

# 基于表面扫描法的 SiP 器件近场电磁辐射测试方法

高 成<sup>1</sup>, 李 维<sup>1</sup>, 梅 亮<sup>2</sup>, 林辰正<sup>1</sup>, 黄姣英<sup>1</sup>

(1.北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191; 2.航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

**摘要:** 在近场电磁辐射测试研究中, 还没有一套完整的面向单个元器件的测试方法。针对此问题, 基于表面扫描法对 SiP 器件的近场电磁辐射测试方法进行研究。第一, 利用 X 光研究 SiP 器件内部结构并进行干扰源分析; 第二, 完成硬件、软件层搭建使器件进入工作状态; 第三, 搭建近场测试系统, 对工作中的器件实施近场测试。在案例研究中, 所用 SiP 器件内部封装外围器件和作为主要干扰源的处理器。近场测试结果显示, PCB 上辐射主要集中在 SiP 器件周围, 器件近场辐射集中在处理器芯片处。案例研究的结果说明这种测试方法可以有效测量 SiP 器件的近场电磁辐射, 并对器件内干扰源进行分析。

**关键词:** 系统级封装; 电磁辐射; 表面扫描法; 近场扫描测试

中图分类号: TN407

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212395

中文引用格式: 高成, 李维, 梅亮, 等. 基于表面扫描法的 SiP 器件近场电磁辐射测试方法[J]. 电子技术应用, 2022, 48(7): 54–59.

英文引用格式: Gao Cheng, Li Wei, Mei Liang, et al. Near-field electromagnetic radiation test method of SiP device based on surface scanning method[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(7): 54–59.

## Near-field electromagnetic radiation test method of SiP device based on surface scanning method

Gao Cheng<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1</sup>, Mei Liang<sup>2</sup>, Lin Chenzheng<sup>1</sup>, Huang Jiaoying<sup>1</sup>

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. China Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China)

**Abstract:** In the research of near-field electromagnetic radiation test, there is no complete set of test methods for individual components. Aiming at this problem, a near-field electromagnetic radiation test method for System in Package(SiP) devices is researched based on surface scanning method. Firstly, the internal structure of the SiP device is researched by X-ray and the source of interference is analyzed. Secondly, the hardware and software layer is built to make the device work. Thirdly, a near-field testing system is built to implement near-field test of DUT. In the case research, the SiP device used is encapsulated with peripherals and a processor which is the main interference source. The near-field test results show that the radiation on PCB is mainly concentrated around SiP device, and the near-field radiation of device is concentrated at processor chip. Case research results show that this kind of test method can effectively measure the SiP device of near field electromagnetic radiation, and analyze the interference sources inside the device.

**Key words:** System in Package(SiP); electromagnetic radiation; surface scanning method; near field scanning test

### 0 引言

21 世纪后的电子产品都在追求一个相同的目标: 便携、轻薄。这对现代半导体设备的轻量小型化、综合化<sup>[1]</sup>以及高可靠性提出了更高的要求, 如何在这方面取得突破也成为微系统领域的一个研究热点<sup>[2]</sup>。但技术发展同时也暴露出许多问题: 光刻技术受限; 散热、漏电问题; 高集成度影响芯片性能; 成本问题<sup>[3]</sup>等。因此研究者们开始着眼于封装技术, 如系统级封装(System in Package, SiP)。它是指多个有源器件的组合, 这些功能不同的器件被组装在一个单元中, 单元提供系统或子系统功能<sup>[4-9]</sup>。

这种具有 3D 封装特色的封装方案<sup>[10]</sup>不仅极大程度缩减封装体积, 还具有开发周期短、低成本、低功耗、高性能的优点, 能提高生产效率, 简化系统开发, 提升开发弹性与灵活度, 降低供应链管理难度, 这也使 SiP 器件在宇航、武器装备、可穿戴设备以及物联网等领域里得以广泛应用<sup>[7-8, 11-15]</sup>。

SiP 技术不断发展, 频率较低的频谱资源逐渐无法满足人们的使用需求, SiP 器件的工作频率越来越高, 过程集成技术不断进步, 其内部更高的开关速度和更复杂的电路增加了产生的电磁发射量, 这也带来了电磁环境干

