

文章编号: 2095-4980(2020)03-0444-05

正弦激励下的导电胶非线性测试评价方法

李广伟^{1,2}, 邵伟恒², 章秀银¹, 方文啸^{*2}, 高 强³

(1.华南理工大学, 电子与信息学院, 广东 广州 510641; 2.工业和信息化部 电子第五研究所, 广东 广州 510610;
3.广州方邦电子股份有限公司, 广东 广州 510610)

摘 要: 目前由于电子产品中器件非线性引起的电磁可靠性问题变得越来越严重, 为了准确评估不同导电胶产品在正弦信号激励下非线性特性的优劣, 设计了一套基于窄带滤波器和微带线的简单且行之有效的非线性特性测试方法, 在测试中使用滤波器排除测试系统固有的三次谐波。由于非线性效应会产生电压、电流的高次谐波成分, 该方法以三次谐波的功率作为导电胶的非线性特性的衡量指标, 通过测量不同导电胶的三次谐波功率来完成非线性特性的对比测试, 为导电胶的测试评价及设计研发提供技术支撑。

关键词: 导电胶; 非线性; 电磁可靠性

中图分类号: TN402

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018368

Test and evaluation method of non-linear effect of Electrically Conductive Adhesives under sinusoidal excitation

LI Guangwei^{1,2}, SHAO Weiheng², ZHANG Xiuyin¹, FANG Wenxiao², GAO Qiang³

(1.School of Electronics and Information, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China;
2.No.5 Research Institute of MIIT, Guangzhou Guangdong 510610, China;
3.Guangzhou Fang Bang Electronics Company Limited, Guangzhou Guangdong 510610, China)

Abstract: Nowadays, the issue of electromagnetic reliability due to the non-linear effect of the components in electronic products becomes more serious. In this paper, a simple and effective test and evaluation method based on narrow-band filter and microstrip line is designed to accurately demonstrate the characteristic of different Electrically Conductive Adhesives(ECA) under Sinusoidal Excitation. A filter is adopted to eliminate the intrinsic harmonics in the test system. The high-order harmonics components are generated due to the non-linear effect. The power of the third-order harmonics is used as a measurement index for non-linear effect of electrically conductive adhesives in this method. The comparison test can be conducted by measuring the power of the third-order harmonics of different electrically conductive adhesives. This work provides strong technology supports for the evaluation and design of Electrically Conductive Adhesives.

Keywords: Electrically Conductive Adhesives; non-linear; electromagnetic reliability

采用锡铅焊料的焊接过程是电子制造业的标准连接工艺; 但由于铅对环境的危害极大, 近年来越来越多的研究者将研究方向转变为导电型胶粘剂, 简称导电胶(ECA)^[1]。导电胶是一种既能有效胶接各种材料, 又具有导电性能的胶粘剂。导电胶一般由基体树脂和导电填料 2 大部分组成, 基体树脂可赋予导电胶物理和力学性能, 而导电填料则提供导电性能^[2]。目前认为, 导电胶的导电机理主要是宏观的导电通道传导机理和微观的量子隧穿效应^[3-4]。导电通道传导机理主要是指由于胶黏剂粘合, 导电填料中的导电粒子间相互接触, 使导电胶具有导电性。微观上的导电机制为, 热振动引起导体之间的电子跃迁, 电子有一定的概率越过势垒而形成较大的隧道电流。导电胶能满足导电和粘接这 2 项最基础的性能要求之外, 还可以避免焊接高温下的材料变形、元器件的热损坏等。作为一项新的特种工艺, 导电胶粘接的应用日益广泛, 导电胶在电子工业中已成为一种必不

收稿日期: 2018-12-19; 修回日期: 2019-02-17

作者简介: 李广伟(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波天线和电磁兼容。email: eelgw@mail.scut.edu.cn

