

基于THz-TDR的芯片金属微带线缺陷检测

徐振^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 刘龙海^{1,2}, 李吉宁^{1,2*}, 张嘉昕³, 王坦³, 任翔³,
乔秀铭³, 姜晨³

1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;
2. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: 针对体积小、走线密集、集成度高的封装芯片缺陷检测, 目前的主要检测手段存在精度低、周期长等缺点。为弥补传统检测方法的不足, 作者结合太赫兹技术与时域反射技术, 探究对芯片上金属导线缺陷检测的可行性。首先在不同宽度的金属微带线上加工了不同比例的凸起、凹槽缺陷, 模拟集成芯片中金属导线的不完全开/短路等阻抗不匹配情况, 利用太赫兹时域反射计采集其时域反射信号。然后根据时域反射脉冲对应的时间分别对不同缺陷程度、不同缺陷类型进行定性分析, 并精确计算出了芯片上金属微带线的缺陷位置。最后利用有限元分析法对硅基底上存在缺陷的金属微带线进行仿真分析, 与实验结果具有良好的一致性。该研究表明, 太赫兹技术与时域反射技术结合能够实现芯片上金属导线缺陷的诊断检测, 为集成芯片的缺陷检测提供了经验参考。

关键词: 太赫兹; 时域反射; 微带线; 集成芯片; 缺陷检测

中图分类号: O433.4; TN29

文献标识码: A

Metal microstrip line defect detection of chip based on THz-TDR technology

XU Zhen^{1,2}, XU De-Gang^{1,2}, LIU Long-Hai^{1,2}, LI Ji-Ning^{1,2*}, ZHANG Jia-Xin³, WANG Tan³,
REN Xiang³, QIAO Xiu-Ming³, JIANG Chen³

1. School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China)

Abstract: The current main detection methods for packaging chip defects with small size, dense wiring, and high integration have drawbacks such as low accuracy and long cycle time. To compensate for the shortcomings of traditional detection methods, this study combines terahertz technology with time-domain reflection technology to explore the feasibility of detecting metal wire defects on chips. Firstly, different proportions of convex defects and concave defects were processed on metal microstrip lines of different widths to simulate incomplete opening/short circuits of metal wires in integrated chips. The time-domain reflection signals were collected using a terahertz time-domain reflectometer. Then, qualitative analysis was conducted on different defect degrees and types based on the corresponding time of time-domain reflection pulses, and the defect positions of the metal wires on the chip were accurately calculated. Finally, the finite element analysis method was used to simulate and analyze the metal wires with defects on the silicon substrate, which showed perfect consistency with the experimental results. This research shows that the combined terahertz technology with time-domain reflection technology can achieve the diagnosis and detection of metal wire defects on chips, providing an empirical reference for defect detection in integrated chips.

Key words: terahertz, time-domain reflection technology, microstrip line, integrated chip, defect detection

收稿日期: 2023-09-07, 修回日期: 2024-02-24

Received date: 2023-09-07, Revised date: 2024-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(U22A20123, 62175182, 62275193, U22A20353)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22A20123, 62175182, 62275193, U22A20353)

作者简介(Biography): 徐振(1995-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 主要研究领域为太赫兹时域反射技术。E-mail: chongzheng_xu@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jiningli@tju.edu.cn.

引言

在信息化水平日新月异的时代,芯片封装逐渐由2D向3D发展,尺寸向着更薄更小的方向发展,而其内部走线更加密集、结构更加复杂。在生产过程中,各工艺流程环环相扣,技术复杂,材料、环境等因素的微变都可能导致芯片产生缺陷。在芯片生产的过程中,常常会出现断路、异物、划伤、引脚缺失等缺陷。常见的芯片缺陷检测方法有分析 $I-V$ 曲线、拆封后使用 X 射线扫描^[1-2]、激光热成像^[3-4]及超声成像^[5-6]等,但它们存在各种各样的缺陷,包括无法定位故障位置、测试周期长、芯片被破坏、难以分辨复杂封装及高密度走线、检测环境在液体中、易受到干扰等^[7]。因此需要分辨率高、能够精准定位、快速高效的芯片缺陷检测手段。

时域反射(Time Domain Reflection, TDR)测量技术是在1930年由地质学家提出的一种高速脉冲技术,并在地质土壤的含水量测试、锚杆的长度测量中被广泛应用,具有高精确、无损耗和快速测量等特点^[8-11]。时域反射测量技术通过向传输路径中发送一个脉冲或阶跃信号,信号沿着传输路径不断向前传输,当脉冲信号遇到阻抗不匹配时,会发生部分反射或者全部反射,在波速恒定的情况下,TDR时域反射计接收反射信号,可根据反射脉冲的时间计算阻抗变化点的位置,实现对线路中故障的检测。其测量精度主要由脉冲信号的抖动决定,信号抖动越小,TDR的分辨率越高。由于示波器 TDR 的信号抖动大,通常大于 1 ps,且其上升沿时间一般大于 20 ps,因此分辨率不高,难以实现高分辨率的定位。

太赫兹波(Terahertz, THz)一般是指频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波,对应波长处于 0.03 mm 到 3 mm 之间。其波段位于毫米波与红外光之间,具有宽带性、相干性、低能性、瞬态性等特性,使得其在无线通信、军事反恐、工业无损检测、安全检查、生物医学、化学分析和天文气象等领域得到广泛的应用^[12-14]。太赫兹脉冲的上升时间为十几 ps,信号抖动在飞秒量级,因此将太赫兹脉冲应用在芯片缺陷的时域反射检测中,可以得到分辨率高,缺陷定位精确的检测手段。

2017年, Masaichi Hashimoto 等^[15]制备了三种参考芯片与一种失效芯片,并利用太赫兹时域反射技术进行检测,通过对比反射信号峰的位置,估算出失效点到检测点的距离。2018年,刘龙海等^[16]利用