扰的问题<sup>[16]</sup>, 电路中的部分走线在波长相近时可能会形成“天线”, 产生电磁辐射耦合<sup>[17]</sup>。例如在医疗领域, 高频手术刀、微波设备等精密仪器如果受到电磁辐射影响, 后果不堪设想。鉴于电磁辐射干扰造成的不良影响, 国际社会越来越关注电磁辐射干扰问题。迄今几乎每一个国家都有一套针对自己国家市场内电子产品的 EMC 电磁兼容标准, 只有通过了相应国家的电磁兼容检测, 电子设备才能进入市场<sup>[18]</sup>。

电磁辐射看不见、摸不着, 必须借助于一定的仪器设备、测试技术来获得对它的量的认识。在近场区, 磁场和电场强度大小没有一个确定的相关关系, 近场区的电场、磁场强度远大于远场区, 从这个角度来看, 电磁辐射问题的关注重点应在近场区。在电磁辐射问题的众多研究技术中, 近场扫描技术由于其方便简单、精度高、测量系统对测试环境具有高可操作性的特点<sup>[19]</sup>, 故得以广泛应用。

根据测试方法来分, 目前近场电磁辐射测试手段主要分为两种: 其一是通过电子开关控制阵列天线, 这种方法扫描速度快, 扫描一次就能得到电路板的近场电磁辐射信息, 例如加拿大 EMSCAN 公司的 EMxpert 系统, 将被测设备放置在由 1 280 个探头组成的扫描板上, 扫描板连接到频谱仪、计算机, 显示出扫描板探测的电磁辐射<sup>[20]</sup>; 其二是利用测量探头连接至频谱仪进行机械扫描测试, 这种方法可用机器控制探头, 也可由测试人员手动移动探头进行扫描测试, 例如德国 Langer EMV 公司推出的 FLS-106 系统, 采用单个探头的扫描测量, 探头连接至频谱仪进行数据收集、分析。这种方法虽然覆盖频率范围广, 使用灵活, 但是不同情况下要频繁地更换探头<sup>[21-23]</sup>。

这些方法目前对电磁辐射的研究大多停留在 PCB 板级, 对单个器件的测试研究较少。在过去, 大部分情况下都是由一块安装了各类元器件的 PCB 板来实现系统功能。而如今, SiP 技术的出现与发展使得在更多情况下, 系统功能通过单个 SiP 器件来完成<sup>[24]</sup>。因此, 对于单个 SiP 器件的近场电磁辐射测试研究必不可少。近年来, 虽然国际电工委员会相继发布 IEC 61967 和 IEC 62132 标准, 但是我国尚未建立完善的相应测试国家标准, 相关技术、文档等尚未成熟<sup>[25-26]</sup>, 再加上电子产品电磁辐射测试的设计难度、试验场地等问题的存在<sup>[27]</sup>, 因此本文主要参考 IEC61967 系列标准, 基于表面扫描法, 对 SiP 器件的近场电磁辐射测试方法进行研究, 并进行了实例测试。

## 1 SiP 器件近场电磁辐射测试

### 1.1 基于表面扫描法的近场测试方法

将 X 光扫描技术和近场扫描技术相结合, 通过对 SiP 器件进行电磁辐射发射测试, 对表面扫描法进行了研究, 提出了一套基于表面扫描法的针对 SiP 器件近场电磁辐射测试方法, 如图 1 所示。

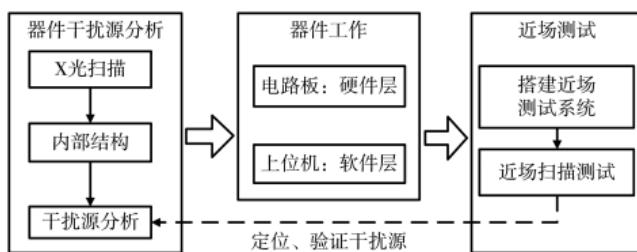


图 1 测试方法示意图

(1) 通过 3D-X 光扫描技术对器件进行扫描, 结合 SiP 器件的原理图研究其内部结构与模块划分, 分析器件内部可能的干扰源。

(2) 通过硬件层、软件层的搭建, 使器件进入工作状态。

(3) 搭建近场测试系统, 制定完善的测试方案, 对器件在不同工作状态下进行电磁辐射近场测试, 测试时先进行电路板级的扫描, 再进行器件级扫描, 遵循“从整体到局部”的原则。依据干扰幅度与传播距离成反比的原则<sup>[28]</sup>, 定位和验证电磁辐射干扰源, 评估电磁辐射干扰大小。