*通信作者: 方文啸 email: fangwx@ceppei.com

可少的新材料。

从 20 世纪 90 年代开始，国内外学者对导电胶已经有较多的研究^[5-8]。文献[9]对导电胶的基本结构、导电机理、制作工艺、性能指标和研究方向作了较为全面的阐述。文献[10]总结了各种新型的导电胶，如 Ag 系导电胶、铜系导电胶、碳系填料导电胶和复合填料导电胶等，同时对导电胶的制备方法作了介绍。文献[11]提出了一种使用银薄片和树枝状晶体作为混合填料的导电胶，从而使导电胶的电阻率降至 $1.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

2 个或 2 个以上的载波信号经过具有非线性响应的无源器件时，会产生无源互调(Passive Inter Modulation, PIM)现象。无源互调现象会对电子设备的运行造成严重后果^[12]。无源互调产生的机理之一是导电材料具有非线性效应。非线性材料是指具有固有非线性电特性的材料。在工程应用中，导电胶的非线性效应引起的高次谐波和无源互调是一个重要问题^[11-13]。文献[14]分析了温度、湿度和老化时间对导电胶的电阻率和非线性效应的影响。由于电子器件(例如导电胶)的非线性效应，在正弦激励下，器件两端的电压并不是正弦信号，但是仍呈现出周期性，这种信号包含一系列高次谐波成分。在这种情况下，可以通过测量三次谐波的大小来评估电压、电流的失真度及非线性效应的大小^[15]。文献[15]从结构对导电胶的非线性效应的产生机理和由于隧道结引起三次谐波分量的基本理论进行了详尽分析，提出了测量三次谐波的基本原理，并没有提出实际的测试系统和分析。

本文设计了对导电胶的非线性效应的测试评价方法，搭建了一套完整可行的测试系统，并对几种导电胶的非线性特性进行了测试与分析，可为导电胶的设计与性能对比提供强有力的支撑。

1 测试系统

导电胶的非线性测试系统框图如图 1 所示。其中信号源输出频率为 1 GHz 的射频信号；滤波器可大大减少信号源固有的三次谐波，减少系统误差；频谱分析仪 1 用于测量并校准输入被测件的功率；频谱分析仪 2 用于测量由导电胶的非线性效应产生的三次谐波。实际测试环境如图 2 所示。

由于导电胶的非线性效应较小，需保证测试系统本身没有非线性效应或者其非线性效应已被校正。为确保测量数据的可靠性，先对测试系统的非线性进行了测试评估。首先，将导电胶替换为微带线，在不加滤波器的情况下测试信号源与频谱分析仪固有的三次谐波。频谱分析仪 2 接收到的三次谐波(3 GHz)与信号源输出功率(1 GHz)的关系如表 1 所示。从表中可以看出，随着信号源输入功率的增加，频谱分析仪 2 接收到的三次谐波也同步增加，这说明该系统具有固有的非线性效应，这会严重影响测试系统的准确性。为此，在测试系统中引入了阻带中心频率为 3 GHz 的带阻滤波器。此时，当信号源功率在 $-0.72 \sim 29.14 \text{ dBm}$ 范围内变化时，频谱分析仪

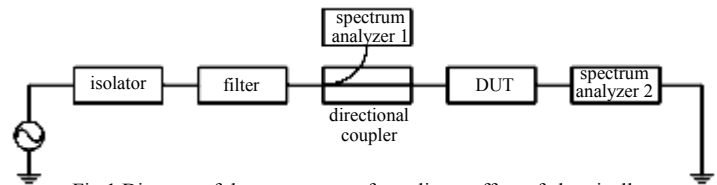


Fig.1 Diagram of the test system of non-linear effect of electrically conductive adhesives

