective surface, ESS)的前门防护方法^[3]。ESS通过自身加载的二极管感应入射电磁波的能量,实现带内透波和屏蔽的自适应切换,保证己方小信号正常通过,同时可以对敌方大功率信号进行屏蔽。ESS的本质是当能量较低的电磁信号入射时,ESS对电磁波可近似成透明窗口;当入射电磁信号的能量高于安全阈值时,感应电场使得二极管导通,ESS对高能量信号产生屏蔽。近几年研究中,文献[4~5]基于等效电路提出的ESS在中心频点处实现了高透波和高屏蔽;文献[6]设计的ESS结构利用2个谐振环之间的相互耦合,使用单个二极管实现了双频段的能量选择功能;文献[7]设计了导航频段的双极化ESS,结合导航天线实现了圆极化高功率微波防护;文献[8]采用FPC技术制作柔性能量选择表面,将其与天线罩介质外壳共形,制备成曲面能量防护天线罩。

ESS的设计和性能优化涉及多个方面,其中之一是PIN二极管的选择。通过选择适当类型的二极管,可以调节ESS的频选性能、启动场强、尖峰泄露时间等^[9]。二极管等效电路仿真方法通常把电路参数定义为工作状态下的常量,而在实际工作中,二极管的部分关键物理参数会随工作状态变化而变化^[10]。文献[11~12]研究了在高功率微波脉冲下二极管的毁伤机理及规律。文献[13]通过电磁脉冲注入实验研究多级PIN限幅器的电磁损伤效应。研究表明:当入射的电磁脉冲幅度超过其损伤阈值时,限幅器存在不可逆转的损伤累积效应。

目前,加载不同类型二极管对ESS天线罩特性的影响还不明确,研究成果相对有限。本文首先对二极管进行损伤测试分析,然后研究不同类型二极管对能量选择表面性能的影响,为能量选择表面的设计和优化提供指导。

1 能量选择表面设计

如图1所示,本文设计的A夹层ESS平面天线罩由蒙皮层、ESS层和蒙皮层组成,蒙皮层与ESS层之间用厚度 $d_2=0.1\text{ mm}$ 的环氧胶膜粘接,蒙皮层材料为氰酸酯石英布预浸料, $\epsilon_r=3.3$, $\tan\delta=0.007$,厚度 $d_1=0.2\text{ mm}$ 。设计的ESS结构可分为3层,顶层为有源超表面,中间为方形贴片, $(l_1=30\text{ mm})$,四周为金属条,(长 $l_2=15.56\text{ mm}$,宽 $w_1=10\text{ mm}$),组成了类“十字形”结构,PIN二极管加载在方形贴片和四周金属条之间的缝隙处,周期 $P=62\text{ mm}$ 。当入射波能量幅度变化时,PIN二极管状态会自动变化,使得ESS阻抗发生改变,从而实现ESS工作状态切换。第2、第3层采用相同的设计,在第1层无源结构的基础上加载金属框宽 $w_2=0.23\text{ mm}$ 。3层金属结构之间为F4B220介质层($\epsilon_r=2.2$, $\tan\delta=0.0009$)厚度 $d_3=0.5\text{ mm}$ 。

