

基于金属销钉封装的Ka波段固态功率放大模块研究

孙健健 徐建华* 成海峰 祝庆霖 韩煦

(南京电子器件研究所 南京 210016)

摘要: 为了抑制一定频带内的平行板和腔体谐振模式,提高功率放大器工作的稳定性。该文提出了一种人工磁导体(AMC)边界作为腔体封装的Ka波段固态功率放大模块。人工磁导体边界通过周期性金属销钉构成的电磁带隙(EBG)抑制结构实现。对Ka波段固态功率模块进行了设计、加工、装配和测试。由仿真和测试得到的S参数数据,详细地评估讨论了该封装的性能。通过对比其他封装结构,功率模块的无源测试结果证明金属销钉封装可以有效抑制腔体谐振,提高功放模块隔离度。功率模块的有源功率测试则表明金属销钉封装不会影响放大器输出功率。

关键词: 人工磁导体; 电磁带隙; 封装; 谐振; 功率放大器

中图分类号: TN772

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-3074-07

DOI: 10.11999/JEIT190791

Research on Ka-band Solid-state Power Amplifier Module Packages Using a Lid of Nails

SUN Jianjian XU Jianhua CHENG Haifeng ZHU Qinglin HAN Xu

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to dampen the parallel plate modes and cavity modes within the frequency range of interest, and improve the stability of power amplifiers, a Ka-band solid-state power amplifier module, which is packaged with an Artificial Magnetic Conductors (AMC) boundary is presented in this paper. The AMC boundary is realized with Electromagnetic Band Gap (EBG) which is constructed by a period of metal nails in this paper. A Ka-band solid-state power amplifier module is designed, fabricated, assembled and measured. Performances of the packages are evaluated and discussed in detail on the basis of a series of S-parameter simulations and measurements. By compare with other packaging conditions, an improved module isolation and a suppressed cavity resonance are observed from passive measured results. Active measured results indicate that the package does not interfere with output power of the amplifier.

Key words: Artificial Magnetic Conductor(AMC); Electromagnetic Band Gap(EBG); Package; Resonance; Power amplifier

1 引言

近些年毫米波技术发展迅速,特别是以第3代氮化镓(GaN)材料为基础的单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)的应用,使得单个毫米波固态器件输出功率水平得到大幅提高。此外,由于半导体技术的进步,传统硅基工艺也不断突破晶体管截止频率的限制,使得硅基芯片在毫米雷达等领域得到广泛的关注^[1]。固态器件体积小、供电电压低以及可靠性高等特点在毫米波系统应用中的优势愈发凸显。

实际应用中,通常将固态功率单片与载体共晶焊后烧结到金属壳体上并封装在金属腔体中。一方

面,金属腔体封装可以起到对内部芯片物理保护的作用。另一方面,金属结构可以有效防止功率辐射,实现对外电磁屏蔽。此外,金属壳体优良的热传导特性可以为功率单片提供良好的散热通道。然而,随着工作频率的升高,金属封装可能会产生谐振和平行板模^[2-4]。这些平行板和腔体谐振模式会破坏封装内部器件的特性,且在功率单片输出输入之间形成电磁反馈通道,从而恶化腔体的隔离度。当这些反馈通道和功放芯片构成的闭环回路增益足够大时,放大器可能会有自激震荡产生,这不利于放大器稳定工作。通过合理选择芯片及电路的安装位置,一定程度上可以减少腔体谐振对电路单元的影响。然而,对于有源电路而言,难以在设计初期预见合适的安装位置,这种方法也会增加工程设计周期。通过在腔体内部使用微波吸收材料被证明是

收稿日期: 2019-10-16; 改回日期: 2020-05-24; 网络出版: 2020-07-14

*通信作者: 徐建华 xu_jh55suo@163.com

消除腔体谐振的有效手段。微波吸收材料通常具有高介电常数、高磁导率以及高损耗角正切，它可以将金属腔体中的电磁场集中到材料内部并损耗殆尽。但微波吸收材料会引入较高的功率和增益损耗，影响模块带内增益平坦度。此外，吸收体放置位置并没有最佳的判断依据，通常需要调试人员不断进行尝试。