图 1 导电胶的非线性效应的测试系统框图

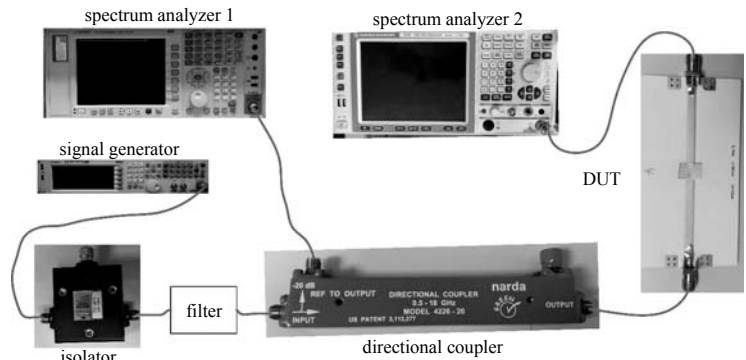


Fig.2 Diagram of test environment

图 2 实际测试环境

表 1 在不加滤波器的情况下，信号源与频谱分析仪固有的非线性效应
Table1 Intrinsic non-linear effect of signal source and spectrum analyzer without filter

output power of signal source/dBm	3rd-order harmonic signal power received by spectrum analyzer 2/dBm
-0.72	-100.95
4.12	-95.82
9.12	-89.5
14.14	-84.78
19.15	-78.55
24.15	-72.84
29.14	-67.02

2 接收到的三次谐波的最大功率为 -106.16 dBm 。该结果表明，滤波器可有效滤除来自信号源的三次谐波，并且由于后续器件例如定向耦合器等引起的三次谐波均不高于上述的最大三次谐波功率，从而大大减小了系统误差，使测试结果更具可靠性。

2 测试结果及分析

基于上述分析,在排除系统固有非线性效应的情况下,按照图 2 所示的测试系统对 2 种导电胶的非线性效应进行了测试,其中 2 种导电胶分别标记为新研制的导电胶和对比导电胶。测试中将导电胶粘接在断开的微带线的两端,并设置了没有导电胶的微带线作为对照组。微带线的长度为 60 mm 和 80 mm,以排除微带线长度对测试结论的影响。本文以三次谐波的功率作为导电胶的非线性特性的衡量指标。被测微带线和导电胶如图 3 所示,其中用透明胶带将导电胶粘接在介质板上,同时保证导电胶与微带线金属部分有良好的接触。导电胶的宽度略大于微带线的宽度以保证导电胶完全覆盖微带线的区域。导电胶的宽度保持一致,以排除无关变量的干扰。实验中认为导电胶与微带线连接处的非线性效应可忽略不计。测试结果如图 4 所示。测试结果表明,当不粘接导电胶时,随着输入功率从 22 dBm 变化到 25.5 dBm,微带线的三次谐波基本上保持在 -105 dBm 以下,因此微带线的三次谐波很小,可作为对照组。对于粘接在 60 mm 和 80 mm 的微带线的导电胶,新研制的导电胶的三次谐波功率均明显低于对比导电胶的三次谐波功率,差值最高可达 3.5 dB。此外,在 60 mm 和 80 mm 长的微带线上,新研制的导电胶和对比导电胶的三次谐波功率之比随着输入功率的增加而显著下降,测试结果与预期相符合,如图 5 所示。当被测件的输入功率高于 23.5 dBm 时,新研制的导电胶的三次谐波功率仅为对比导电胶的 60% 左右,这说明新研制的导电胶的非线性效应明显小于对比导电胶。图 5 所示的 2 条曲线在输入功率高于 24.5 dBm 时具有不同的趋势,部分原因是微带线的传输特性会对整个被测件的非线性产生影响。这说明了引入对照组和不同长度的微带线的必要性。在现阶段,暂时无法完全排除微带线长度对测试结果的影响。在后续研究中,将探索在测试中消除微带线长度影响的方法。总体来说,新研制的导电胶具有更低的非线性效应,这对于有高性能要求和无源互调敏感的应用场景来说具有重要的实际价值。