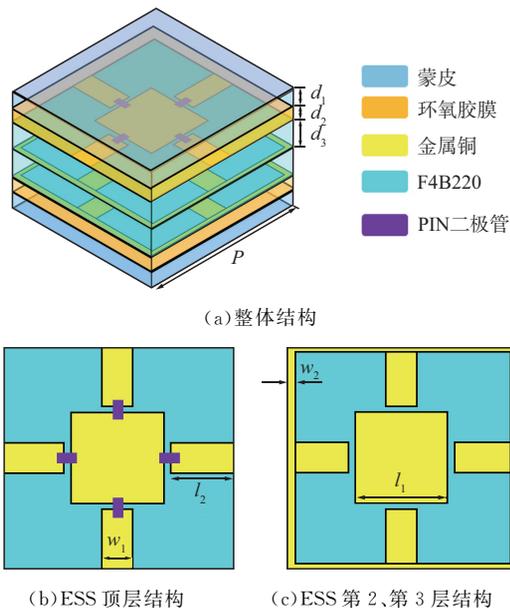


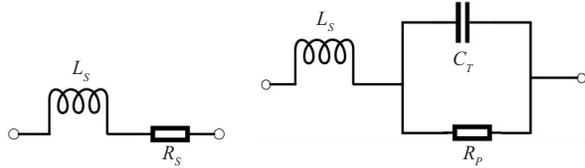
图1 加载蒙皮的能量选择表面结构

2 二极管分析及毁伤测试

与常见的有源超表面相比,ESS加载的二极管可以根据入射波能量大小自适应调节,不需要额外的馈电网络。当不同型号、封装的二极管加载在ESS结构上时,插入损耗(insertion loss, IL)和屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)性能会产生相应的改变。

2.1 二极管等效电路

二极管的稳态等效电路模型^[6]如图 2 所示,其中 R_S 为 PIN 二极管导通时的等效电阻, L_S 为封装产生的寄生电感, C_T 为二极管截止时等效电容, R_P 为二极管截止时 I 层的电阻。参考数据手册给出的典型值, 4 种型号 PIN 二极管的参数如表 1 所示。



(a) 二极管导通时等效电路 (b) 二极管截止时等效电路

图 2 PIN 二极管等效电路

表 1 不同型号二极管等效电路参数

二极管型号	L_S/nH	R_S/Ω	C_T/pF
BAP55	0.4	0.50	0.180
BAP65	0.6	0.35	0.375
MMP4401		0.80	0.350
MADP-007433	0.6	1.50	0.100

2.2 二极管毁伤测试

上述等效电路只能确定二极管截止或开启, 无法确定 ESS 在某一功率下的工作状态。确定二极管在长时间高功率工作条件下的损伤情况, 可以预测 ESS 的寿命和性能退化情况。因此, 本文采用注入实验的方式研究二极管在不同功率下的隔离度, 测试场景如图 3 所示。将型号为 BAP65 二极管焊接在测试夹具上, 信号源产生信号通过功率放大器调节注入二极管的输入功率, 最后频谱仪记录输出功率。

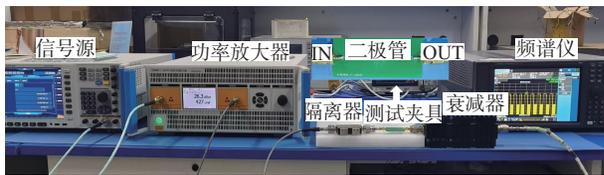


图 3 二极管高功率损伤测试现场

图 4 为随着二极管两端输入功率增大达到二极管毁伤的测试结果。当输入功率较低时, I 层中的载流子密度较低, 电流量相对较小, 因此二极管处于关闭状态。随着输入功率增加到 0 dBm, 输入信号可以提供足够的电子和空穴来填充 I 层, 此时载流子密度达到一定程度, 导电通道形成, 二极管开始导通。当输入功率增加到 47 dBm 时, I 层内部的电流密度增大, 使得 I 层局部区域的温度升高, 在较短时间内超过了二极管的耐受温, 二极管的内部材料可能发生结构热失真、热膨胀等现象, 导致二极管失效并最终烧毁。

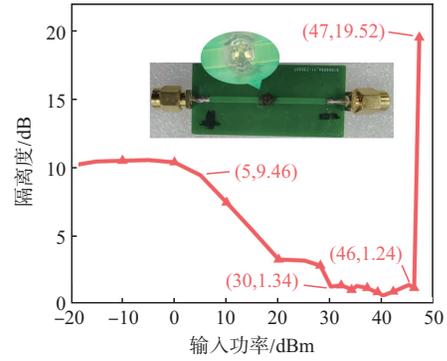


图 4 BAP65 二极管毁伤阈值测试结果及夹具毁伤状态

3 二极管对 ESS 性能的影响

为了评估二极管对 ESS 的 IL 和 SE 影响, 选择 4 种不同型号的二极管加载在 ESS 金属贴片的缝隙处, 并选择不同连接方式(单管和双二极管正负并联)进行测试。

