



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXX.6—XXXX/IEC 61967-6:2008

集成电路 电磁发射测量 第6部分：传导发射测量 磁场探头法

Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions-Part 6: Measurement
of conducted emissions-Magnetic probe method

(IEC 61967-6: 2008, IDT)

(征求意见稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言.....	II
引言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 概述.....	1
4.1 测量基础.....	1
4.2 测量原理.....	1
5 试验条件.....	2
5.1 概述.....	2
5.2 频率范围.....	2
6 试验设备.....	2
6.1 概述.....	2
6.2 磁场探头.....	2
6.3 探头间距夹具和探头的放置.....	2
7 试验布置.....	4
7.1 概述.....	4
7.2 探头校准.....	5
7.3 标准 IC 试验板的改进.....	5
8 试验程序.....	9
8.1 概述.....	9
8.2 试验技术.....	9
9 试验报告.....	10
9.1 概述.....	10
9.2 文件.....	10
附录 A（规范性）探头校准程序—微带线方法.....	11
附录 B（资料性）测量原理和校准因子.....	13
附录 C（资料性）磁场探头的空间分辨率.....	16
附录 D（资料性）探头的放置角度.....	17
附录 E（资料性）改进型磁场探头.....	18
参考文献.....	32

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

GB/T XXXXX《集成电路 电磁发射测量》为集成电路电磁发射测量方法标准。

本文件是GB/T XXXXX的第6部分。GB/T XXXXX已经发布了以下部分：

- 第2部分：辐射发射测量 TEM小室和宽带TEM小室法；
- 第3部分：辐射发射测量 表面扫描法；
- 第4部分：传导发射测量 $1\ \Omega/150\ \Omega$ 直接耦合法；
- 第5部分：传导发射测量 工作法拉第笼法；
- 第6部分：传导发射测量 磁场探头法；
- 第8部分：辐射发射测量 带状线法。

本文件使用翻译法等同采用IEC 61967-6:2008《集成电路 电磁发射测量 第6部分：传导发射测量 磁场探头法》。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T XXXXX-XXXX 集成电路 电磁发射测量 第4部分：传导发射测量（IEC 61967-4:2006，IDT）

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本文件由全国半导体器件标准化技术委员会（SAC/TC78）归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

引 言

为规范集成电路电磁发射测量，以及为集成电路制造商和检测机构提供不同的电磁发射测量方法，GB/T XXXXX规定了集成电路电磁发射测量的通用条件、定义和不同测量方法的试验程序和试验要求，拟由9个部分构成。

- 第1部分：通用条件和定义，目的在于规定集成电路电磁发射测量的通用条件和定义。
- 第1-1部分：通用条件和定义 近场扫描数据交换格式，目的在于规定近场扫描数据交换格式。
- 第2部分：辐射发射测量 TEM小室和宽带TEM小室法，目的在于规定TEM小室和宽带TEM小室法的试验程序和试验要求。
- 第3部分：辐射发射测量 表面扫描法，目的在于规定表面扫描法的试验程序和试验要求。
- 第4部分：传导发射测量 1 Ω /150 Ω 直接耦合法，目的在于规定1 Ω /150 Ω 直接耦合法的试验程序和试验要求。
- 第4-1部分：传导发射测量 1 Ω /150 Ω 直接耦合法应用指南，目的在于给出1 Ω /150 Ω 直接耦合法应用指导。
- 第5部分：传导发射测量 工作台法拉第笼法，目的在于规定工作台法拉第笼法的试验程序和试验要求。
- 第6部分：传导发射测量 磁场探头法，目的在于规定磁场探头法的试验程序和试验要求。
- 第8部分：辐射发射测量 带状线法，目的在于规定带状线法的试验程序和试验要求。

集成电路 电磁发射测量 第 6 部分：传导发射测量 磁场探头法

1 范围

本文件规定了使用微型磁场探头以非接触式的电流测量来评估集成电路（IC）引脚射频（RF）电流的方法。该方法可以测量IC在150 kHz~1 GHz频率范围内产生的RF电流，适用于标准试验板上的单个或一组IC的测量，以用来表征和对比IC的RF电流。该方法也可用于评估实际使用的印制电路板（PCB）上的单个或一组IC的电磁特性以减小发射。该方法称为“磁场探头法”。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 61967-1 集成电路 电磁发射测量 150 kHz~1 GHz 第1部分：通用条件和定义（Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 1: General conditions and definitions）

IEC 61967-4 集成电路 电磁发射测量 150 kHz~1 GHz 第 4 部分：传导发射测量 1 Ω /150 Ω 直接耦合法（Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 4: Measurement of conducted emissions - 1 Ω /150 Ω direct coupling method）

3 术语和定义

IEC 61967-1界定的术语和定义适用于本文件。

4 概述

4.1 测量基础

PCB的辐射发射，部分是由电路板上IC产生的RF电流引起的，该RF电流激励PCB走线、PCB地平面和电源平面以及连接该PCB的电缆。以上这些都可以作为RF天线产生辐射发射。发射电平与驱动RF电流成正比，同时也受PCB的设计、“伪天线”的辐射效率以及从IC到“伪天线”的噪声耦合路径系数的显著影响。

对于这种发射机理，IC的驱动电动势是用户和制造商评估和预测PCB、模块或系统的电磁特性的重要参数。发射驱动电动势的度量可通过测量受试IC产生的RF电流来实现。因此，测得的RF噪声电流能反映IC非期望电磁发射的驱动电动势。

4.2 测量原理

受试IC电源引脚和I/O引脚的RF电流可使用一种微型三层磁场探头进行测量。用该探头以受控的方式测量标准试验板上电源或I/O带状导体上方规定高度处的磁场强度。利用8.2给出的公式，可由测得的磁场强度计算RF电流。由于磁场探头的精确机械放置，该方法的测量重复性高。此外，该方法的频

率范围可以扩展，但受5.2中所述的限制。在对测量准确度不会造成实质影响的情况下，可以测量更高的频率。评估电源或I/O带状导体上的RF电流是表征和对比IC的一种简便易行的方法。