为了避免使用微波吸收材料，人们提出了采用电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构来抑制腔体模式以及平行板模式。电磁带隙结构是一种人工制造具有周期性排列结构的理想磁导体(Perfect Magnetic Conductors, PMC)等效面，它可以在较宽的频带范围内截止电磁波的传播^[5]，电磁带隙结构已经被广泛用于波导^[6-9]、天线^[10-14]、模式抑制^[15-17]、同步开关噪声抑制^[18-20]。2009年，Kildal等学者^[6]将销钉型EBG结构应用于波导中。Brazalez和Iglesias等人^[16,17]从脊间隙波导(Ridge Gap Waveguide, RGW)设计原理出发，分别针对微带滤波器和微带传输线电路，利用销钉型EBG结构设计了新颖的封装结构，这些结构很大程度上改善了无源电路的性能，有效地抑制了腔体谐振模式的产生。

本文旨在研究金属销钉封装结构对于改善固态功率模块腔体隔离特性，提高毫米波固态功率放大器稳定性的可行性，为此在Ka波段设计了一款新颖封装结构的固态功率模块。通过理论分析、仿真设计与实验验证，对比了该封装与其他封装形式下功率模块的无源腔体隔离度特性以及有源输出功率特性。相应的测试结果表明该金属销钉封装结构可以在不影响功率模块输出功率的前提下，有效抑制腔体谐振模式，提高功率模块腔体隔离度。

2 固态功率模块设计

固态功率模块无源电路的设计工作频段为30~40 GHz，功率芯片选用南京电子器件研究所设计的一款氮化镓高功率芯片WFND330370-P41。芯片工作频率33~37 GHz，尺寸结构2.80 mm×3.40 mm×0.08 mm，标称输出功率42 dBm，芯片输入输出阻抗均已匹配到50 Ω。如图1所示为普通金属平板封装的固态功率模块模型，其结构上包括：输入输出波导、波导渐变过渡、波导弯头、波导到微带探针过渡结构、封装腔体。输入输出波导为标准矩形波导，工作频率为26.5~40.0 GHz，波导尺寸为7.12 mm×3.56 mm。渐变过渡结构实现标准矩形波导到减高矩形波导低反射传输，其中减高矩形波导尺寸为7.12 mm×2.50 mm。

波导到微带探针过渡结构将矩形波导中的 TE_{10}

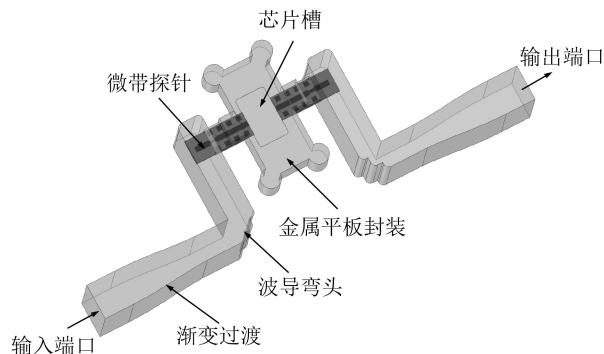


图1 传统金属平板封装Ka波段固态功率模块3维模型

模式变换为微带线准TEM模式，微带线输出阻抗为50 Ω。微带探针基板材料为石英，相对介电常数为3.78，基板厚度为0.254 mm。石英基板的优势是石英材质较为坚硬，微带加工精度高，探针固定方便。波导到微带探针过渡结构尺寸如图2所示，由Ansoft公司商业仿真软件(High Frequency Structure Simulator, HFSS)仿真优化得到各尺寸如下： $w_1=0.53$ mm, $w_2=0.29$ mm, $w_3=0.52$ mm, w_{sub} (石英探针宽度)=2.35 mm, $l_1=1.49$ mm, $l_2=0.65$ mm, $l_d=2.24$ mm, $R=0.5$ mm, $l_w=1.52$ mm, $h_w=0.9$ mm, $a=7.12$ mm。波导到微带探针过渡结构S参数结果如图3所示。可以看到，在30~40 GHz频段范围内，过渡结构端口反射系数小于-35 dB。

对于封装腔体，固态功率芯片与钼铜载体(载体厚度为0.2 mm)共晶焊后烧结在芯片安装槽内。芯片槽由载体大小决定，尺寸为2.9 mm×5.2 mm。芯片输入输出通过直径为25 μm键合金丝与微带探针实现电气互连。为了保证芯片输入输出焊盘与石英探针微带保持在同一水平面上，考虑到芯片烧结焊料引起的高度变化约为0.1 mm，芯片槽深度设计为0.1 mm。关于腔体封装的外形尺寸，将在第3节中具体讨论。