3.1 不同型号二极管加载 ESS 测试分析

为了分析不同型号二极管对 ESS 实际性能影响, 对设计的结构进行了加工。加工的 ESS 测试样品尺寸为 $260\text{ mm} \times 220\text{ mm}$, 如图 5(a) 所示。采用矩形波导法测量 ESS 样品件的 IL 和 SE, 测试场景如图 5(b) 所示。屏蔽效能的测试采用加载导通电压的方式, 主要目的是为了模拟二极管的稳态模型, 二极管处于完全导通状态, 对应实际场景中此时外界信号的能量远大于 ESS 的启动阈值, 因此在 ESS 样品上加载了偏置线, 通过施加导通电压, 测试 ESS 在二极管完全导通的稳态情况。



(a) ESS 测试样品 (b) 插入损耗及屏蔽效能测试场景

图 5 ESS 测试样品及测试场景

加载不同型号二极管的 ESS 测试及仿真结果如图 6 所示。所设计的 ESS 加载 4 种不同二极管在 $0.8 \sim 0.9\text{ GHz}$ 频段内均满足 IL 小于 0.5 dB, SE 大于 15 dB。由于不同二极管本身的 I 区厚度不同, 导致结电容不同, 在本文设计的 ESS 结构中, 电容越大, 中心频点产生红移现象越明显。根据矩形波导内部电磁波的电场方向, 在 ESS 的样品表面加了如图 5(a) 所示绿色的偏置线, 以保证 ESS 在偏置电压的激励下对入射电磁波产生屏蔽作用。比较 4 种二极管的 SE, 发现二极管导通时 I 层等效的电阻

R_p 越小,表示屏蔽效果越好。而 I 层的厚度决定了电流通过的路径长度和电阻,较厚的 I 层会提供更短的电流通路并减少电阻,则导通的等效电阻就更小。经过比较,在 0.75~0.95 GHz 频段内,加载 MMP4401 型号二极管 ESS 的 IL 小于 0.5 dB 且 SE 大于 15 dB,性能优于加载的其他型号二极管。