太赫兹时域反射技术对不同长度的芯片金属线的开路、短路进行测量,根据反射信号的脉冲峰的位置及峰值大小实现了对故障点的定位。2022年, Leena Saku 等^[17]利用太赫兹时域反射技术采用超短脉冲信号对芯片上高温引起的缺陷、基板裂纹以及长轨迹划痕进行检测,提高了检测的分辨率。Yang Shang 等^[18]提出一种开-短路归一化方法(Open-Short Normalization Method, OSN)并应用在太赫兹时域反射技术对芯片的缺陷检测中,实现了对 PCB 板上金属线四个阻抗变化位置的定位。

在芯片的实际生产过程中,不仅存在内部导线完全的开路、短路,还存在芯片引线用料堆积、导线不完全断路等缺陷。本研究主要针对芯片中金属微带线的上述缺陷进行研究,采用太赫兹时域反射技术实现了对缺陷类型的定性识别、缺陷程度的定性判别、缺陷位置的精确定位。

1 实验部分

1.1 样品介绍

为模拟芯片实际生产过程中的不完全开路、用料堆积的缺陷,本实验在高阻硅基底镀上不同宽度的金属线,并在金属线上设计了不同凹陷深度以及不同凸起高度的缺陷。具体参数如表1所示。微带线的线宽 w 设置为 10~25 μm , 梯度为 5 μm , 金属线缺陷所占比例分别为 25%、50%、75%, 共计 12 个样品。样品设计图与实物图如图 1 所示。

表1 模拟导线的线宽缺陷具体参数

Table 1 Specific parameters of line width defects in simulated conductors

$w/\mu\text{m}$	α		
	25 %	50 %	75 %
10	2.5 μm	5 μm	7.5 μm
15	3.75 μm	7.5 μm	11.25 μm
20	5 μm	10 μm	15 μm
25	6.25 μm	12.5 μm	18.75 μm

样品设计图与实物图如图 1 所示,图 1(a)为样品设计图,图(b)为样品实物图。黄色部分为金导线,样品左右两侧为金属电极,为边长 2 mm 的正方形,中间为不同宽度的微带线,在 2 mm 的位置设计不同比例的缺陷。图 1(c)为样品横截面图,其中基底厚度为 500 μm ,微带线厚度为 200 nm,金线总长度为 16 mm,芯片宽度为 2 cm。每个芯片的第 3、4 条微带线为双金属线,并在双金属线的上一条金属

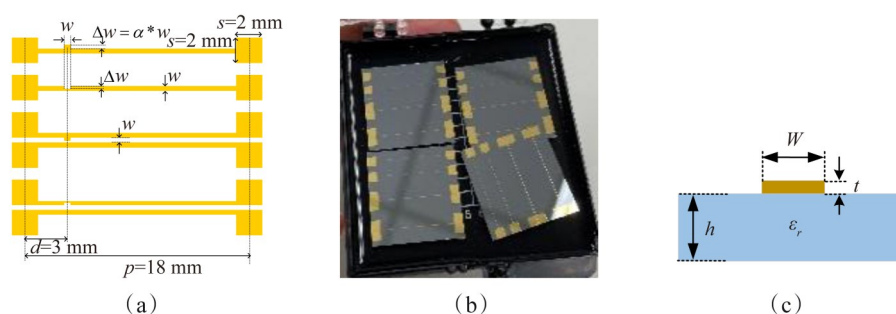


图1 实验样品图:(a)样品设计图;(b)样品实物图;(c)样品横截面图

Fig. 1 Experimental sample diagram: (a) Sample design drawings; (b) Physical drawings of samples; (c) Cross-sectional view of the sample

线上设计了不同比例的缺陷。

1.2 实验原理

时域反射的原理是向待测介质发送脉冲信号,该信号沿着待测介质的传输线中向前传播,当脉冲信号遇到阻抗发生变化的传输线时,将有一部分信号在阻抗发生变化的位置反射回发射端,通过计算发射信号与参考阻抗生成的反射信号就可以得出阻抗变化的位置、性状等信息。其计算公式如下:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_{\text{Ref}}}{Z_L + Z_{\text{Ref}}} \quad (1)$$

其中, ρ 为反射系数, Z_L 为待测点的阻抗, Z_{Ref} 为参考阻抗。时域反射计的信号原理图如图2所示。当待测样品中的传输线阻抗匹配时,没有异常点,无信号反射回发射端,反射系数为0;当传输线出现了断路时,将会返回一个正峰值信号,反射系数为1;当传输线发生短路故障时,将返回一个负值脉冲信号,反射系数为-1。

根据因阻抗变化返回的正脉冲信号或者负脉冲信号的时间差可以计算出脉冲的传播距离。引线阻抗发生变化点到时域反射计探针检测点的距离 L 为

$$L = \frac{c \cdot (t_1 - t_0)}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

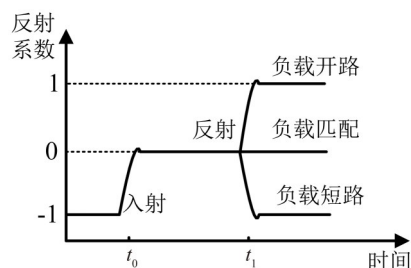


图2 不同故障下时域反射计反射信号^[19]

Fig. 2 Time domain reflectometer reflection signals under different faults

其中, ϵ 为材料的介电常数, c 为光速, t_0 脉冲信号发射时间和 t_1 反射脉冲对应时间。

利用爱德万TS9001TDR测试系统采集样品的太赫兹时域反射信号,如图3为太赫兹脉冲时域反射的原理示意图。信号触发器向两个飞秒激光器分别发送触发信号,飞秒激光器发送脉冲信号分别泵浦两个光电导天线,产生高频的太赫兹脉冲信号。太赫兹脉冲信号经过探针耦合进待测芯片的引脚,测试样品将反映样品缺陷的脉冲信号通过探针传输回第二光电导天线,最后由处理单元处理。飞秒激光器的中心波长为1 550 nm,脉冲宽度为50 fs,其中两个飞秒激光器的重复频率略有差别,进而实现高频太赫兹的产生和探测。