整个功率模块信号由标准矩形波导输入，经渐变过渡结构和波导弯头实现低反射传输后馈入到减高矩形波导，微带探针将波导中的电磁信号耦合至微带线并由固态功率芯片放大后经上述的逆过程输出。

3 金属销钉封装设计

Ka波段固态功率模块的销钉封装结构如图4所示。它是由上下间隔一定距离的金属平板腔体结构，与第1节中金属平板封装不同之处在于此处平行金属面一侧具有呈周期性分布的销钉阵列结构。该周期性销钉阵列构成的EBG结构具有表面波带隙以及同相反射带隙的奇特性质。与蘑菇型AMC结构类似，电磁波入射到销钉阵列结构中时，整个

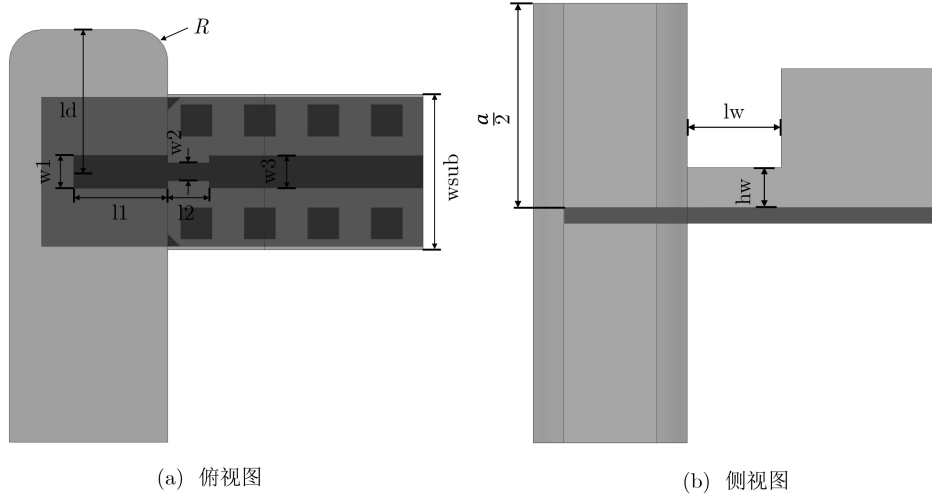


图2 波导到微带探针过渡尺寸

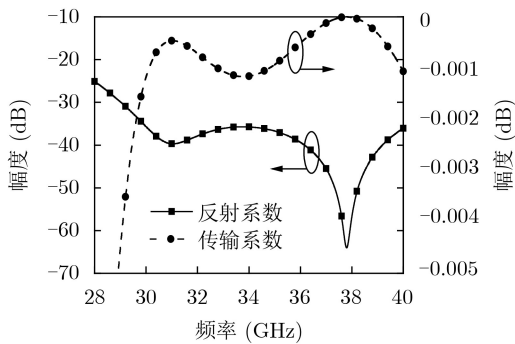


图3 波导到微带探针过渡结构S参数仿真结果

阵列结构等效电路模型可以看成是由电感和电容构成的并联谐振电路^[5]。当表面波的频率接近上述等效电路的谐振频率时，销钉阵列表面会表现出高阻抗特性。当电磁波频率小于谐振频率，销钉阵列表面表现为感抗而支持TM模表面波的传播。当电磁波频率大于谐振频率，销钉阵列表面表现为容抗而支持TE模表面波的传播。考虑平面波垂直入射的情形，当入射平面波的频率接近谐振频率时，由于金属销钉阵列表面阻抗远大于自由空间波阻抗，所

以入射波和反射波相位差将接近 0° 。此时，销钉阵列表面与PMC表面同样具有零相位反射特性^[21]。因此，金属平板上的周期性销钉表面将在一定频带范围内可以看成PMC表面且表现出高阻抗特性。该高阻抗表面(High Impedance Surface, HIS)与另一侧平行金属面构成HIS-PEC平行面波导，如图5所示。当HIS-PEC平行面波导之间的空气间隙高度 $<1/4$ 电磁波长时，HIS-PEC表面之间将在一定频带范围内截止任何方向上电磁波的传播^[6]。从而，对于图4所示腔体封装结构，销钉阵列将在截止频带内抑制腔体内部可能产生的平行板和谐振模式。