### 1.2 测试系统的搭建

本文主要参考 IEC61967 系列标准。根据测试标准 IEC61967-3, 电磁辐射近场测试系统主要由测量探头组、机械扫描仪、前置放大器、EMI 接收机以及上位机组成<sup>[29]</sup>, 搭建的近场测试系统如图 2 所示。

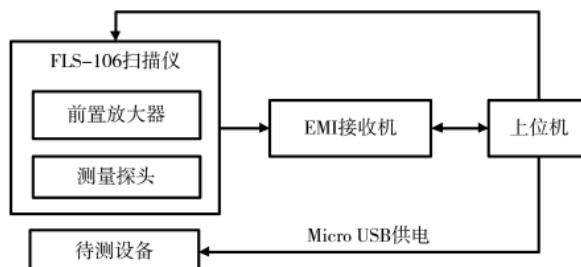


图 2 近场测试系统结构示意图

首先在上位机中安装 FLS-106 扫描仪的控制软件 ChipScan-Scanner, 安装必要的驱动程序。然后将扫描仪通过 USB 线与上位机连接。前置放大器的安装位置在扫描仪上方机械臂上, 机械臂侧边有标有 PA 标志的接口, 放大器电源输入接入 12 V 接口。探头安装在机械臂固定台上后通过线缆与放大器相连。EMI 接收机的输入口与扫描仪的输出口通过射频线缆连接, 再将接收机通过网线接口与上位机连接。除了这些信号传输线缆连接之外, 还有电源线的连接。

出于安全考虑, 引出的急停开关与扫描仪后端接口之间的线缆连接要确保稳固, 在实验时, 急停开关要确保放在能够让操作人员快速触及的位置。待测设备由一根 Micro USB 数据线直连供电。

其中,电磁辐射信号在测试系统中的传输路径与过程如图3所示,电磁辐射信号首先产生于待测设备SiP器件,然后被近场扫描探头捕捉,随后经过前置放大器放大,经过射频线缆传输到EMI接收机进行缩小还原,最后再传输到上位机软件进行分析、显示。



图3 电磁辐射信号传输路径

## 2 案例研究

### 2.1 测试对象

选取的测试对象为ESP32-PICO-D4系统级封装模组,样品尺寸为7.000 mm×7.000 mm×0.940 mm,内部封装ESP32芯片以及所有外围器件,主要功能是Wi-Fi/蓝牙连接及数据处理,主要工作频率在2.4 GHz附近。通过X光机扫描获得其3D-X光照片,如图4(a)所示,其简化后的内部示意图如图4(b)所示。

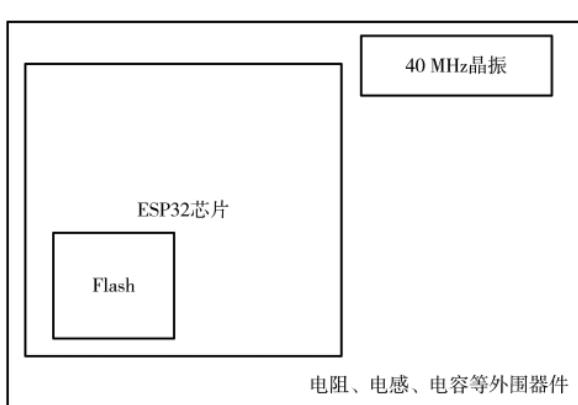
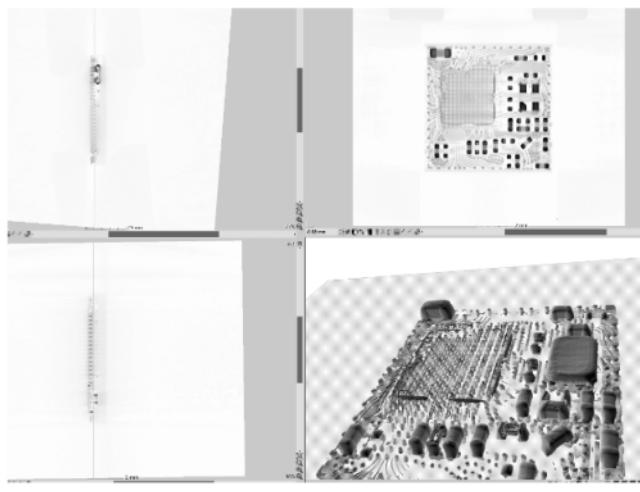