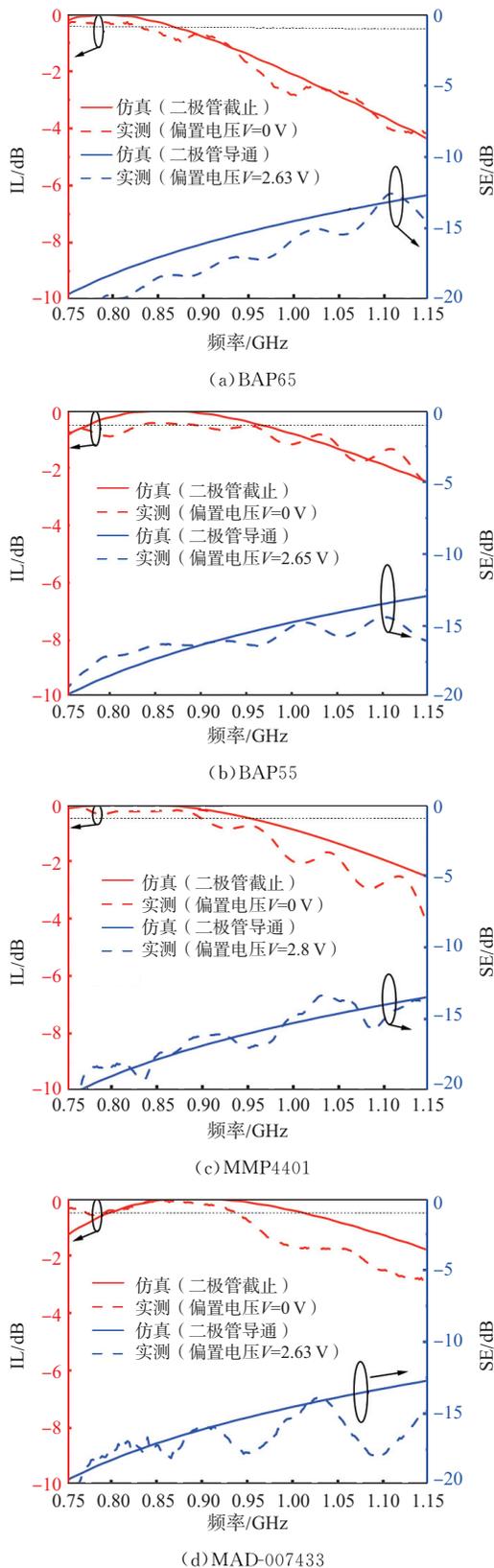


图 6 不同型号二极管 IL 和 SE 仿真及测试结果

3.2 双二极管对 ESS 性能分析

在限幅电路中,与单管限幅电路相比,双二极管限幅电路可实现双向限幅、扩大限幅范围的功能。如图 7 所示,采用双二极管正反并联加载在 ESS 贴片缝隙处的方式,选择上述二极管中的 2 种进行测试分析。

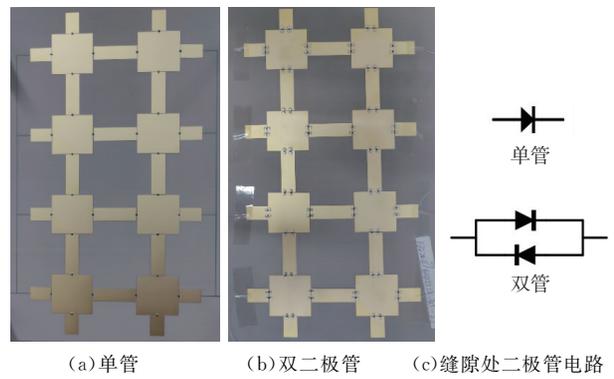


图 7 ESS 测试样品

双二极管加载 ESS 测试结果如图 8 所示。与单管相比,双管的 IL 明显增加,这主要是由于二极管截止时,等效的截止电容并联增大,中心频点发生红移以及双二极管带来损耗的增加。通过对比单、双管的 SE 结果可以发现,双管正反并联具有较好屏蔽效果。

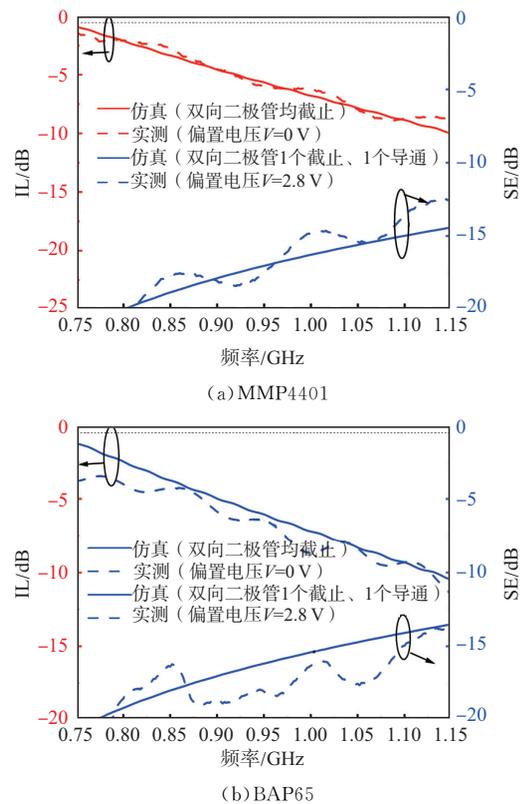


图 8 双管 IL 及 SE 测试结果

高功率测试环境如图 9 所示,将其中一款 ESS 放入矩形波导中,通过功率放大器调节输入信号的功率。如图 10 所示,当输入功率从 0~53 dBm 变化时,MMP4401 型号的二极管两端的感应电压逐