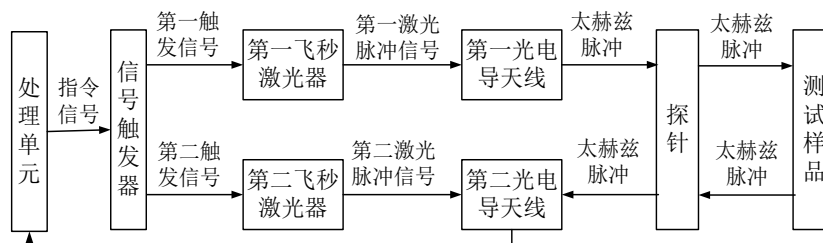


图3 太赫兹脉冲时域反射的原理示意图^[20]

Fig. 3 Schematic diagram of time-domain reflection of terahertz pulses

2 数据处理与分析

2.1 金属线凸起缺陷

针对芯片上的金属线凸起,分别从线宽不同缺陷比例相同、线宽相同缺陷比例不同两个角度进行分析。当太赫兹时域反射计的信号端口与芯片上金属线接触,接地端口与硅基底接触时,采集到开路信号,采集方式如图4所示,其中三角形状为太赫兹时域反射计的信号端口,梯形部分为接地端口。采集到的开路信号如图5所示。

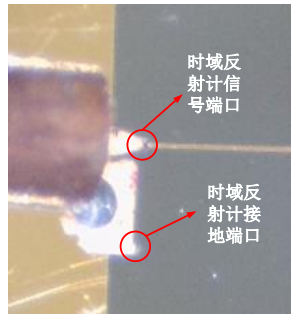


图4 时域反射计开路测量方式图

Fig. 4 Open circuit measurement method diagram of time-domain reflectometer

由图5(a)可明显观察出,当金属线的宽度为25 μm 时,缺陷的宽度与高度均最大,此时微带线上阻抗突变位置与金属线检测端点的距离最近,在10 ps附近呈现出的时域反射信号振幅最大,相位最为超前。随着金属微带线的宽度减小,微带线上缺陷部分的宽度与高度均减小,阻抗变化位置与金属微带线检测端点之间的距离增加。因此金属线宽度越小,反射信号的峰值越低,相位越滞后。

由图5(b)可发现,当金属微带线的宽度不变时,阻抗突变位置距离金属微带线的端点距离不变,随着缺陷比例的增加,缺陷的高度逐渐增加,在15 ps附近时域反射信号的振幅逐渐下降。

2.2 金属线不完全开路缺陷

针对芯片上金属导线的不完全断路,同样从缺陷比例相同金属导线宽度不同、金属线宽度相同缺陷比例不同两个角度进行分析,反射信号如图6所示。当 w 从10 μm 到25 μm ,以5 μm 梯度增加时, α 保持75%不变,由图(a)明显看出,随着线宽 w 的增加,反射信号在10 ps附近的幅值逐渐增加。当 w 为25 μm 时,随着 α 的增加,反射信号的幅值在10 ps附近逐渐增加,如图(b)所示。

当缺陷比例不变,金属线的宽度变化时,缺陷

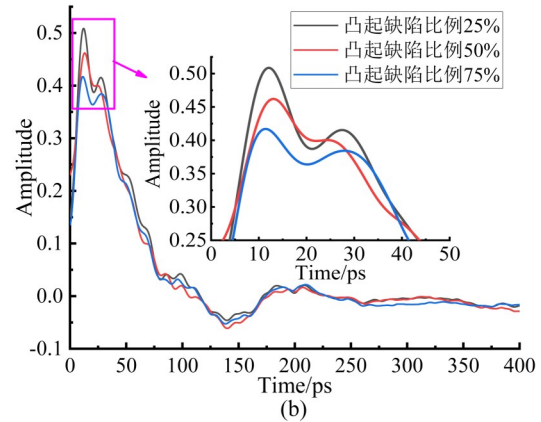
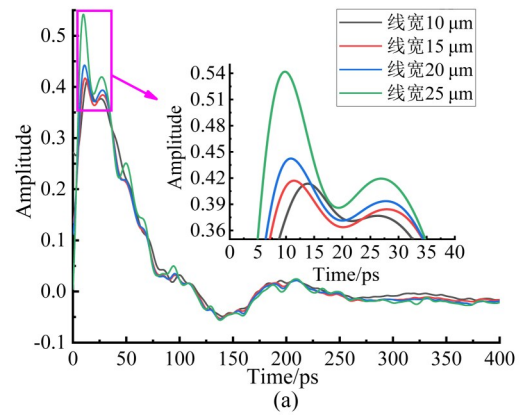


图5 不同参数的金属线凸起缺陷反射信号图:(a) α 为75%时不同线宽金属线凸起缺陷;(b) w 为15 μm 时不同比例凸起缺陷

Fig. 5 Reflection signal diagram of metal wire convex defect with different parameters: (a) The α is 75% of the convex defects of metal wires with different line widths; (b) Different proportional convex defects when the w is 15 μm

发生位置与金属微带线的端点距离以及缺陷大小均发生变化,使时域反射信号的振幅与相位均受到影响。当缺陷比例变化,金属线的宽度不变时,缺陷发生位置与金属线端点的距离不变,仅有缺陷大小发生变化,此时主要使时域反射信号的振幅发生变化。

2.3 缺陷类型的定性识别

为判别芯片微带线上的缺陷类型,即金属线上为凸起或是凹陷,对芯片上的第三、四条微带线进行分析。采集信号时,太赫兹时域反射计与金属线的接触方式如图7所示,太赫兹时域反射计的信号端口与有缺陷的金属线接触,接地端口与无缺陷的金属线接触。为控制变量,选取相同线宽 w 分别为10 μm 、15 μm 、20 μm 、25 μm , α 为75%,不同的缺陷类型进行分析,结果如图8所示。