图4 ESP32-PICO-D4 模组

位于器件左上角的是内置的ESP32芯片,该芯片被埋置在基板中,并且能看到从管脚引出的键合丝与其他外围器件连接。在右侧基板上有一个比较大的4管脚芯片,其余为电阻、电容等外围器件。结合电路常见干扰源分析,该模组内部主要干扰源为ESP32芯片,其内部包括蓝牙模块和Wi-Fi模块,这两个模块在工作时会发射频段高至2.4 GHz的射频电磁辐射。在实例测试中用到的测试电路板如图5所示。

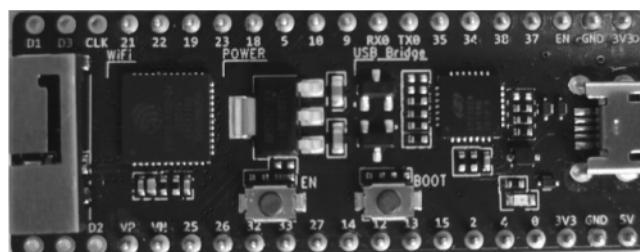


图5 测试电路板实物图

### 2.2 测试参数配置

在测量时,应遵循“从大范围到小范围,从整体到局部”的扫描逻辑,先对整个电路板进行大范围低分辨率的快速扫描,再针对电磁辐射比较强的地方进行小范围高分辨率的扫描测试。测试参数配置如表1所示。

表1 测试参数设置

项目	电路板级	器件级(电场)	器件级(磁场)
扫描空间范围/mm <sup>3</sup>	30×55×0	30×15×0	30×15×0
扫描点间距/mm <sup>3</sup>	2×2×0	0.5×0.5×0	1×1×0
测点数量	448	1 891	496
探头高度	距离芯片表面2 mm		
使用探头	XF E10、 XF B3-1、 XF R3-1	XF E10	XF B3-1、 XF R3-1

### 2.3 测试结果分析

#### 2.3.1 蓝牙发射工作状态下的电路板级扫描

通过硬件、软件两个层次的准备使器件进入工作状态,在蓝牙发射工作状态下进行近场扫描测试。先进行整个电路板级别的扫描,分别测试近场电场、近场X轴方向/Y轴方向/Z轴方向磁场,并对4种测试结果进行比较。板级扫描结果如图6所示。

从测量结果可以看出,电场强度最高达到了90.8 dB,磁场强度最高达到81.6 dB,并且在SiP器件附近出现了明显的高场强聚集点,说明电路板上主要的电磁辐射来源于工作中的SiP器件。此SiP器件为塑封器件,并没有金属外壳的电磁屏蔽效果,因此产生的电磁辐射大量泄露到外界。