渐变增大,直至完全导通,此时 ESS 处于完全屏蔽状态。此外,不同频率处的屏蔽效能与上述双管加载偏置电压测试屏蔽效能结果相对应,即在低频处 ESS 具有较好的屏蔽效能。

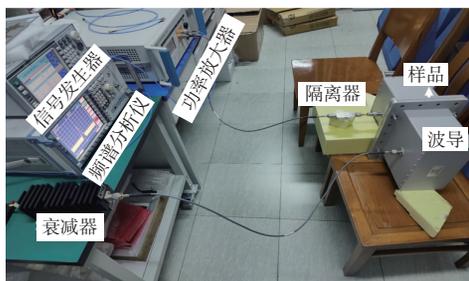


图 9 高功率测试场景

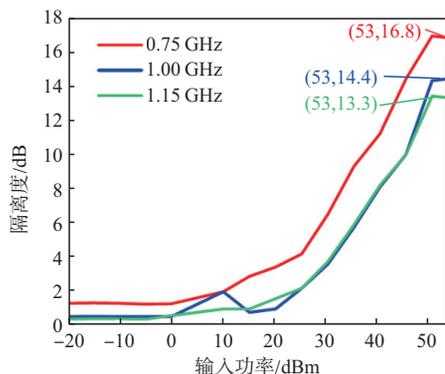


图 10 高功率测试结果

4 结语

首先通过注入实验法,研究二极管在由低到高的功率变化下的工作状态,结果表明功率对二极管的损伤速度影响是非线性的,当输入功率超过某一阈值时(47 dBm)时二极管瞬间毁伤。其次,测试不同型号二极管对 ESS 性能的影响,表明二极管的截止电容和导通电阻的降低会改善 ESS 的 IL 和 SE,当二极管的 I 层厚度较大时,对应的截止电容增大和导通电阻减小,因此选择二极管时,需要权衡 I 层厚度对 ESS 性能指标的影响,并根据应用需求选择。

综上所述,本文研究了二极管选型对能量选择表面性能的影响,并通过毁伤测试评估了其耐受能力,不仅对优化能量选择表面性能以及提高防护阈值具有重要意义,同时也进一步保障了强电磁环境下通信系统的安全性。

参考文献

- [1] HONG T, WANG M D, PENG K, et al. Compact Ultra-Wide Band Frequency Selective Surface with High Selectivity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7): 5724-5729.
- [2] MONNI S, BEKERS D J, VAN WANUM M, et al. Limiting Frequency Selective Surfaces [C]//2009 European Microwave Conference (EuMC). Rome, Italy: IEEE, 2009: 606-609.
- [3] YANG C, LIU P G, HUANG X J. A Novel Method of Energy Selective Surface for Adaptive HPM/EMP Protection [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 112-115.
- [4] HU N, ZHAO Y T, ZHANG J H, et al. High-Performance Energy Selective Surface Based on Equivalent Circuit Design Approach [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(6): 4526-4538.
- [5] ZHOU L, SHEN Z X. Diffusive Energy-Selective Surface with Low Backscattering [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 430-439.
- [6] 虎宁, 查淞, 刘晨曦, 等. 一种双频能量选择表面的设计 [J]. 微波学报, 2022, 38(6): 1-5.
- [7] 易波, 李丽英, 陈紫琪. 加载能量选择表面的导航天线强电磁辐照响应研究 [J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(6): 95-99.
- [8] 王轲. 能量选择结构设计及导航防护应用研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [9] 刘树伟. 电磁能量防护表面的设计与应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [10] 高扬. 基于能量选择的高功率电磁防护表面研究与设计 [D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [11] 高川. PIN 二极管的高功率微波毁伤机理研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [12] 宫振慧. PIN 限幅二极管微波击穿效应机理研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [13] 王冬冬, 邓峰, 郑生全, 等. PIN 二极管限幅器的电磁脉冲损伤特性试验 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 65-69.

(编辑:徐楠楠)