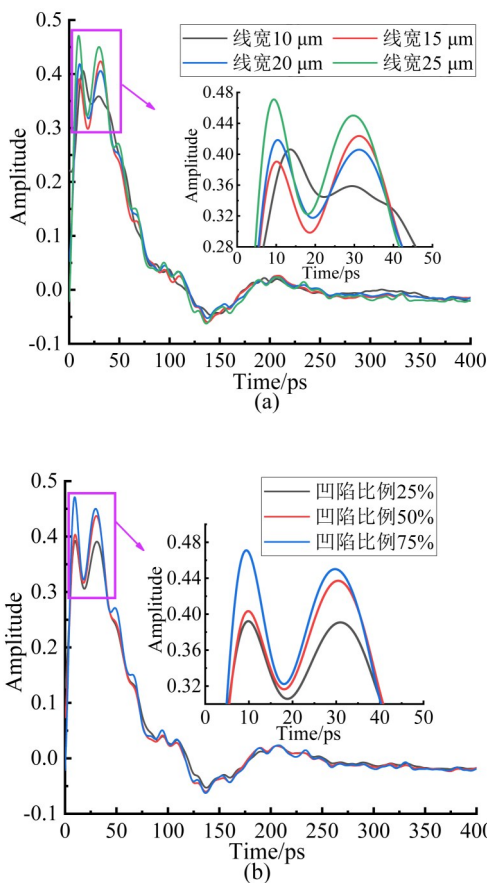


图6 不同参数的金属线凹陷缺陷反射信号图:(a) α 为75%不同线宽金属线凹陷缺陷;(b) w 为25 μm 时不同比例凹陷缺陷

Fig. 6 Reflection signal diagram of metal wire concave defect with different parameters:(a) The α is 75% of metal wire concave defects with different line widths;(b) Different proportions of concave defects when the w is 25 μm

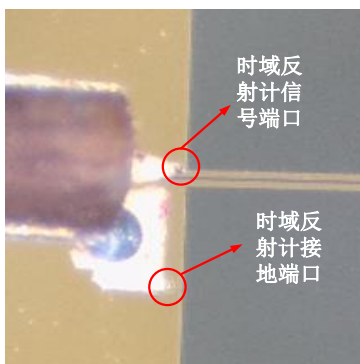


图7 时域反射计对双金属线的测量接触方式
Fig. 7 Measurement contact mode of time domain reflectometer for bimetal wire

由图8分析可知,在25~50 ps范围内凸起缺陷与凹陷缺陷变化趋势一致,凸起缺陷的振幅明显高于凹陷缺陷,因此可根据振幅实现对双金属线缺陷

的定性判别。

为验证上述分析,选取 w 为20 μm 的金属线,分别对不同比例缺陷的不同缺陷类型进行分析, α 分别为25%,50%,75%,反射信号如图9所示。

由图9分析可知,在25~50 ps范围内凸起缺陷与凹陷缺陷变化趋势一致,凸起缺陷的振幅明显高于凹陷缺陷,如上述分析结论一致。

2.4 故障的精确定位

当探针的发射端与接地端同时与金属线两端电极片接触时,部分脉冲信号向前传输,部分脉冲信号会通过接地端反射回短路信号,探针发射端与接地端的距离即为短路距离。

如图1(c)所示为样品的横截面图,其中金属线的宽度为 w ,基底的高度为 h ,基底的电导率介电常数为 $\epsilon_r = 11.9$ 。本研究的样品可简化为微带线,当电磁波在微带线中的传输速度及有效相对介电常数由公式(3)~(5)计算^[21]。

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} F(w/h) \quad (4)$$

$$F(w/h) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{(2 + \frac{12h}{w})}} + 0.041(1 - w/h)^2 \dots\dots (w/h \leq 1) \\ \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{12h}{w})}} \dots\dots (w/h \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

本研究所有芯片样品具有相同的基底厚度,但金属线的宽度分别为10 μm 、15 μm 、20 μm 、25 μm 。根据太赫兹时域脉冲信号返回的时间,计算得到各个样品缺陷的测试距离如表2所示。

如表2所示,针对12个样品金属线上的凸起与凹陷两种缺陷类型,根据公式(3)~(5),利用样品的结构参数可计算得到电磁波在缺陷样品中的传输速度,结合太赫兹时域反射信号对应的时间可分别计算得到缺陷点的位置。

由于样品设置的原因,芯片上金属线的两端存在2 mm×2 mm的金属电极片,因此当太赫兹时域反射计的信号接口处于金属线的端口时,会与接地端口通过金属电极发生短路,此时会反射回短路的负脉冲信号,短路距离为信号端口与接地端口的距离,即600 μm 。因此本研究在针对芯片上金属缺陷