#### 2.3.2 蓝牙发射工作状态下的器件级扫描

根据电路板级的扫描结果,可以将电路板上电磁辐

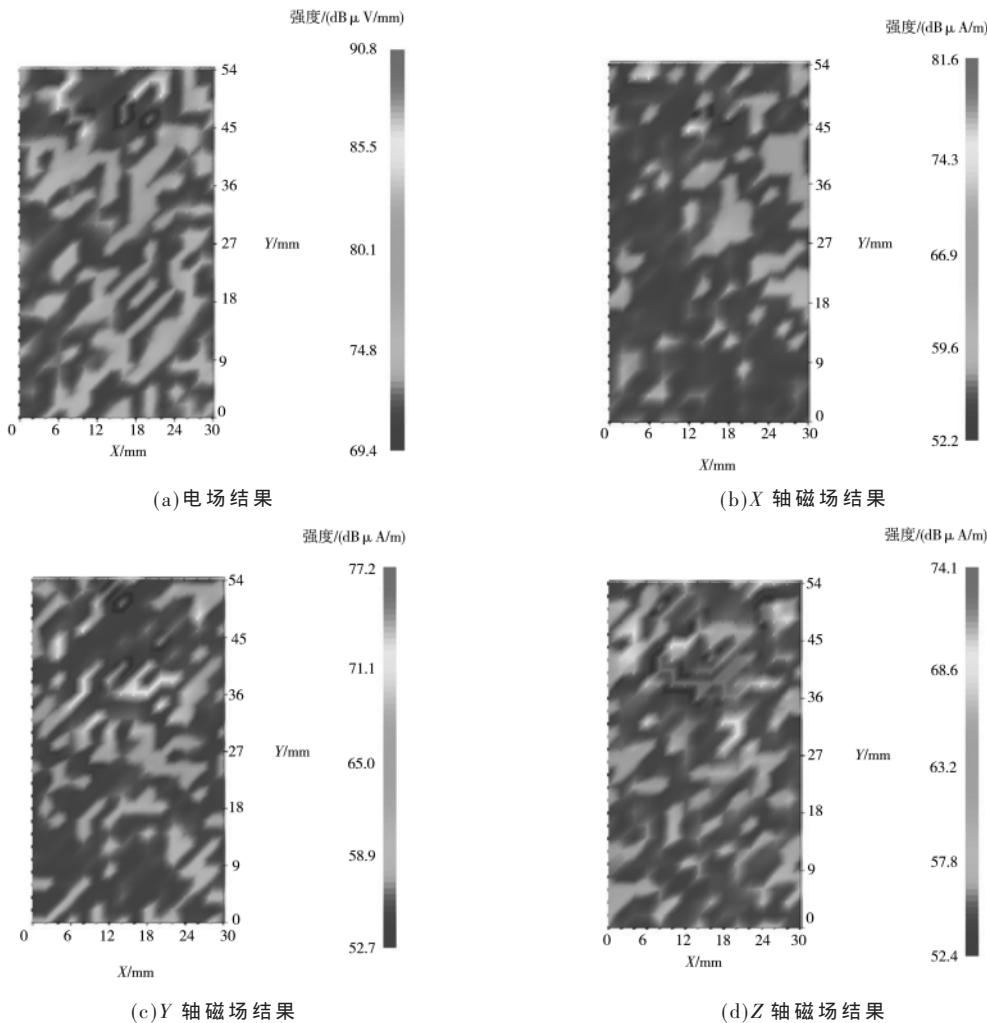


图 6 蓝牙发射状态板级扫描结果

射主要的干扰源定位到工作状态下的 SiP 器件附近,再对这些场强比较高的区域即 SiP 器件附近进行小范围高精度的扫描测试,测试结果如图 7 所示。

从测试结果可以看出,SiP 器件的电磁辐射分布主要集中在器件的左上角,电场最大发射值达到了 90.8 dB,磁场最大发射值达到了 78.0 dB。并且每一个测试结果点都有对应的全频带频谱波形,如图 8 所示。

图 8 是图 7 中电场扫描结果中峰值点的频谱波形,电磁辐射基本集中在 2.4 GHz,与蓝牙的工作频率吻合。结合之前拍摄的 3D-X 光照片可知,左上角辐射较强的区域恰好与器件内部封装的 ESP32 芯片重合,这与之前分析的 ESP32 芯片为主要干扰源相吻合。

此次近场测试中电磁辐射发射比较集中,主要集中在干扰源 ESP32 芯片附近,并且由于此 SiP 器件封装并没有金属外壳,因此并没有多少对电磁辐射的屏蔽效果,可能会对电路板上其他元器件造成电磁干扰。