5 试验条件

5.1 概述

通用试验条件应满足IEC 61967-1的要求。

5.2 频率范围

本测量方法的有效频率范围为0.15 MHz~1 GHz。如果需要，可以扩展频率上限，但受到试验布置的限制。测量频率范围的上限与磁场探头的高频特性以及附录B中所述的探头和受试导体的距离直接相关。在0.15 MHz~10 MHz的低频范围内，宜使用低噪声前置放大器以提高测量的动态范围。

6 试验设备

6.1 概述

试验设备的通用信息按照IEC 61967-1的规定。

6.2 磁场探头

磁场探头应为三层PCB构成的三板结构带状线。推荐的磁场探头结构细节见图1、图2、图3和图4。改进型磁场探头结构细节见附录E。

如图所示，SMA连接器固定在PCB边缘，与探头的矩形环部分相对。固定SMA连接器的焊盘分别在第1层和第3层，通过四个过孔相互连接。带状线导体位于第2层，该层连接至SMA连接器的中心引脚。

6.3 探头间距夹具和探头的放置

探头的输出电压取决于探头顶端和被测带状导体之间的距离。这使得在测量期间保持磁场探头顶端与带状导体之间1 mm的间距非常重要。因此，应使用探头间距夹具来保持探头矩形环部分的底部和IC试验板上带状线的距离为1 mm±0.1 mm，或者将整个探头模制和容纳进一个固定块中，以精确地保持规定的距离，如图10所示。

此外，探头的输出电压也取决于探头放置角度（ ϕ ）相对于被测微带线的方向。根据探头不同放置角度的实验结果，为使电压幅值误差小于-2 dB，探头放置角度应小于15°，详见附录D。