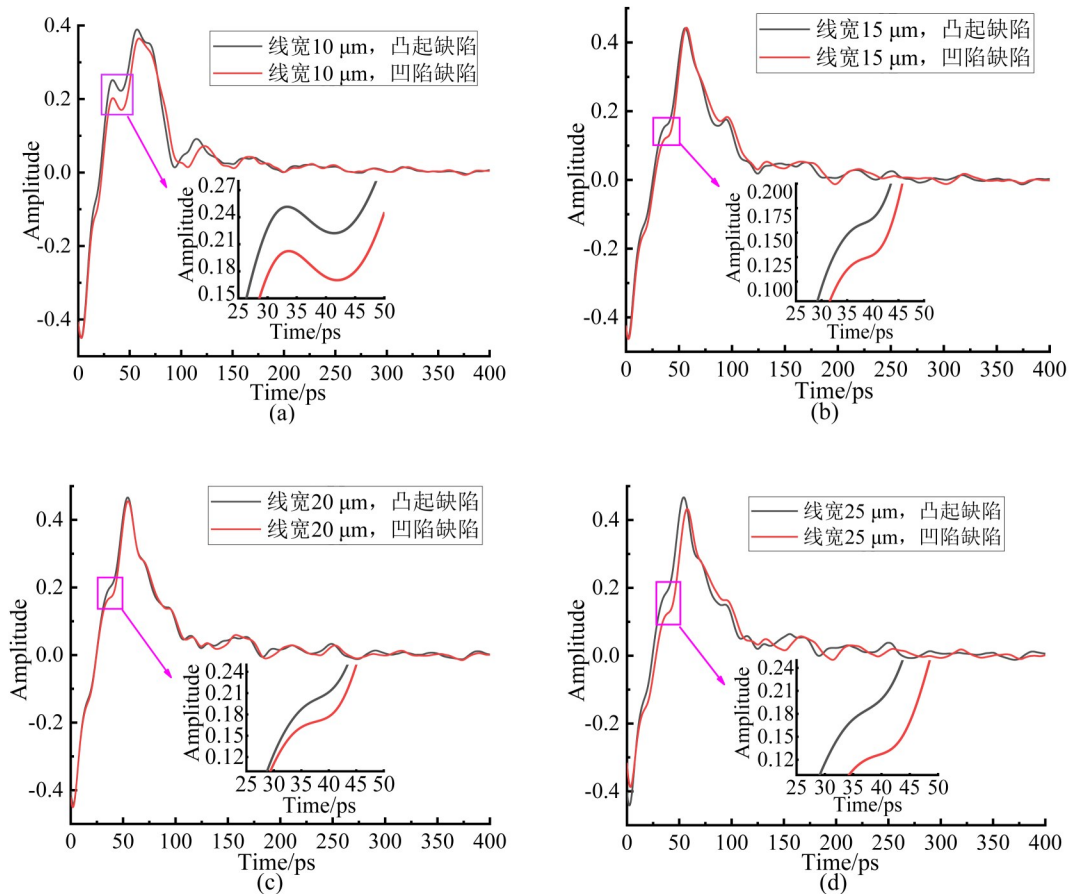


图8 不同线宽金属线不同缺陷类型反射信号图:(a) w 为 $10\ \mu\text{m}$ 时不同缺陷类型;(b) w 为 $15\ \mu\text{m}$ 时不同缺陷类型;(c) w 为 $20\ \mu\text{m}$ 时不同缺陷类型;(d) w 为 $25\ \mu\text{m}$ 时不同缺陷类型

Fig. 8 Reflected signal diagrams of different defect types of metal wires with different line widths: (a) Different defect types when the w is $10\ \mu\text{m}$; (b) Different defect types when the w is $15\ \mu\text{m}$; (c) Different defect types when the w is $20\ \mu\text{m}$; (d) Different defect types when the w is $25\ \mu\text{m}$

检测时,将太赫兹时域反射计的信号端口,沿着金属线向延伸,未与金属线的端口连接,与金属线端口存在一定距离。如表2中测试图所示,实际测量点距离缺陷点的距离小于金属线端口距离缺陷点的位置。因此根据金属线反射信号峰对应的时间,可实现缺陷点位置的精确定位。

根据表2所示,部分凹陷缺陷的检测精度略优于凸起缺陷,可能是因为两种不同缺陷的微带线尽管在无缺陷部分具有相同的特性阻抗以及相位常数,但是两种微带线发生了不同尺寸跳变,使该缺陷微带线的等效电路不同,因此当脉冲信号在金属线上传输时,会产生不同的影响。

3 仿真模拟

微带线是一种在集成电路中被广泛应用的平面传输线,通常是在介质基底材料上印制一定厚度的金属线,用来连接电感、电容、谐振器、耦合器等

各种元器件。微带的结构是将宽度为 W 的金属导体印制在一定厚度的电介质基片上,其截面结构如图1(c)所示。因生产工艺的局限性,在实际的加工过程中难以避免微带线上出现不需要的阻抗变化,本研究通过探针将太赫兹脉冲信号耦合到芯片金属线上,沿着金线向前传输。当金线上存在阻抗失配、插入损耗或者外部环境的噪声,均可能使信号接收端接收到的反射信号失真,并且当金属探针与芯片的接触程度不同时,也可能造成耦合效率不同。

微带线可看作由两根平行金属圆波导演变而来的,在平分面处所有的电场线与介质基底及接地平面垂直,传输的电磁波为准TEM波^[21]。在微带线通常中填充两种介质,分别为微带线上方的空气介质以及微带线与接地平面之间的电介质。其电磁场分布如图10所示,电场主要分布在电介质基底