### 3 结论

本文通过对 SiP 器件进行电磁辐射发射测试,对表面扫描法进行了研究,并结合 3D-X 光扫描技术提出了

一套针对 SiP 器件的电磁辐射近场测试方法:(1)结合 X 光照片研究对象器件的内部结构、模块划分,分析器件内电磁辐射干扰源;(2)通过硬件层、软件层两个层次的搭建,使器件进入工作状态;(3)搭建近场测试系统,对不同工作状态下的器件进行电磁辐射近场测试,测试时先进行电路板级的扫描,再进行器件级扫描,遵循“从整体到局部”的原则。并定位和验证电磁辐射干扰源,评估电磁辐射干扰大小。

通过对某型 SiP 器件进行案例测试验证,可以认为这一套方法对于近场电磁辐射发射的测试是行之有效的。在后续有两点可以继续深入研究:(1)在近场电磁辐射测试中,由于器件功能、功率以及探头扫描频率的限制,并未对所有可能导致辐射发射的因素(如同步开关噪声、逻辑门数量等)进行验证;(2)研究电子元器件抗电磁辐射干扰的能力评估方法。

### 参考文献

- [1] 陆玉芳,庄奕琪,吴旋辉.基于 SIP 概念的电气控制组合设计与实现[J].电子技术应用,2019,45(6):113-119.
- [2] 莫郁薇,张增照,古文刚,等.多芯片组件 MCM 的失效率