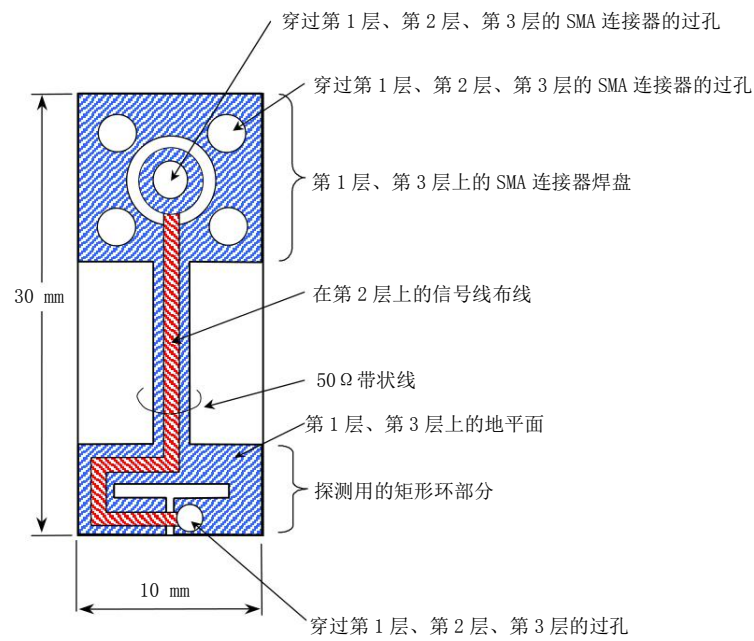


图 1 磁场探头

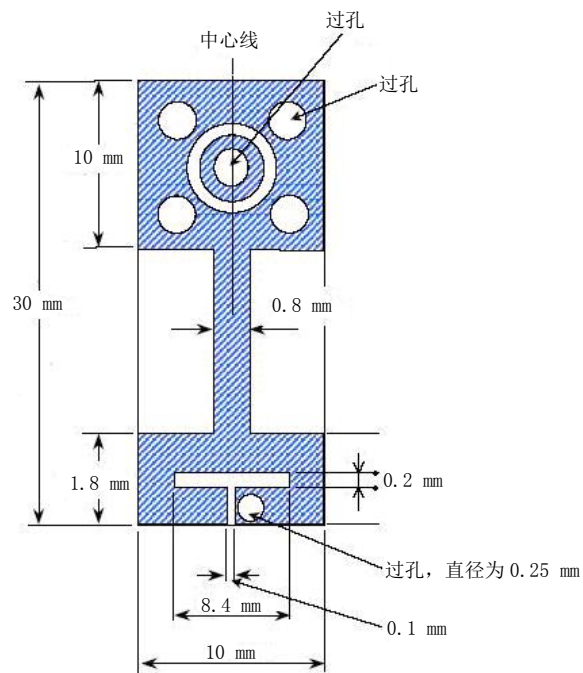


图 2 磁场探头的第 1 层和第 3 层

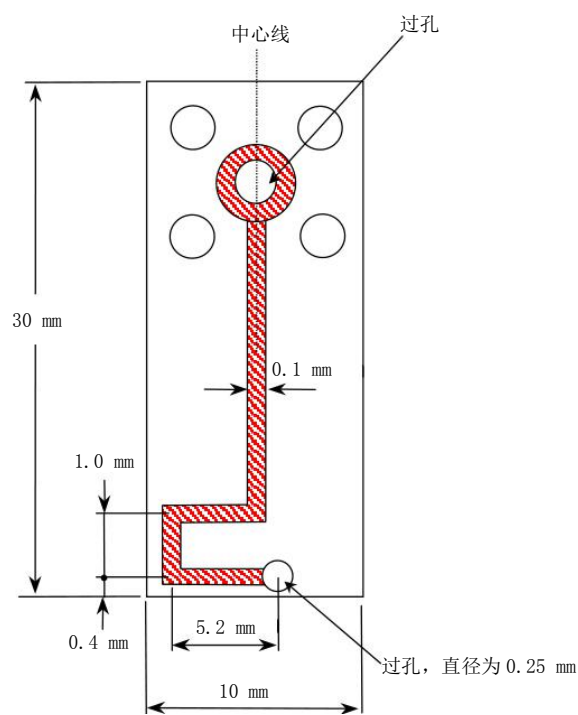


图 3 磁场探头的第 2 层

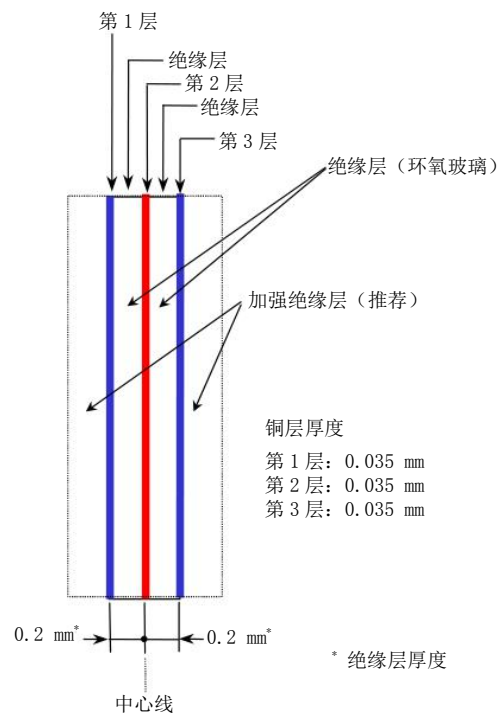


图 4 磁场探头的层结构

7 试验布置

7.1 概述

通用试验布置应满足IEC 61967-1的要求。

磁场探头测量方法的试验布置和电路原理分别如图10和图11所示。

7.2 探头校准

为获得测得的磁场强度和估算的RF电流之间准确的对应关系，应校准所用的磁场探头。应按附录A中的方法（微带线法）进行探头校准。

7.3 标准 IC 试验板的改进

应使用IEC 61967-1中所述的标准IC试验板，但是，应按图5、图6、图7、图8和图9对其进行相应的调整。

7.3.1 层的排列

IC试验板最少应有四层。宜使用图5和图6所示的四层IC试验板。如果需要，可以在顶层和微带接地层之间增加额外的层用于额外信号和/或电源的布线。通常情况下，除了下面指出的n层板情况，IC试验板的结构应满足IEC 61967-1的要求。

顶层（第1层）：受试IC应放在第1层上。按照IEC 61967-1的规定。

底层的上一层（第n-1层）：在第n-1层上应设计一个地平面以作为底层微带结构的参考平面。地平面能覆盖整个层，也可以只是微带结构下面的区域，如图7和图8所示的虚线部分。地平面的宽度最小应为11 mm，长度最小应为14 mm。

底层（第n层）：用于测量的微带导线和外围地平面应放在第n层。对于电源线和I/O线，微带导线应根据图7和图8。微带导线的宽度最大应为1 mm，以实现高的空间分辨率。详见附录C。为了避免驻波，微带导线的长度宜为14 mm~25 mm。

7.3.2 层的厚度

第n-1层和第n层之间的PCB绝缘层的厚度宜为0.6 mm。测量线和共面的地平面之间的共面间隙至少应为2 mm，且至少应为绝缘层厚度的3倍。

7.3.3 去耦电容器

在试验板的电源线和地平面之间应使用去耦电容器（C1, C2），如图11所示。电容器（C2）的放置应尽可能接近电源线的测量区域，以提供低的RF阻抗。C2与到V_{DD}焊盘的过孔间的距离应不超过25 mm，如图7所示。电容器（C1）应放置在IC的V_{DD}焊盘和IC地之间，如图9所示。

7.3.4 I/O 引脚负载

本测量方法可用于测量单个I/O引脚的RF电流。应对I/O引脚逐个进行电流测量。引脚负载的布局应符合图7和图8。引脚宜加载电阻为150 Ω 的阻抗匹配网络，如图11所示。阻抗匹配网络宜端接50 Ω 的电阻器（R3）或输入阻抗为50 Ω 的测量设备（接收机）。