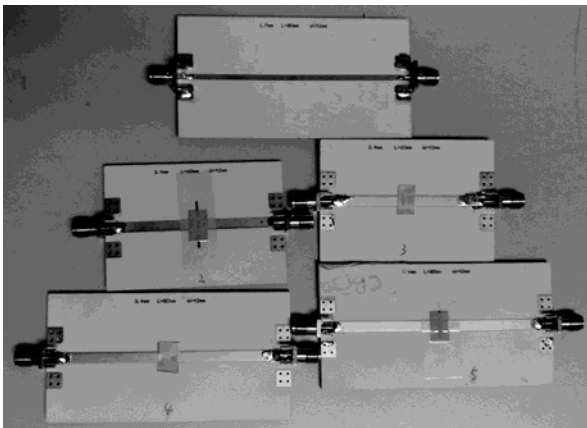


Fig.3 Microstrip line and electrically conductive adhesives under test
图 3 被测微带线和导电胶

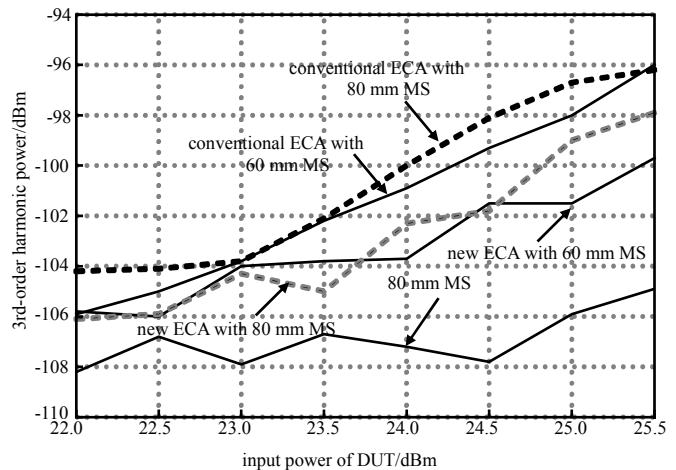


Fig.4 3rd-order harmonic signal power of ECA vs. input power
图 4 导电胶的三次谐波功率与输入功率的关系

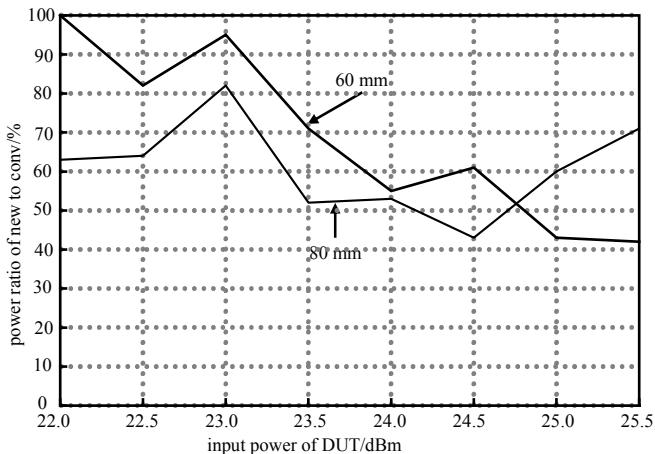


Fig.5 Ratio of the 3rd-order harmonic power of new ECA to that of conventional ECA

图 5 新研制的导电胶和对比导电胶的三次谐波功率之比

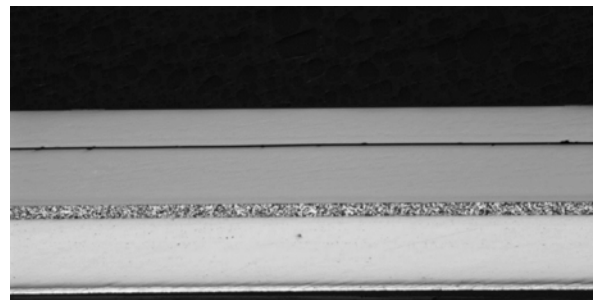


Fig.6 Photograph of electrically conductive adhesives under a microscope
图 6 显微镜下的导电胶结构图