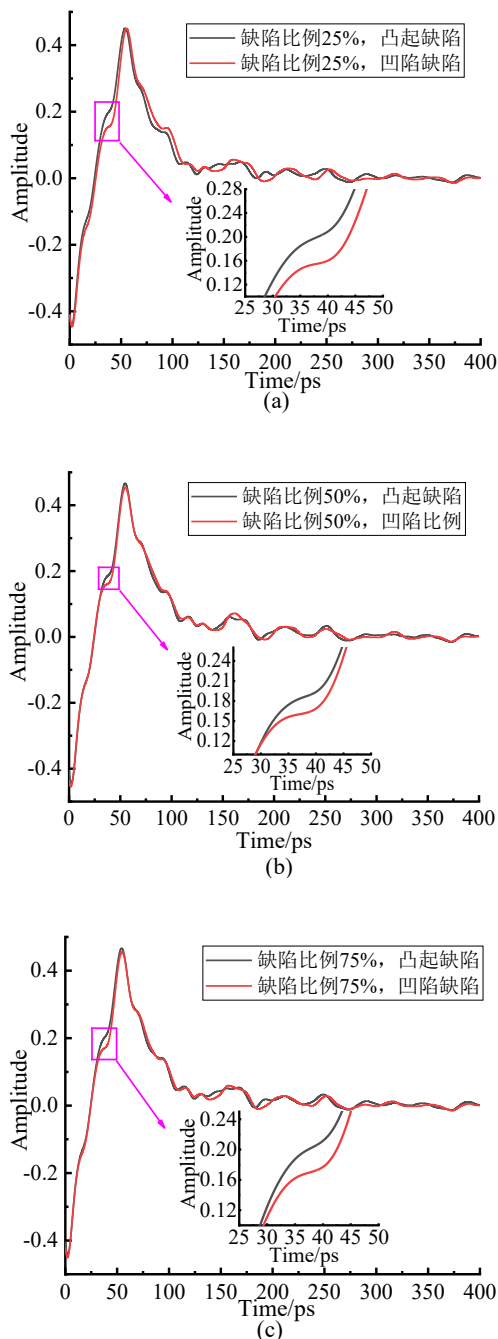


图9 相同线宽不同 α 的反射信号图:(a) α 为25%;(b) α 为50%;(c) α 为75%

Fig. 9 Reflected signal diagram with different defect ratios of the same line width:(a) 25% defect ratio;(b) 50% defect ratio;(c) 75% defect rate

中,而空气中的电场强度较弱。

本研究采用有限元方法对高阻硅基底上存在缺陷的金属微带线进行仿真,仿真对象为基板上印制厚度为200 nm的金线,金线的长度为16 mm,宽度为 w ,在距离金线端点2 mm的位置存在一个凸

起/凹陷的缺陷,缺陷的长度为与金属线宽度相同,宽度为 $11.25 \mu\text{m}$ 。具体结构如图11所示,在局部放大图中的凸起缺陷用来模拟芯片加工时用料堆积造成的阻抗变化以及不线路中的不完全断路问题。

当金属线上存在不同比例的凸起缺陷时,时域反射信号不同,假设凸起缺陷的长度为 $25k$,缺陷的宽度为 $20k$,其中参数 k 为缺陷的比例,当 k 为0时,表明金属线上不存在缺陷。激励信号设置为阶跃信号,上升时间为15 ps。如图12(a)所示,在相同的凸起缺陷比例情况下,当金属线的宽度以 $20 \mu\text{m}$ 为梯度逐渐增加时,对应的反射信号的峰值逐渐增加,与图5(a)所表现出来的规律完全一致;如图12(b)所示,为 w 为 $25 \mu\text{m}$ 时,不同大小的凸起缺陷的时域反射信号,在88 ps附近存在明显反射信号峰,当金属线的宽度确定时,随着凸起比例的增加,信号峰的幅值逐渐增大,与实验部分图5(b)结论一致。

如图13为金属线上存在不完全短路时,经过有限元分析得到时域反射信号,如图(a)所示,当凹陷的深度为宽度的0.75倍时,随着金属线的宽度逐渐增加,在90 ps附近的幅值逐渐增加;如图(b)所示,当金属线的宽度为 $100 \mu\text{m}$ 时,当凹陷的比例逐渐增加,在时域反射信号的90 ps附近的信号峰值逐渐增加。即在凹陷缺陷的宽度与缺陷的比例变化时,仿真缺陷的变化规律与图6得到的实验结果完全一致。

根据金属线存在凸起缺陷时宽度为 $25 \mu\text{m}$, k 为20时对应的反射信号计算缺陷点的位置,此时 $t_0=45.39 \text{ ps}$, $t_1=89.33 \text{ ps}$, $\varepsilon_{\text{re}}=10.928$,计算得到缺陷点距离金属线端点为1.993 mm,距离为误差在0.35%,即能够实现对缺陷位置的精确定位。

4 结论

随着集成电路产业的发展,对芯片中导线的故障缺陷检测越来越重要。本文通过太赫兹技术与时域反射技术相结合,对芯片上金属微带线的不完全开、短路缺陷进行检测。当缺陷比例或者金属线的宽度保持不变时,可根据5~20 ps范围内时域反射信号的振幅强度实现对金属线宽度或者缺陷比例大小的定性分析;在相同线宽相同缺陷比例情况下,对于双金属线的凸起与凹陷,凸起缺陷的时域反射信号在25~50 ps范围内振幅明显高于凹陷缺陷,因此可根据振幅实现对双金属线缺陷类型的定

表 2 芯片缺陷定位检测结果

Table 2 Chip defect localization detection results

样品 序号	缺陷 类型	时间 (ps)	测试位置 (μm)	缺陷位置 (μm)	偏差 (μm)	测试时放大图	缺陷 类型	时间 (ps)	测试位置 (μm)	缺陷位置 (μm)	偏差 (μm)	测试时放大图
1	凸起	24.9	1 422.84	1 995	572.16		凹陷	23.36	1 334.81	1 995	660.19	
2	凸起	27.98	1 598.8	1 995	396.2		凹陷	29.96	1 711.94	1 995	283.06	
3	凸起	26.3	1 502.8	1 995	492.2		凹陷	29.5	1 685.66	1 995	309.34	
4	凸起	30.6	1 742.25	1 992.5	250.25		凹陷	31.6	1 799.46	1 992.5	193.04	
5	凸起	31.8	1 810.85	1 992.5	181.65		凹陷	32.46	1 848.44	1 992.5	144.06	
6	凸起	27.92	1 589.91	1 992.5	402.59		凹陷	31.24	1 778.96	1 992.5	213.54	
7	凸起	30.96	1 757.76	1 990	232.24		凹陷	31.26	1 774.79	1 990	215.21	
8	凸起	30.5	1 731.64	1 990	258.36		凹陷	32.3	1 833.83	1 990	156.17	
9	凸起	31.64	1 796.36	1 990	193.64		凹陷	31.78	1 804.31	1 990	185.69	
10	凸起	32.34	1 831.94	1 987.5	155.56		凹陷	30.96	1 753.77	1 987.5	233.73	
11	凸起	31.26	1 770.77	1 987.5	216.73		凹陷	32.26	1 827.42	1 987.5	160.08	
12	凸起	30.74	1 741.31	1 987.5	246.19		凹陷	29.74	1 684.67	1 987.5	302.83	