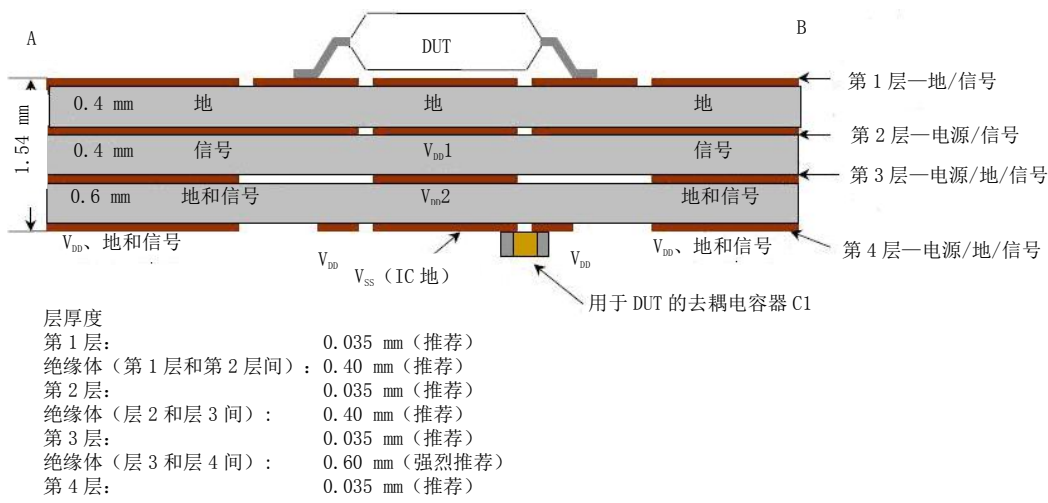


图5 标准 IC 试验板—剖面图 1

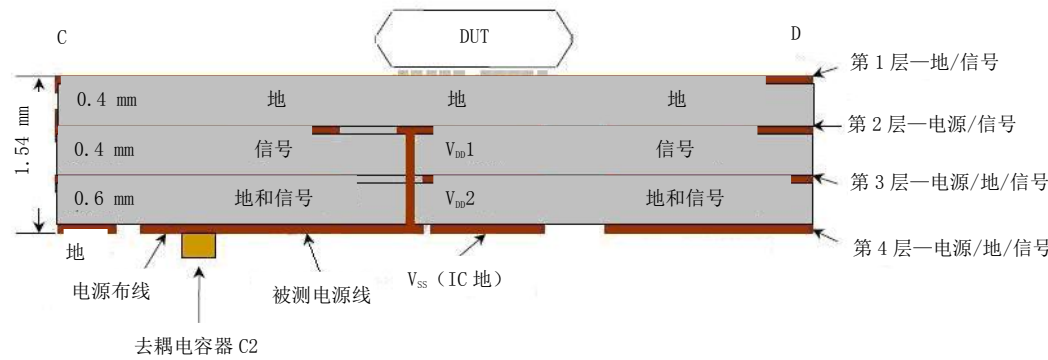


图6 标准 IC 试验板—剖面图 2—测量线

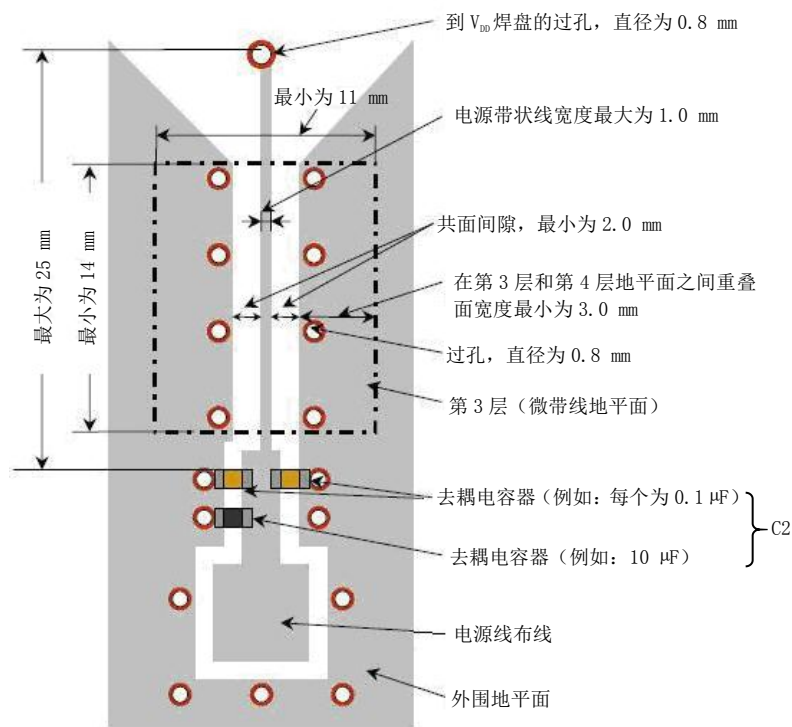


图 7 标准 IC 试验板上电源线布线—底层

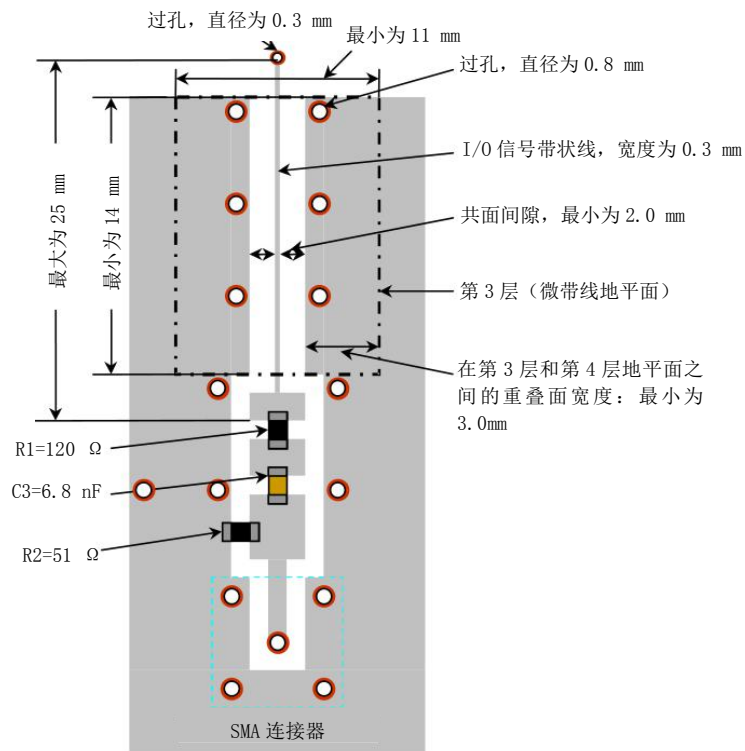


图 8 标准 IC 试验板上 I/O 信号线布线—底层

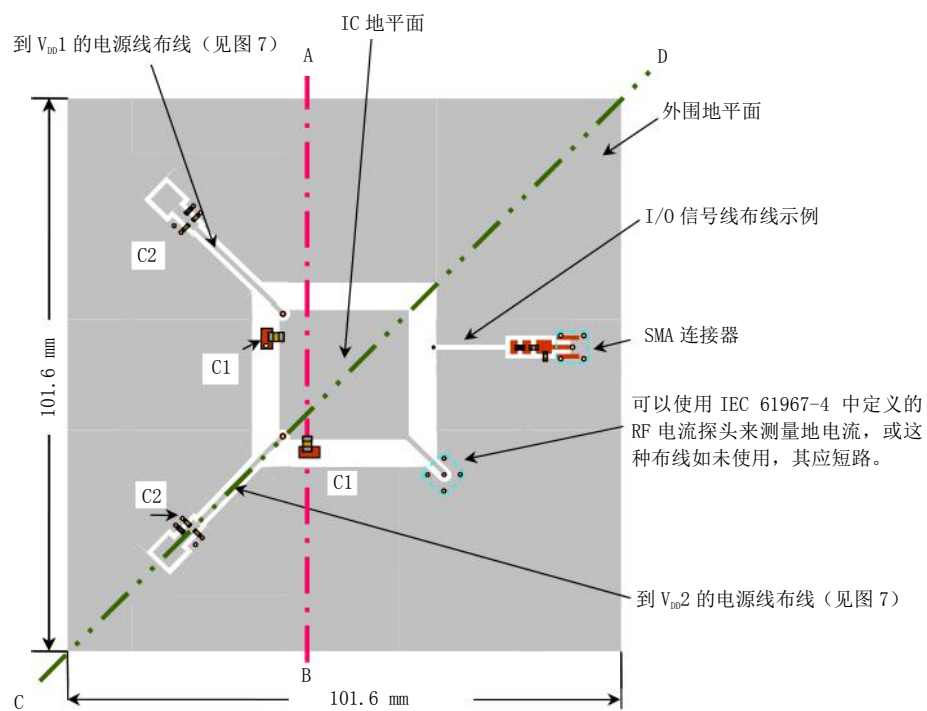


图 9 标准 IC 试验板上的多个电源线布线—底层

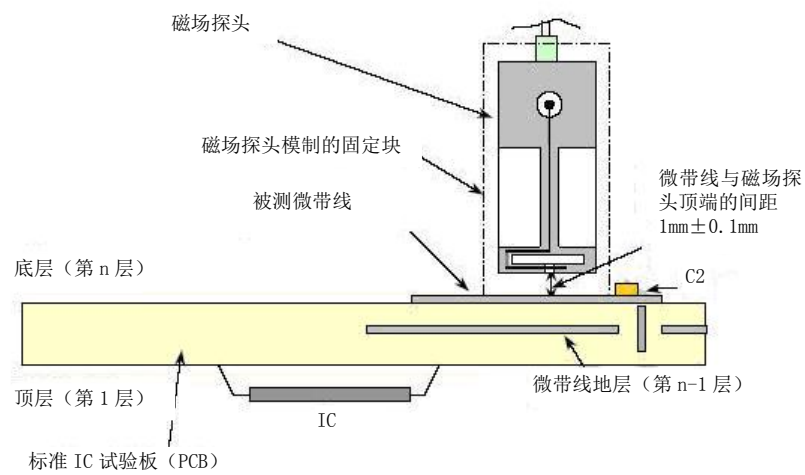
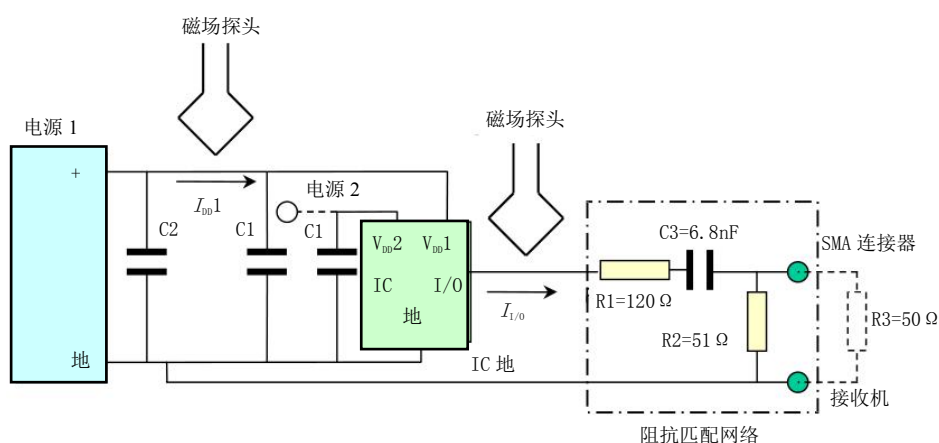


图 10 测量布置



8 试验程序

8.1 概述

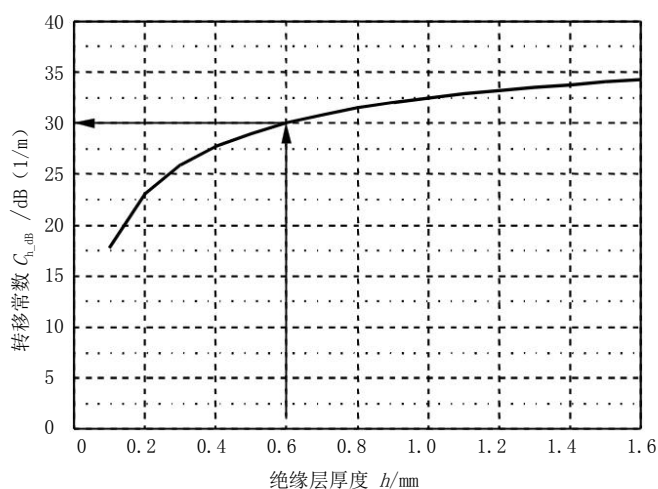
试验程序的通用要求按照IEC 61967-1。

8.2 试验技术