基于2种导电胶的非线性效应的测试结果,考虑从微观结构的角度深入分析新研制的导电胶具有更低的非线性效应的本质原因。为了从材料特性上分析2种导电胶在微观结构上的差别,在高倍镜下观察了2种导电胶。通过对观察到的图像进行分析可以发现,2种导电胶在微观层面上的结构差异是两者具有不同非线性效应的原因之一。图6是在显微镜下的导电胶结构图。其中中间部分是相互融合的基体树脂和导电颗粒。图7和图8分别是传统导电胶和新研制的导电胶在1000倍显微镜下的微观结构图。明亮的部分是导电颗粒,暗部是基体。传统导电胶的导电颗粒密度比较低,而且导电颗粒的分布很不均匀,具有零星分布、少数聚集成团的特点。新研制的导电胶的导电颗粒分布较为均匀,且大部分聚集成较大的团,导电颗粒之间的基体间隙明显减小。当导电颗粒分布较为零散、不均匀时,导电颗粒之间的绝缘基体厚度较大。在金属的逸出功一定时,绝缘基体厚度越大,非线性效应引起的三次谐波的功率越大^[14]。因此,导电颗粒分布均匀、分布密度大有利于减小导电颗粒间的基体间隙,从而减小导电胶的非线性效应。

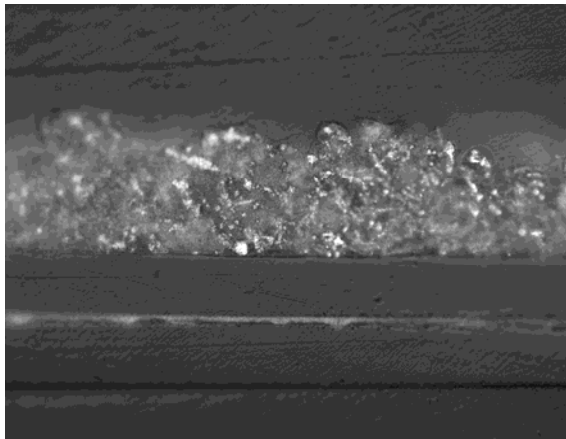


Fig.7 Photograph of conventional electrically conductive adhesives under a 1000× microscope

图7 1000倍显微镜下的传统导电胶

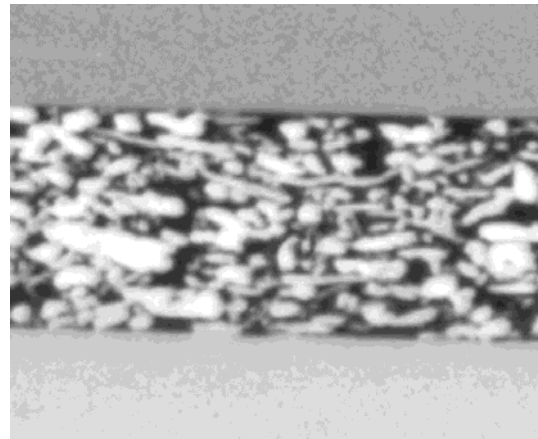


Fig.8 Photograph of new electrically conductive adhesives under a 1000x microscope

图8 1000倍显微镜下的新研制的导电胶

3 结论

本文针对具有非线性响应的导电胶设计了一套基于正弦信号激励的行之有效的测试方法,可用于评价不同导电胶的非线性特性的优劣。实验中先对测试系统固有的非线性效应进行了评估,然后使用带阻滤波器将信号源的三次谐波滤除。测试数据表明,带阻滤波器可很好地滤除信号源的三次谐波,且整个测试系统的固有三次谐波干扰功率在可接受的范围内。在排除系统固有的非线性效应的前提下,本文对不同导电胶的三次谐波强度进行了测试。测试结果表明,随着输入功率的增大,导电胶产生的三次谐波随之增大,新研发的导电胶具有更低功率的三次谐波。当输入功率较高时,2种导电胶的三次谐波功率具有显著差异,新研制的导电胶的三次谐波功率仅为对比导电胶的60%左右。用于粘接导电胶的微带线的长度可能会对非线性测试产生影响。最后,基于非线性效应的测试结果,在高倍显微镜下观察了2种导电胶的微观结构,从而从本质上解释两者的性能差异。高倍镜下的观测图像表明,新研制的导电胶的导电颗粒分布更为均匀,导电颗粒的密度更大,聚集度更高,从而具有更低的非线性效应。本文提出的测试系统和获得的测试结果可对不同导电胶的产品性能进行快速评估。