性识别;根据太赫兹反射信号峰对应的时间,可精确计算出金属线上缺陷点的位置。采用有限元分

析法对高阻硅基底上的凸起/凹陷微带线进行仿真,得到时域反射信号与实验结果良好的一致性。本

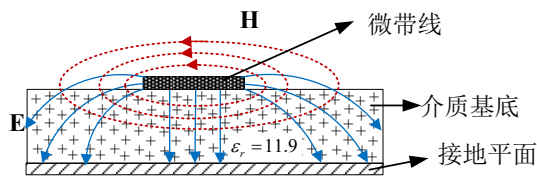
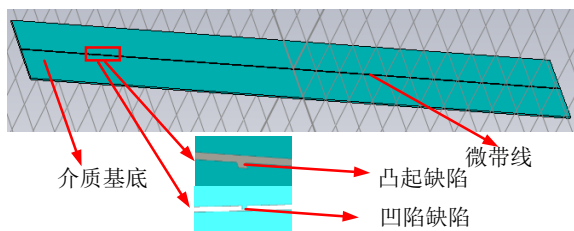
图 10 微带中的电磁场分布^[22]Fig. 10 Electromagnetic field distribution in microstrips^[22]

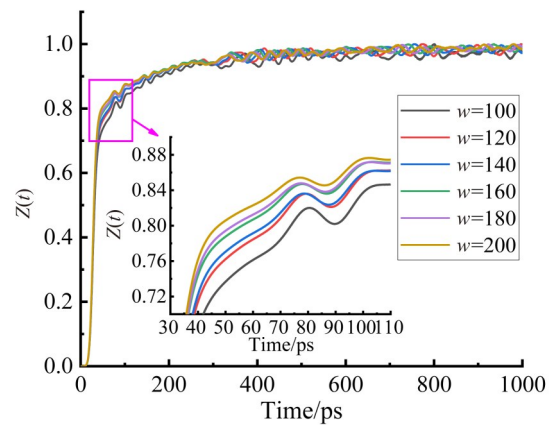
图 11 单金属线缺陷仿真结构图

Fig. 11 Simulation structure diagram of single metal wire defect

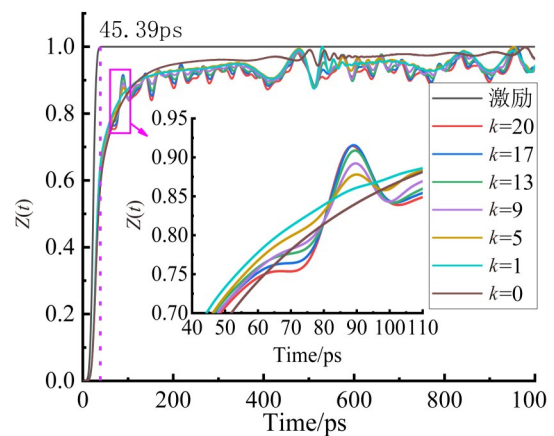
研究表明,太赫兹技术结合时域反射技术可以实现对芯片上存在缺陷的金属微带线检测,并能够精确定位缺陷位置,为后期开发出高效的封装芯片缺陷故障检测手段提供经验借鉴。

References

- [1] Huang Ren-Bin, Zhan Dao-Hua, Yang Xiu-Ding, *et al.* ATNet: A defect detection framework for X-ray images of DIP chip lead bonding [J]. *Micromachines*, 2023, **14**(7).
- [2] Li Ke, Wu Zhong-Qing, Ji Yong, *et al.* Detection method of weld bubble defect in chip X-ray image based on improved U-Net network [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*. (李可, 吴忠卿, 吉勇, 等. 改进U-Net芯片X线图像焊缝气泡缺陷检测方法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*), 2022, **50**(06): 104-110.
- [3] Xu Zhen-Song, Shi Tie-Lin, Lu Xiang-Ning, *et al.* Using active thermography for defects inspection of flip chip [J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, **54**(4): 808-815.
- [4] Zhang Jia, Lu Xing-Hua, Zhu Zhen-Yu, *et al.* Line laser lock-in thermal maging detection of defects in multi-channel digital integrated chips [J]. *Laser Journal*. (张稼, 陆兴华, 祝振宇. 多通道数字集成芯片缺陷的线激光锁相热成像检测 [J]. *激光杂志*), 2022, **43**(08): 76-80.
- [5] Yu Xiao-Nan, Huang Hai-Run, Xie Wan-Long, *et al.* Simulation research on sparse reconstruction for defect signals of flip chip based on high-frequency ultrasound [J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(4): 1292.
- [6] Kumar Anubhav Tiwari, Renaldas Raisutis. Intelligent diagnosis of flip chip solder bumps using high-frequency ultrasound and a naive Bayes classifier [J]. *INSIGHT*, 2018, **60**(5): 264-269.
- [7] Tan Shi-Hong. High-frequency Ultrasonic Detection Method for Flip Chip Defects based on Sparse Representation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022. (谈世宏. 基于稀



(a)



(b)

图 12 凸起缺陷 TDR 仿真信号:(a)相同 α 不同 w ; (b)相同 w 不同 α Fig. 12 TDR simulation signals of convex defects: (a) Different w with same α ; (b) Different α with same w

疏表示的倒装芯片缺陷高频超声检测方法 [D]. 无锡: 江南大学, 2022.)