如6.3所述，磁场探头应放置在试验板上受试线表面上方一定距离处。按照IEC 61967-1的规定，使用频谱分析仪或测量接收机测量磁场探头的输出电压（ V_p ）。测得的 V_p 加上修正值 C_f （磁场探头的校准因子，按附录A和见附录B）通过附录B中的式（B.12）可计算得到磁场（ H_x dB）。

RF 电流 (I_{dB}) 则可以通过式 (B.13)，使用附录B给出的典型试验板示例的转移常数 (C_h) 得到。

$C_{h, dB}$ 的值与图12所示的微带板的绝缘层厚度相关。第n-1层和第n层之间的绝缘层厚度宜为0.1 mm~1.6 mm。对于推荐的绝缘层厚度（即 $h=0.6$ mm）， $C_{h, dB}$ 的值为30（dB（1/m））。对于绝缘层厚度不同的微带线板，通过选取图12中合适的 $C_{h, dB}$ 值，根据式（B.13）计算RF电流值。



9 试验报告

9.1 概述

试验报告应满足IEC 61967-1的要求。试验报告应包含所有特定的要求。

9.2 文件

试验报告应给出测量数据和参数，并应包含以下信息：

- 试验板材料及其规格；
- 第 $n-1$ 层与第 n 层之间绝缘层的厚度；
- 微带线导体宽度、共面间隙和特性阻抗；
- 去耦电容器（电容值、物理尺寸、使用数量和安装位置）。