在阐述了销钉EBG封装抑制腔体谐振模式的基本原理后，本文首先需要确定金属销钉构成的HIS-PEC平行面波导的电磁截止频带。由于设计功率模块工作频率为30~40 GHz，因此平行面波导的截止频带应该尽量使得腔体的谐振模式远离上述功率模块工作频带。如图4所示，金属腔体的尺寸为 $L_{p1} \times W_{p1} \times H$ ， L_{p1} 和 W_{p1} 取决于芯片大小以及芯片外围偏置电路尺寸，最终确定腔体外形尺寸

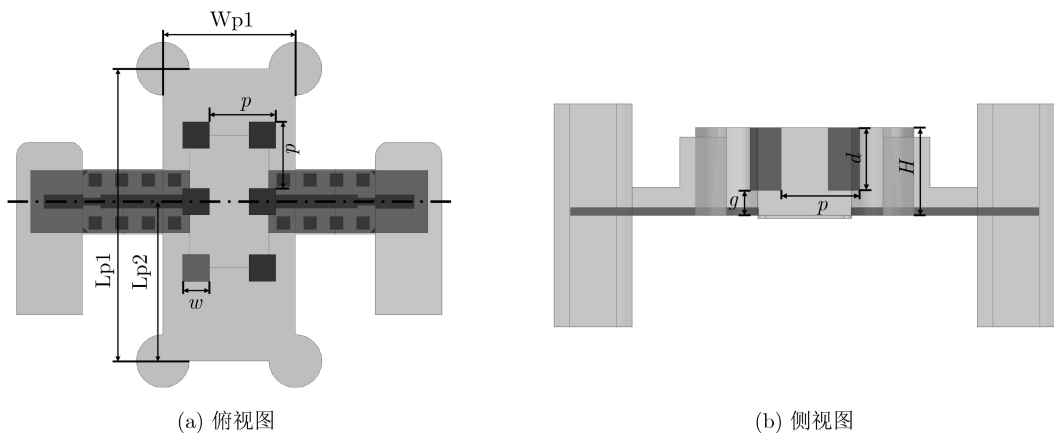


图4 Ka波段功放模块销钉封装结构

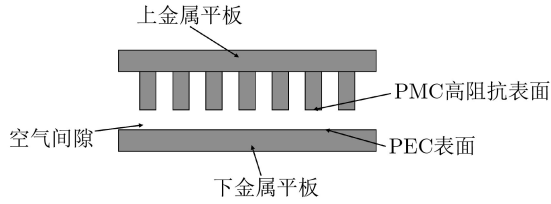


图5 销钉阵列平行面波导结构(剖面图)

为： $L_{p1}=11.0\text{ mm}$ ， $L_{p2}=6.0\text{ mm}$ ， $W_{p1}=5.0\text{ mm}$ 。金属腔高度 H 需要综合考虑空气间隙高度 g 和金属销钉高度 d 。销钉宽度 w 、周期 p 以及空气间隙高度 g 决定了设计所需的截止带宽。宽度 w 主要影响电磁阻带中心频率，增加 w 的尺寸，电磁阻带会向低频方向压缩。截止带宽的上限和下限频率则分别与金属销钉高度 d 和周期 p 有关。通常，金属销钉高度 $d\approx 1/4$ 波长，以 8 mm 波长为例，金属销钉的初始高度为 2 mm 。空气间隙 g 越小，电磁截止频带则越宽。考虑到间隙过小 g 时，金属销钉可能会有与功放模块内部键合金丝触碰而造成短路的危险。因此，空气间隙 g 必须预留一定的安全距离，这里安全距离取经验值 0.8 mm 。

利用电磁仿真软件HFSS进行优化设计，最终得到图4腔体封装各尺寸参数值如下： $g=0.8\text{ mm}$ ， $w=1.0\text{ mm}$ ， $p=2.5\text{ mm}$ ， $d=2.0\text{ mm}$ ， $H=2.8\text{ mm}$ 。图6为上述尺寸下图5所示无限大平行面波导结构色散曲线，其中一侧金属板具有周期性销钉分布。可以看到销钉阵列平行面波导形成的电磁阻隔频带为 $27.9\sim 47.7\text{ GHz}$ ，这一电磁阻带范围覆盖了功率模块的设计工作频带。然而，图6所得仿真结果对应的是理想情形下平行面波导，此时平行面波导由无限大金属平板和销钉阵列面构成。可以推测，当封装腔体足够大，销钉数量足够多时，上述电磁阻隔频带是适用封装腔体的。而功率模块实际使用的封装腔体，其上下金属面大小有限且金属销钉也为 2×3 的有限阵列。因此，还需要分析验证上述无限大平面条件下销钉阵列的电磁截止频带对于当前功率模块封装腔体是否仍然适用。