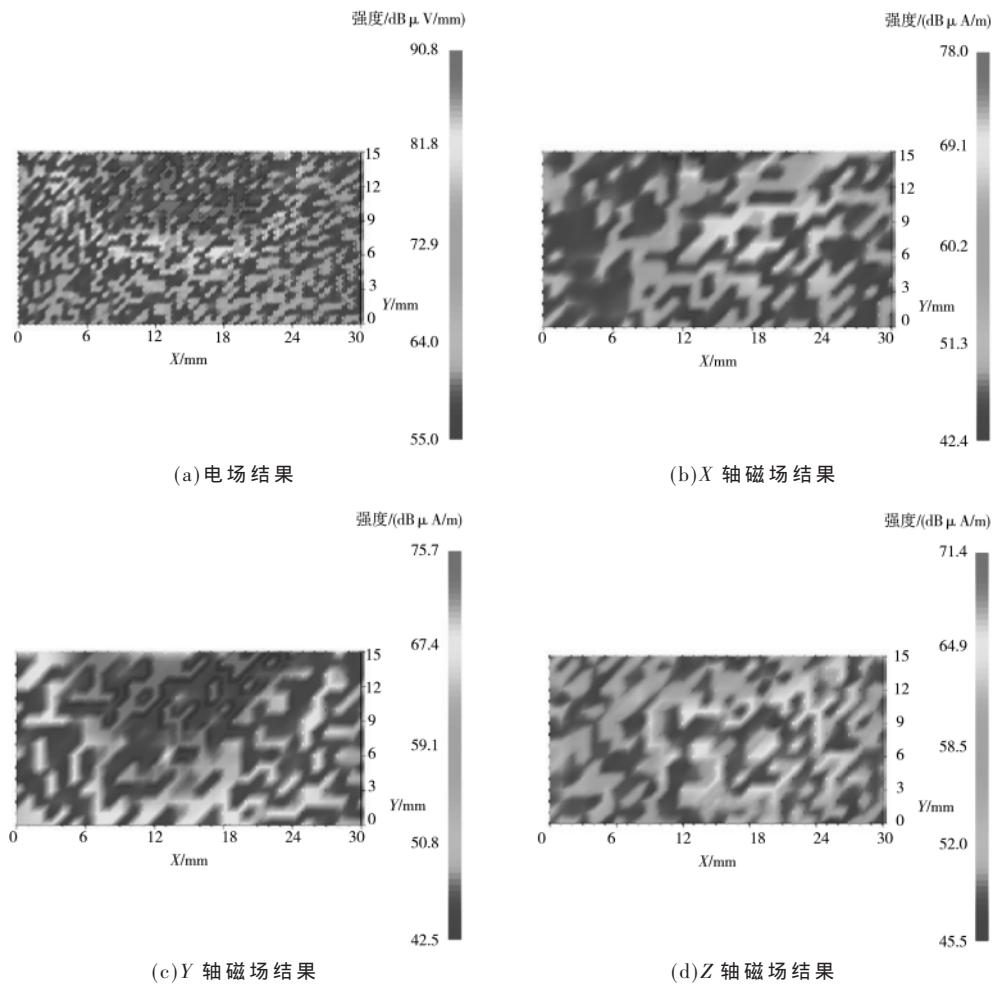


图 7 蓝牙发射状态器件级扫描结果

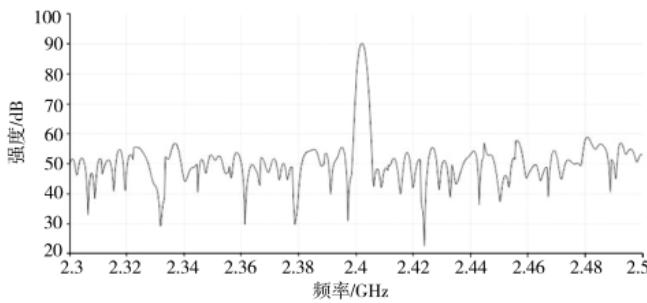


图 8 测点频谱分析结果

- 预计研究[J].半导体技术,2006(3):203-206.
- [3] 逢健,刘佳.摩尔定律发展述评[J].科技管理研究,2015,35(15):46-50.
- [4] 汪鑫,刘丰满,吴鹏,等.Ka-K 波段收发模块的 3D 系统级封装(SiP)设计[J].微电子学与计算机,2017,34(8):113-117.
- [5] 刘鸿瑾,李亚妮,刘群,等.系统级封装(SiP)模块的热阻应用研究[J].电子与封装,2021,21(5):16-19.
- [6] 张小龙,龚科,李文琛,等.宇航用系统级封装产品可靠性设计综述[J].质量与可靠性,2019(6):17-21.

- [7] 周晓阳.先进封装技术综述[J].集成电路应用,2018,35(6):1-7.
- [8] 陆燕菲.集成电路封装技术现状分析与研究[J].电子技术,2020,49(8):8-9.
- [9] 方芝清,唐高弟,吕立明,等.基于硅基 IPD 技术的新型 S 波段带通滤波器设计[J].半导体技术,2018,43(5):347-352.
- [10] 李扬.3D 设计技术在 SiP 中的应用[J].电子技术应用,2018,44(9):39-43.
- [11] 胡杨,蔡坚,曹立强,等.系统级封装(SiP)技术研究现状与发展趋势[J].电子工业专用设备,2012,41(11):1-6,31.
- [12] 唐宇,廖小雨,骆少明,等.基于 CPU 和 DDR 芯片的 SiP 封装可靠性研究[J].电子元件与材料,2015,34(4):79-83.
- [13] 李扬.SiP 系统级封装设计仿真技术[J].电子技术应用,2017,43(7):47-50,54.
- [14] 田德文,孙昱祖,宋青林.系统级封装的应用、关键技术与产业发展趋势研究[J].中国集成电路,2021,30(4):20-35.