所用试验板的描述（原理图、元器件列表、工艺图或照片等）也应包含在试验报告中。还应包括RF电流的测量数据。

数据应表示为每个测量点的频率以及对应测得的幅值数据的矩阵和/或该矩阵的图形。

试验报告也应包含数据处理的描述。

附录 A
(规范性)
探头校准程序—微带线方法

测量用磁场探头应按照以下描述的程序进行校准。可用微带线法获得磁场探头的校准因子，该方法的优点是能在正常工作条件下校准探头。如图A.2所示，在PCB板上的参考微带线上校准探头。该校准可使用与在试验板上常规IC发射测量相同的布置。这需要探头的准确空间放置，以最小化测量误差并确保发射测量的高重复性。

注：微带线法详见参考文献[5]。

A.1 前置放大器

必要时采用IEC 61967-1中规定的前置放大器。

A.2 频谱分析仪设置

采用制造商推荐的程序校准频谱分析仪。设置合适的衰减值，并将视频带宽设置为至少是分辨率带宽的三倍，以防止信号的视频平均。

A.3 微带线

采用如图A.1所示结构的微带线。所用微带线板的绝缘层厚度（ h ）应为0.6 mm，特性阻抗应为 $50\ \Omega \pm 5\ \Omega$ 。如果介电常数 $\epsilon_r=4.7$ ，带状导体的宽度（ W ）为1.0 mm。微带线的地平面宽度（ W_g ）宜至少为50 mm。微带线宜足够长（例如101.6 mm），并具有足够的高频性能。

为了检查特性阻抗，宜使用RF测量设备，如网络分析仪或具有时域反射计（TDR）测量功能的示波器。

注：在被测频率范围内，可预先确定获得足够信噪比(S/N)所需的功率。

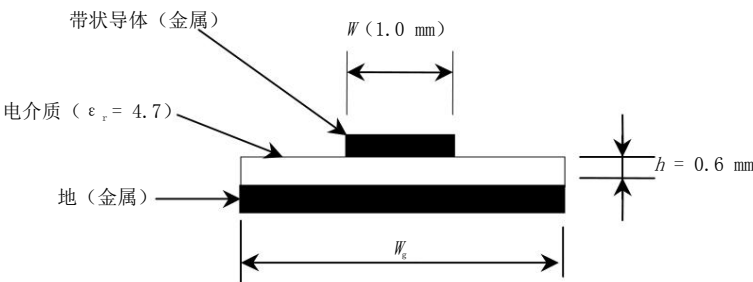


图 A.1 校准用微带线的横截面视图

A.4 校准

校准程序如下：

- a) 测量试验布置的增益或损耗，如使用了前置放大器，则测量时应包含前置放大器；
- b) 将探头放置于微带线的上方，使探头环的平面垂直于地平面并平行于微带线的纵轴。探头中心与微带线中心的距离应在 $\pm 0.4\text{ mm}$ 范围内。探头环面法线与微带线轴线的角度偏差应在 5° 以内。微带线表面到探头顶端的距离应保持为 $1.0\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 。应保持以上探头放置的限制，以尽可能

能准确地获得校准因子。在这些限制条件下，校准因子的最大误差估计在 ± 1.6 dB 范围内。按本文件规定的尺寸，探头灵敏度的偏差在 ± 1.0 dB 范围内。与放置因素相关的更多信息见附录 B、附录 C 和附录 D；

- c) 微带线的一端连接信号发生器，另一端连接 $50\ \Omega$ 终端负载。从磁场探头连接器连接电缆到频谱分析仪，如图 A.2 所示；
- d) 在被测频率范围内选择一个频点，用信号发生器在参考微带线的周围激励产生场，用频谱分析仪测量并记录探头感应到的 RF 信号电平；
- e) 在被测频率范围内的其他测量频点重复步骤 d)。测量得到的数据可用来绘制被校探头的校准曲线图。详见参考文献[5]；
- f) 用式 (A.1) 计算校准因子：

$$C_{f,\text{dB}} = 20\lg[h/\pi Y(Y+2h)] - V_{p,\text{dB}} + V_{s,\text{dB}} - 34 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 1})$$

式中：

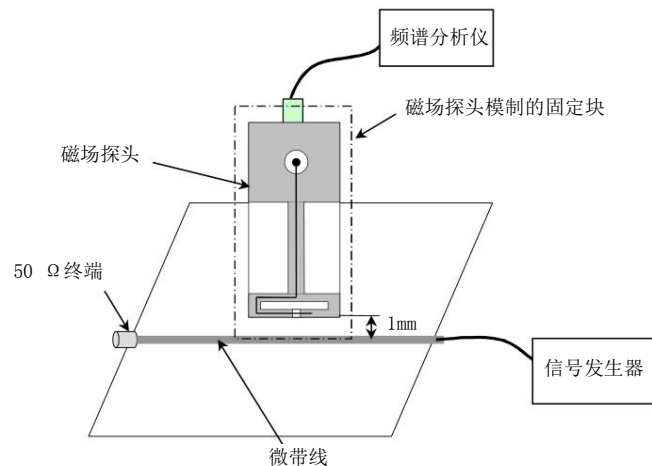
$C_{f,\text{dB}}$ ——磁场探头的校准因子，单位为分贝西门子每米[dB (S/m)]；

Y ——带状导体与磁场探头环中心之间的距离，单位为米 (m)；

h ——校准用微带板的绝缘层厚度，单位为米 (m)；

$V_{p,\text{dB}}$ ——磁场探头的输出电压，单位为分贝伏特 (dBV)；

$V_{s,\text{dB}}$ ——信号发生器的输出电压，单位为分贝伏特 (dBV)。



注：当磁场探头放置在微带线中心时，微带线的传输损耗是总损耗的一半。

图 A.2 探头校准的测量布置

附 录 B
(资料性)
测量原理和校准因子

无限长直导线上的电流 (I) 周围产生的磁通密度 (B) 可以用式 (B. 1) 计算:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \dots\dots\dots (B. 1)$$

式中:

B ——磁通密度, 单位为特斯拉 (T);

μ_0 ——真空磁导率;

I ——电流, 单位为安培 (A);