参考文献:

- [1] CHEN Danghui, GU Ying, CHEN Xi. Research progress of conductive adhesives for microelectronics assembly abroad[J]. *Electronic Components and Materials*, 2002, 21(2):34.
- [2] DUAN Guochen, QI Shuhua, WU Xinming, et al. Research progress of conductive adhesives for microelectronic packaging[J]. *China Adhesives*, 2010, 19(2):54-60.
- [3] LI L, MORRIS J E. Electrical conduction models for isotropically conductive adhesive joints[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 1997, 20(1):3-8.
- [4] MIZUNO M, SAKA M, ABÉ H. Mechanism of electrical conduction through anisotropically conductive adhesive films[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 1996, 19(4):546-553.

- [5] LU Qinghua, HE Tianhong. Research on new conductive adhesives[J]. *Functional Materials*, 1997(5):546–549.
- [6] FU Zhenxiao, ZHANG Qitu, LING Zhida. Research and application of new conductive adhesive[J]. *Jiangsu Ceramics*, 2001, 34(2):16–17.
- [7] ZWOLINSKI M, HICKMAN J, RUBIN H, et al. Electrically conductive adhesives for surface mount solder replacement[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part C*, 1996, 19(4):241–250.
- [8] JAGT J C. Reliability of electrically conductive adhesive joints for surface mount applications: a summary of the state of the art[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part A*, 1998, 21(2):215–225.
- [9] NI Xiaojun, LIANG Tongxiang. Research progress of conductive adhesive[J]. *Electronic Components and Materials*, 2002, 21(1):1–3.
- [10] DUAN Guochen, QI Shuhua, WU Xinming, et al. Research progress of conductive adhesives for microelectronic packaging[J]. *China Adhesives*, 2010, 19(2):54–60.
- [11] MA H, LI Z, TIAN X, et al. Silver flakes and silver dendrites for hybrid electrically conductive adhesives with enhanced conductivity[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(5):1–11.
- [12] MAO Yuru, LIU Ying, XIE Yongjun, et al. Numerical analysis of passive intermodulation effect caused by metal contact nonlinearity[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(6):1174–1178.
- [13] HU Xiangfeng, ZHANG Yanhua. Nonlinear analysis of receiver[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2008, 6(6):440–443.
- [14] BARTO S, MACH P. Resistance and non-linearity of electrically conductive adhesives aged by thermal, humidity and combined aging[C]// *Design and Technology in Electronic Packaging*. Timisoara: IEEE, 2011:59–62.
- [15] BARTO S, MACH P. Nonlinear distortion of C/V characteristic-useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: theoretical background, measuring equipment, selected applications[C]// *Diagnostics in Electrical Engineering*. Pilsen: IEEE, 2016:1–4.

(上接第 434 页)

- [7] EREZ F, MICHAEL R, ZOYA P. Low-power wireless power delivery[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(7):2277–2286.
- [8] LI H C, LI J, WANG K P, et al. A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems using magnetic resonant coupling[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(7):3998–4008.
- [9] MARIAN V, ALLARD B, VOLLAIRE C, et al. Strategy for microwave energy harvesting from ambient field or a feeding source[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11):4481–4491.
- [10] LI C J, LEE T C. 2.4-GHz high-efficiency adaptive power[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2014, 22(2):434–438.
- [11] NIOTAKI K, GEORGIADIS A, COLLADO A, et al. Dual-band resistance compression networks for improved rectifier performance[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 2014, 62(12):3512–3521.
- [12] LIU J, ZHANG X Y, XUE Q. Dual-band transmission-line resistance compression network and its application to rectifiers[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, 66(1):119–132.
- [13] LIU Z, ZHONG Z, GUO Y X. Enhanced dual-band ambient RF energy harvesting with ultra-wide power range[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(9):230–232.
- [14] POZAR D M. *Microwave engineering*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.