- [8] Lan Yin Lee, Kok Keng Chua. Enhanced Package Fault Isolation Method Using Time Domain Reflectometry (TDR) Incorporation with Mathematics [C]. 2019 IEEE 26th International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). IEEE, 2019: 1-3.
- [9] Mu Qing-Yi, Zheng Jian-Guo, Yu Yong-Tang, *et al.* In-situ evaluation of collapsible loess through time-domain reflectometry [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. (穆青翼, 郑建国, 于永堂, 等. 基于时域反射技术(TDR)的黄土湿陷原位评价研究 [J]. *岩土工程学报*), 2022, **44**(06): 1115-1123.
- [10] Chih Ping Lin, Yin Jeh Ngui, Chun Hung Lin. Multiple reflection analysis of TDR signal for complex dielectric spectroscopy [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, **67**(11): 2649-2661.
- [11] Okada T, Nishina S, Ataka T, *et al.* Development of terahertz pulse time-domain reflectometry system for transmis-

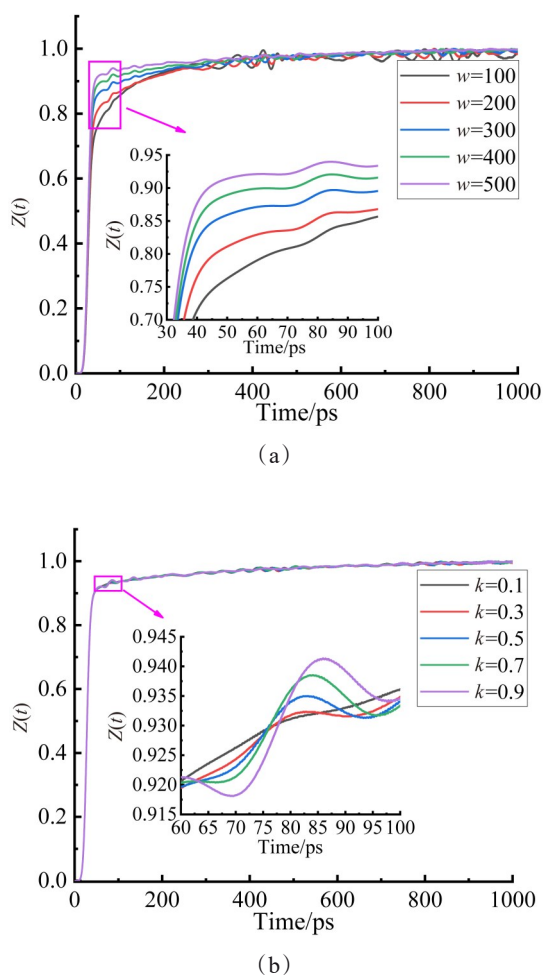


图13 凹陷缺陷TDR仿真信号:(a)相同 α 不同 w ; (b)相同 w 不同 α

Fig. 13 TDR simulation signals of concave defects: (a) Different w with same α ; (b) Different α with same w

sion line failure analysis [C]. 2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2015; 1-2.

- [12] Du Hai-Wei, Zhu Si-Yuan, Lv Jin, *et al.* Research progress of terahertz air coherent detection technique[J]. *Infrared*. (杜海伟, 朱思源, 吕金, 等. 太赫兹空气相干探测技术研究进展[J]. *红外*), 2020, **41**(11): 1-10.
- [13] WANG Yu-Ye, JIANG Bo-Zhou, XU De-Gang, *et al.* Continuous terahertz wave biological tissue imaging technology based on focal plane array[J]. *Acta Optica Sinica*. (王与焯, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续

太赫兹波生物组织成像技术研究[J]. *光学学报*), 2021, **41**(07): 74-81.

- [14] WU Li-Min, LIAO Bin, XU De-Gang, *et al.* Study of in-vivo breast cancer in a subcutaneous xenograft mouse model using terahertz imaging [J]. *J Infrared Millim. Waves*. (武丽敏, 廖彬, 徐德刚, 等. 小鼠在体皮下乳腺癌的太赫兹波成像检测研究[J]. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(05): 553-560.
- [15] Masaichi Hashimoto, Makoto Shinohara, Yang Shang, *et al.* 2.5D chip TSV open failure analysis by high resolution time-domain reflectometry [J]. *IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, Singapore, 2017, 1-3.
- [16] Liu Long-Hai, Xie Jian-Hua, Zhang Yan-Hua. Terahertz pulse time-domain reflectometry and its application to advanced package failure analysis [J]. *China Integrated Circuit*, (刘龙海, 谢剑华, 张彦华. 太赫兹脉冲时域反射计及其在先进封装失效分析的应用[J]. *中国集成电路*), 2018, **27**(07): 69-72.
- [17] Leena Saku, Rahul Babu Radhamony, Andrea Soriano, *et al.* Time-Domain Reflectometry Analysis on Low Impedance Marginal Failure and multi-chip Modules [C]. 2022 IEEE 24th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). IEEE, 2022: 829-832.
- [18] Yang Shang, Makoto Shinohara, Eiji Kato, *et al.* Defect identification in branched traces by high-resolution time-domain reflectometry [C]. 2022 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), Singapore, Singapore, 2022, 1-7.
- [19] TANG Peng-Fei. Research and Implementation of Dual Channel Differential TDR Waveform Processing Technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (唐朋飞. 双通道差分TDR波形处理技术研究是实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.)
- [20] Wang Tan, Zhang Jia-Xin, Xu De-Gang, *et al.* Non-destructive testing system and method based on terahertz time-domain reflection [P] (王坦, 张嘉欣, 徐德刚, 等. 基于太赫兹时域反射的无损检测系统及方法: 中国: CN202211020731.3) [P]. 2023-02-03.
- [21] Huang Yu-Lan. RF circuit theory and design [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, (黄玉兰. 射频电路理论与设计(第2版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 46-47.
- [22] WANG Li-Cong, YANG Xiao-Ming, DING Yong, *et al.* Design of a kind of waveguide-to-microstrip transition with the wider bandwidth and the lower Insertion loss [J]. *Guidance & Fuze*. (王俐聪, 杨晓明, 丁勇, 等. 一种宽频带低插损的波导-微带转换器的设计 [J]. *制导与引信*), 2017, **38**(01): 24-28.