π ——圆周率;

r ——线电流与观测点之间的最短距离, 单位为米 (m)。

B 和磁场强度 (H) 的关系可以根据式 (B. 2) 定义。式 (B. 2) 在 $t \ll h < Y \ll$ 电流波长时有效。

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi r} \quad \dots\dots\dots (B. 2)$$

式中:

H ——磁场, 单位为安每米 (A/m)。

在图B. 1所示的例子中, 微带线上方磁场 (H) 可通过式 (B. 2) 得到。

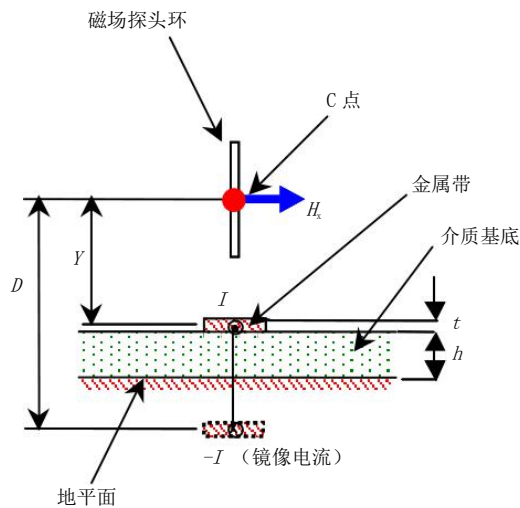


图 B. 1 微带线的横截面视图

在观察点 (C), 其位于与带状导体相距 Y 的磁场探头的中心, 通过将流过带状导体上的电流 I 及其镜像电流 $-I$ 产生的磁场相加得到磁场的水平分量 (H_x)。因此, 磁场 (H_x) (单位: A/m) 可用式 (B. 3) 表示:

$$H_x = \frac{I}{2\pi Y} - \frac{I}{2\pi D} \quad \dots\dots\dots (B. 3)$$

$$D = Y + 2h + t \quad \dots\dots\dots (B. 4)$$

式中:

Y ——带状导体与观察点C之间的距离, 单位为米(m);

D ——镜像电流与观察点C之间的距离, 单位为米(m);

h ——介质基底的厚度, 单位为米(m);

t ——带状导体的厚度, 单位为米(m)。

将式(B.4)代入式(B.3), 得到式(B.5), 其确定了微带线上方的磁场(H_x)。式(B.5)在 $t \ll h < Y \ll$ 电流波长时有效。

$$H_x = \frac{(2h+t)I}{2\pi Y(Y+2h+t)} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

假设 $t \ll h$, $t \ll Y$, 则式(B.5)变为:

$$H_x = C_h I = \frac{hI}{\pi Y(Y+2h)} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

这样, 用转移常数 C_h 清晰地表明 H_x 和 I 之间的关系, 电流(I) (单位: A) 由式(B.7)给出:

$$I = H_x \frac{\pi Y(Y+2h)}{h} \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

将本文件中描述的标准试验板下述推荐值代入式(B.7), 得到式(B.8):

$$t = 3.50 \times 10^{-5} \text{ (m)}, Y = 0.0019175 + t_r = 1.93 \times 10^{-3} \text{ (m)}, h = 6.00 \times 10^{-4} \text{ (m)}$$

其中, t_r 是保护层的厚度。然而这个值太小, 在多数电流计算中都可以忽略。

因此:

$$H_x = 31.7 \times I \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

所以:

$$H_{x_dB} = 20 \lg H_x = 30 + I_{_dB} \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

$$I_{_dB} = H_{x_dB} - 30 \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

式中:

H_{x_dB} ——以dB表示的磁场值, 单位为分贝安每米[dB(A/m)]。

$I_{_dB}$ ——以dB表示的电流值, 单位为分贝安培(dBA)。

因此, H_{x_dB} 减去30得到 $I_{_dB}$ 。这个基本公式将测得的磁场强度和待评估的每个带状导体的RF电流相联系。

对具有不同绝缘层厚度(h)的微带板, 宜使用图12中所示的合适的转移常数(C_h), 以代替式(B.9)和式(B.10)中的数值30。

实际上, 磁场(H_x)可通过图B.2所示的探头输出电压来测量。磁场探头(电流源)的输出连接至输入阻抗为50 Ω 的频谱分析仪。磁场探头上的电流由阻抗两端的电压测得。