为此，本文直接仿真对比本征模条件下包含销

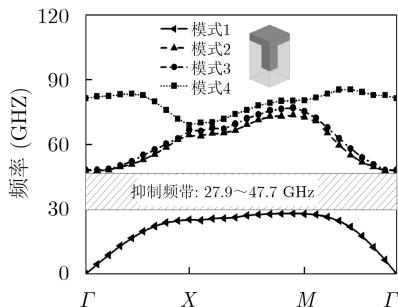


图6 无限大销钉阵列平行面波导结构色散曲线

钉阵列和不包含销钉阵列两种情形下封装腔体的谐振频率。由于矩形波导到石英微带探针过渡结构的开窗足够小，因此可以近似认为矩形波导内的电磁场被完全截止而不会通过开窗对封装腔体产生影响，所以封装腔体两侧边界取定为过渡结构开窗位置。表1所示为谐振频率仿真计算结果，仿真中设置的最小频率为 25 GHz ，频率由底到高依次得到6组谐振频率点。从表1中可以发现，对于不包含金属销钉阵列的封装腔体，其中一个谐振频点 31.8 GHz 落在了功放模块的工作频带内，这可能会造成后续功放模块产生自激振荡，而且 42.3 GHz 谐振频点距工作频带也较近。通过在封装腔体中增加销钉阵列，可以发现 31.8 GHz 和 42.3 GHz 频点的谐振模式消失。在上述截止频带 $27.9\sim 47.7\text{ GHz}$ 内，封装腔体的谐振模式得到了很好地抑制。而靠近截止频带的谐振频点分别为 27.9 GHz 和 49.8 GHz 。因此，上述理想情况下无限大平行面波导结构的电磁截止频带对于当前封装腔体仍然适用。

表1 封装腔体本征模谐振频率仿真结果(GHz)

包含销钉阵列	不含销钉阵列
25.1	31.8
25.5	42.3
26.7	52.8
27.5	54.6
49.8	56.4
52.5	57.7

4 仿真与测试

为了验证上述设计，本文对Ka波段功率模块进行了加工、装配以及测试。整个功率模块包括上盖板和下腔体两层结构，其中石英微带探针和功率芯片装配在下层腔体，金属销钉封装和金属平板封装区别只在于上层盖板有无销钉阵列。图7所示为Ka波段功率模块实物，其中图7(a)为装配了石英微带探针的下腔体结构以及上盖板结构，图7(b)为装配了功率芯片的下腔体结构。对于Ka波段功率模块，本文分别进行了无源隔离度测试和有源功率测试。此外，对比了普通金属平板封装、金属销钉封装以及在金属平板封装加入微波吸收体3种情形下的仿真与测试结果。功率模块 S 参数测试在安捷伦矢量网络分析仪下完成。

对图7(a)中装配了探针的Ka波段功率模块进行了腔体隔离度测试，仿真与测试数据如图8所示。对于无销钉结构的金属平板封装，仿真与测试数据吻合较好。可以观察到，在 31 GHz 频点附近有谐