- [15] 陈悦,周晓宁,季秀霞.SIP 技术的发展与应用[J].印制电路信息,2015,23(9):51-53.
- [16] 向云秀,覃开宇.汽车电磁兼容:标准、现状、措施与建议[J].磁性材料及器件,2011,42(4):10-13,36.
- [17] 何雨昂,李超,李光学,等.大功率电子设备电磁兼容试验[J].电子技术与软件工程,2019(11):101.
- [18] 刘玉欣,李殿来,杨明武.一种用于测量电场法向分量的近场探针[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(1):78-81.
- [19] 林辰正,高成,黄姣英.浅析集成电路辐射抗扰度测试方法[J].电子测量技术,2021,44(14):51-58.
- [20] ARCHAMBEAULT B.Predicting EMI emission levels using EMSCAN[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.IEEE,1992.
- [21] 苏桃,田梦倩,王庆祥.PCB 电磁辐射的仿真分析与优化[J].电子器件,2014,37(4):605-608.
- [22] FUNATO H,SUGA T,SUHARA M.Double position-signal-difference method for electric near-field measurement[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.IEEE,2013:621-625.
- [23] 路宏敏,朱满座,刘鹏程.测量印刷电路板近场电磁辐射的一种新方法[J].电子科技,1996(4):54-55.
- [24] 王福鑫,国凤娟,牛玉成,等.基于 SiP 技术的微系统设计与实现[J].电子技术应用,2018,44(12):17-19,24.
- [25] ZHANG H,WU J,WU P,et al.Research on NFS test method of an embedded CPU[C]//2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits(EMC Compo),Hangzhou,China:IEEE,2019:153-155.
- [26] 惠建峰,关志成,刘瑛岩.各国工频电磁场的限值及其确定的依据[J].高电压技术,2006(4):51-54,64.
- [27] 李宝云,钱宏文,侯伟盟.一种辐射发射近场测试系统方案的设计与优化[J].安全与电磁兼容,2021(3):95-97.
- [28] 董荻莎,许明明.电磁辐射干扰诊断的近场测试方法及应用[J].安全与电磁兼容,2020(6):103-106.
- [29] IEC 61967-3,TS,Ed.1:integrated circuits-measurement of electromagnetic emissions,150 kHz to 1 GHz-Part 3:measurement of radiated emissions-surface scan method[S].IEC,2002.

(收稿日期:2021-11-29)

**作者简介:**

高成(1973-),男,博士,教授,主要研究方向:大规模集成电路测试、可靠性评价。

李维(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向:电子元器件和集成电路测试。

梅亮(1987-),男,高级工程师,主要研究方向:元器件可靠性评价评估、元器件国产化替代及应用验证、寿命评估等。



扫码下载电子文档

(上接第 53 页)

- [6] 易志刚.分析通信工程中光纤技术的设计应用及展望[J].产业技术创新,2019,1(18):53-54.
- [7] 崔秀国,刘翔,操时宜,等.光纤通信系统技术的发展、挑战与机遇[J].电信科学,2016,32(5):34-43.
- [8] 谢崇进.数据中心光通信技术[J].电信科学,2016,32(5):44-51.
- [9] QI N,XIAO X,HU S,et al.Co-design and demonstration of a 25-Gb/s silicon-photonic mach-zehnder modulator with a CMOS-based high-swing driver[J].IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,2016,22(6):131-140.
- [10] RITO P,LOPEZ I G,PETOUSI D,et al.A 40 Gb/s 4 Vpp IQ modulator driver in 0.13 μm SiGe:C BiCMOS technology for 25 Ω Mach-Zehnder modulator[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2015,64(12):4561-4572.
- [11] ZANDIEH A,SCHVAN P,VOINIGESCU S P.Linear large-swing push-pull SiGe BiCMOS drivers for silicon photonics modulators[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2017,65(12):5355-5366.

- [12] 崔海娟,陈福深.LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器行波电极优化设计[J].电子科技大学学报,2003(3):309-312.
- [13] 龙祖利.用于空间光通信的宽带 LiNbO<sub>3</sub> 行波调制器[J].兵工自动化,2006(2):71-72.
- [14] 任登娟,陈名松,黄雪明.行波型 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器的电极优化设计[J].光通信研究,2007(5):47-49.
- [15] RAZAVI B.光通信集成电路设计[M].北京:电子工业出版社,2017:90-110.
- [16] MANDEGARAN S,HAJIMIRI A.A breakdown voltage multiplier for high voltage swing drivers[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits,2007,42(2):302-312.

(收稿日期:2021-11-24)

**作者简介:**

黄俊(1991-),男,博士,工程师,主要研究方向:集成电路设计、功率半导体设计。

任方圆(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:集成电路设计。

胡欢(1992-),男,博士,工程师,主要研究方向:集成电路设计、功率半导体设计。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所