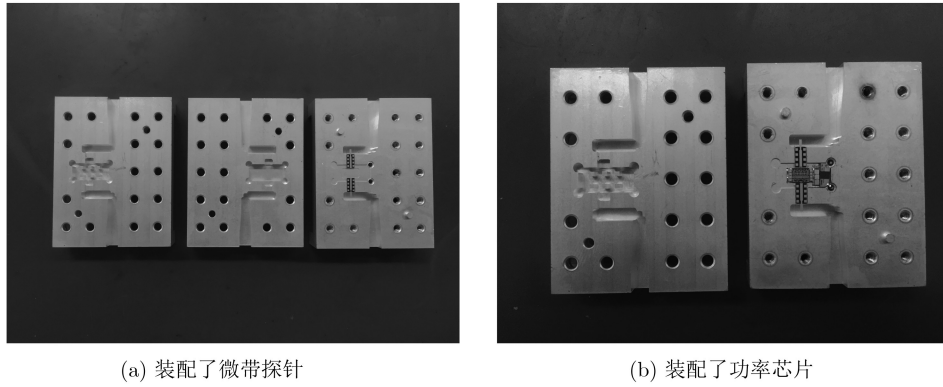


图7 Ka波段功率模块实物

振模式出现，功率模块隔离度显著恶化。测试中谐振模式出现的频点对比仿真数据有些许偏差，这可能是由于加工和装配误差造成。

当功率模块采用金属销钉封装结构时，对比金属平板封装，功率模块无源性能显著改善。上述改善体现在两个方面：一是在30~40 GHz频率频带范围内，功率模块隔离度明显提高。二是由于销钉EBG阻带特性，功率模块腔体谐振频率被向低频方向压缩而移到工作频带外。仿真得到的腔体谐振频率约为28.1 GHz，测试得到的谐振频率为29.2 GHz，测试和仿真谐振频率向低频方向压缩的程度有所不同。为此本文对金属销钉的高度 d 进行参数分析，得到的仿真结果如图9所示。可以发现，销钉EBG阻带下限频率对销钉高度较为敏感，销钉高度 d 越小，功放腔体谐振频率越大。当销钉高度 $d=1.9$ mm时，腔体谐振频率约为29.3 GHz，此时仿真曲线与图8中的测试数据较好吻合。由此，可以推断由于销钉高度的加工偏差(偏小)导致测试与仿真谐振频点的不同。

通过第3节，已知销钉EBG阻带频率为27.9~47.7 GHz，而仿真所得腔体谐振频率28.1 GHz落在了阻带范围内的。这有悖于EBG阻带内抑制电

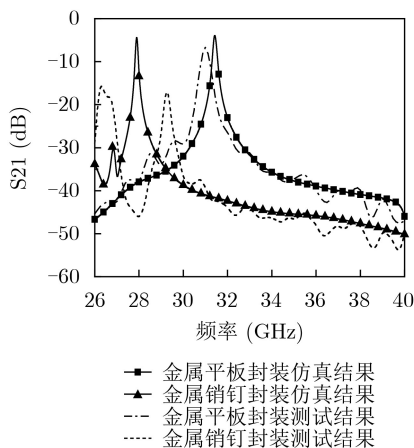


图8 装配了石英探针的功率模块S参数仿真与测试结果

磁波传播。造成这种现象的原因是由于色散曲线仿真并没有考虑封装腔体中芯片槽带来的影响。图10为考虑芯片槽时功率模块腔体隔离度仿真结果对比，可以发现不考虑芯片槽的腔体谐振频率约为27.9 GHz，这与销钉EBG阻带下限频率一致。

对于装配了芯片的功率模块，芯片、键合金丝以及外围偏置电路都可能会对封装腔体内的电磁场分布产生影响。为了进一步验证此时金属销钉封装对于腔体谐振模式的抑制效果，本文对图7(b)所示的Ka波段功率模块进行了无源隔离度测试，测试结果如图11所示。可以看到，使用吸收体可以明显改善谐振频点附近隔离度，但对其他工作频点隔离度改善有限，只有约数个分贝。对于吸收体和金属平板封装，功率模块隔离度频响曲线起伏波动大，

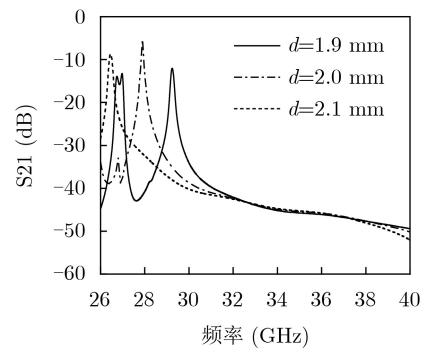


图9 金属销钉高度 d 参数扫描仿真结果

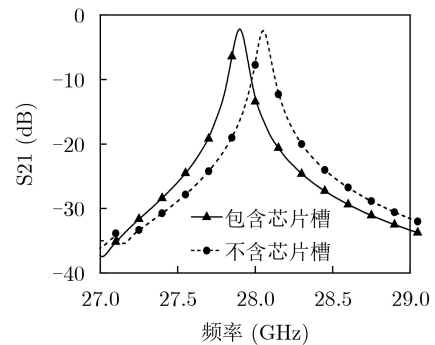


图10 包含芯片槽和不含芯片槽腔体S参数仿真结果

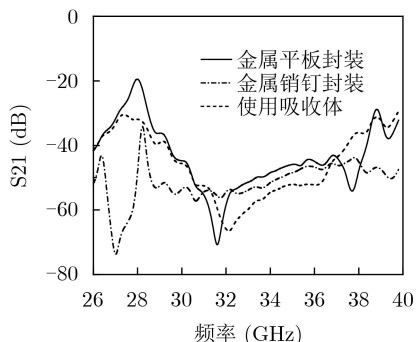


图 11 Ka波段功率模块S参数测试结果

且高频方向隔离度有恶化的趋势。当功率模块采用带销钉封装，抑制频带(29.2~40 GHz)内的功放模块隔离度频响曲线平坦且光滑。30~40 GHz工作频率范围内，功放模块隔离度大于45 dB。

对Ka波段功率模块进行了有源功率测试。通过漏极调制，功率模块工作脉冲状态。在10 kHz脉冲重频，10%脉冲周期的测试条件下，3种封装对应功率模块的饱和输出功率如图12所示。测试结果表明，功率模块对应3种封装环境下的饱和输出功率在33~37 GHz频率范围内基本一致，使用了吸收体的功率模块输出功率较金属销钉封装和金属平板封装在个别频点略小0.1 dB。

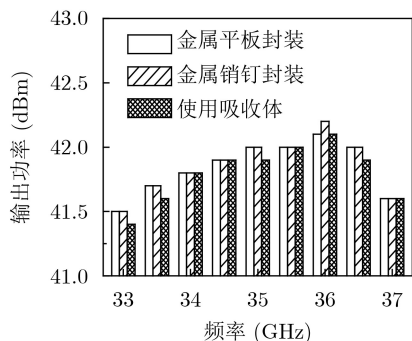


图 12 3种封装下Ka波段功率模块饱和输出功率测试结果

5 结束语

本文基于销钉EBG结构的宽电磁阻带特性，在Ka波段设计了一种新型封装结构的固态功率模块。理论上金属销钉封装可以抑制一定频带范围内功率模块腔体谐振模式以及电路不连续性造成的功率辐射。为了验证金属销钉封装结构对固态功率模块性能带来的改善。本文对该固态功率模块进行了实物加工和测试。测试结果和仿真分析达到了较好的一致性。无源测试结果表明在电磁阻带内，金属销钉封装可以显著提高功率模块腔体隔离度，抑制腔体谐振发生。有源测试结果则表明金属销钉封装对功率模块输出功率不会产生影响。

本文所提金属销钉封装结构简单，易于设计和加工。该封装结构一定程度上消除了功率模块的自激隐患，同时避免了吸收体对功率模块引入的功率和增益损耗，使得固态功率模块设计更加简单且有效。

参考文献

- [1] 贾海昆, 池保勇. 硅基毫米波雷达芯片研究现状与发展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 173-190. doi: [10.11999/JEIT190666](https://doi.org/10.11999/JEIT190666).
- [2] JIA Haikun and CHI Baoyong. The status and trends of silicon-based millimeter-wave radar SoCs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(1): 173-190. doi: [10.11999/JEIT190666](https://doi.org/10.11999/JEIT190666).
- [3] DIXON P. Cavity-resonance dampening[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2005, 6(2): 74-84. doi: [10.1109/MMW.2005.1491270](https://doi.org/10.1109/MMW.2005.1491270).
- [4] WILLIAMS D F. Damping of the resonant modes of a rectangular metal package (MMICs)[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1989, 37(1): 253-256. doi: [10.1109/22.20046](https://doi.org/10.1109/22.20046).
- [5] KUANG Ken, KIM F, and CAHILL S S. RF and Microwave Microelectronics Packaging[M]. Boston: Springer, 2010: 3-19. doi: [10.1007/978-1-4419-0984-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0984-8).
- [6] SIEVENPIPER D, ZHANG Lijun, BROAS R F J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2059-2074. doi: [10.1109/22.798001](https://doi.org/10.1109/22.798001).
- [7] KILDAL P S, ALFONSO E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 84-87. doi: [10.1109/LAWP.2008.2011147](https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.2011147).
- [8] EBRAHIMPOURI M, RAJO-IGLESIAS E, SIPUS Z, et al. Cost-effective gap waveguide technology based on glide-symmetric holey EBG structures[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(2): 927-934. doi: [10.1109/TMTT.2017.2764091](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2764091).
- [9] BAYAT-MAKOU N and KISHK A A. Realistic air-filled TEM printed parallel-plate waveguide based on ridge gap waveguide[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(5): 2128-2140. doi: [10.1109/TMTT.2018.2811487](https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2811487).
- [10] AHMADI B and BANAI A. Substrateless amplifier module realized by ridge gap waveguide technology for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(11): 3623-3630. doi: [10.1109/TMTT.2016.2607177](https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2607177).
- [10] ALI M M M and SEBAK A. Printed RGW circularly polarized differential feeding antenna array for 5G

- communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3151–3160. doi: [10.1109/TAP.2019.2900411](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2900411).
- [11] DABAS T, GANGWAR D, KANAUIA B K, *et al.* Mutual coupling reduction between elements of UWB MIMO antenna using small size uniplanar EBG exhibiting multiple stop bands[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2018, 93: 32–38. doi: [10.1016/j.aeue.2018.05.033](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.05.033).
- [12] JAM S and SIMRUNI M. Performance enhancement of a compact wideband patch antenna array using EBG structures[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2018, 89: 42–55. doi: [10.1016/j.aeue.2018.03.026](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.03.026).
- [13] VOSOOGH A, SORKHERIZI M S, ZAMAN A U, *et al.* An integrated ka-band diplexer-antenna array module based on gap waveguide technology with simple mechanical assembly and no electrical contact requirements[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(2): 962–972. doi: [10.1109/TMTT.2017.2757469](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2757469).
- [14] 王彦虎, 廖永波, 付晨阳. 新型电磁材料结构的微带天线设计[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(1): 98–100, 104. doi: [10.13873/J.1000-9787\(2017\)01-0098-03](https://doi.org/10.13873/J.1000-9787(2017)01-0098-03).
WANG Yanhu, LIAO Yongbo, and FU chenyang. Design of microstrip antenna based on novel electromagnetic material structure[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(1): 98–100, 104. doi: [10.13873/J.1000-9787\(2017\)01-0098-03](https://doi.org/10.13873/J.1000-9787(2017)01-0098-03).
- [15] BARTH S and IYER A K. A miniaturized uniplanar metamaterial-based EBG for parallel-plate mode suppression[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(4): 1176–1185. doi: [10.1109/TMTT.2016.2532870](https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2532870).
- [16] BRAZALEZ A A, ZAMAN A U, and KILDAL P S, *et al.* Improved microstrip filters using PMC packaging by lid of nails[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(7): 1075–1084. doi: [10.1109/TCPMT.2012.2190931](https://doi.org/10.1109/TCPMT.2012.2190931).
- [17] RAJO-IGLESIAS E, ZAMAN A U, and KILDAL P S. Parallel plate cavity mode suppression in microstrip circuit packages using a lid of nails[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, 20(1): 31–33. doi: [10.1109/LMWC.2009.2035960](https://doi.org/10.1109/LMWC.2009.2035960).
- [18] 史凌峰, 王海鹏. 一种扩展蘑菇型EBG结构阻带带宽的新方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(10): 2537–2540. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00141](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00141).
SHI Lingfeng and WANG Haipeng. Novel method to broaden the stop-band width of the mushroom-like electromagnetic band gap structure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2537–2540. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00141](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00141).
- [19] 陈朋, 汝岩, 廖立科. 一种适用于同步开关噪声抑制的共面电磁带隙新结构[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(11): 2775–2780. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01987](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01987).
CHEN Peng, RU Yan, and LIAO Like. A novel planar electromagnetic band-gap structure for SSN suppression[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2775–2780. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01987](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01987).
- [20] JOO S H, KIM D Y, and LEE H Y. A S-bridged inductive electromagnetic bandgap power plane for suppression of ground bounce noise[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(10): 709–711. doi: [10.1109/LMWC.2007.905604](https://doi.org/10.1109/LMWC.2007.905604).
- [21] 闫敦豹. 人工磁导体结构及其应用研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2006: 43–72.
YAN Dunbao. Study on artificial magnetic conductors and applications[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006: 43–72.
- 孙健健: 男, 1993年生, 硕士, 研究方向为微波毫米波电路。
徐建华: 男, 1977年生, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路。
成海峰: 男, 1983年生, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路。
祝庆霖: 男, 1989年生, 工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路。
韩 煦: 男, 1985年生, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路。

责任编辑: 马秀强