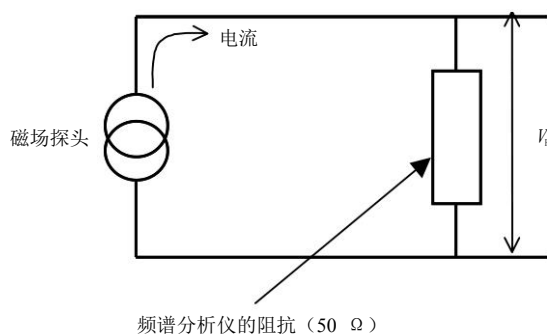


图 B.2 磁场探头输出的测量

因此，磁场（ H_x ）（单位：A/m）和磁场探头输出电压（ V_p ）之间的关系可用式（B. 11）表示：

$$H_x = C_f V_p \quad \dots\dots\dots (B. 11)$$

式中：

C_f ——磁场探头的校准因子，单位为西门子每米（S/m）；

V_p ——阻抗两端的电压，单位为伏特（V）。

磁场（ H_{x_dB} ）（单位：dB（A/m））的对数表达式由式（B. 12）给出：

$$H_{x_dB} = C_{f_dB} + V_{p_dB} \quad \dots\dots\dots (B. 12)$$

校准因子 C_{f_dB} 如图B. 3所示，其为测量值，对于本文件规定的磁场探头，按附录A中的校准方法得到校准因子。

将式（B. 12）代入式（B. 10）得到式（B. 13）：

$$I_{_dB} = V_{p_dB} + C_{f_dB} - C_{h_dB} \quad \dots\dots\dots (B. 13)$$

式中：

V_{p_dB} ——以分贝表示的 V_p ，单位为分贝伏特（dBV）；

C_{f_dB} ——以分贝表示的 C_f ，单位为分贝西门子每米[dB（S/m）]；

C_{h_dB} ——以分贝表示的 C_h ，单位为分贝每米[dB（1/m）]。

因此，实际上RF电流（ $I_{_dB}$ ）是计算得到的。

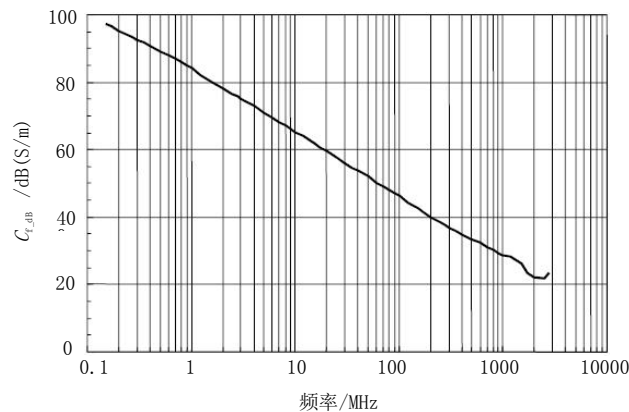


图 B.3 图 1、图 2、图 3 和图 4 中描述的磁场探头的校准因子示例

附 录 C

(资料性)

磁场探头的空间分辨率

图C. 1给出了微带线上方测量磁场分布的图。磁场探头的设计基于多层板，实现了高的空间分辨率，如图C. 2所示。

在标准试验板上，两条相邻走线的间距约为2 mm。距离为1 mm（在800 MHz）时，空间分辨率约为1.2 mm（下降6 dB处）。因此，相邻走线产生的磁场的影响很小，可以忽略。

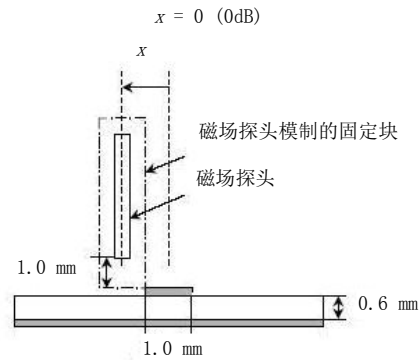


图 C. 1 测量磁场分布的图

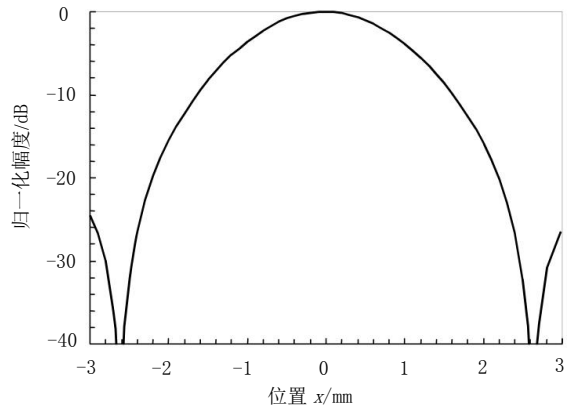


图 C. 2 微带线的磁场分布（800 MHz）

附录 D
(资料性)
探头的放置角度

测量磁场探头的放置角度 (ϕ) 相对于微带线的方向如图D. 1所示。

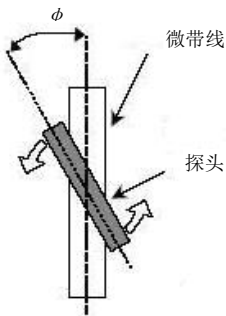


图 D. 1 测量磁场探头放置角度的示意图

探头的输出电压取决于测量时探头的放置角度 (ϕ) 相对于被测微带线的方向，如图D. 2所示。

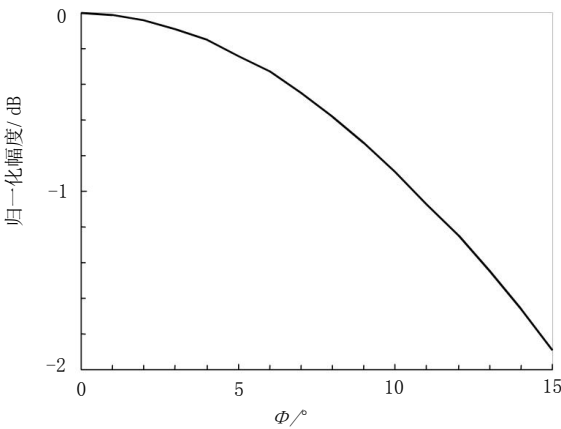


图 D. 2 探头输出与放置角度 ϕ 的关系

附 录 E

（资料性）

改进型磁场探头

E. 1 概述

微型磁场探头(改进型磁场探头)具有高的空间分辨率,能够对IC封装和密集PCB的近场磁场进行准确测量。该探头宜由低温共烧陶瓷(LTCC)板制成,其探测部分(探测环)宜为2 mm宽、1 mm厚。由于环尺寸的减小,这种小型化可导致磁场探头灵敏度的降低。探头的详细设计见图E. 1、图E. 2、图E. 3和图E. 4。然而,由于微型探头的环边缘更接近微带线,必要增益的减小可补偿其对磁场灵敏度的降低。

E. 2 改进型磁场探头夹具

改进前的磁场探头模型是一个屏蔽的环探头,采用多层FR4-PCB制作。改进前的磁场探头环部分不能做得足够小,从而不能测量PCB上短走线的电流。改进型探头是由精密的玻璃陶瓷多层板制作,既保证结构的紧凑性又保证高的空间分辨率。

图E. 1和图E. 2给出了探头的外视图。磁场探测环的尺寸减小为宽2 mm、厚1 mm。改进型磁场探头宜为3层LTCC板构成的三平板带状线。推荐的探头结构细节见图E. 3、图E. 4、图E. 5、图E. 6、图E. 7和图E. 8。在所有图中,括号里的数值均为示例。其他尺寸宜在下述的允差范围内。如果环部分不在允差范围内,测量误差将会增加。一段半刚性电缆,可以连接在如图E. 1和图E. 2所示的连接区域。连接处的特性阻抗需为50 Ω (频率到3 GHz)。图中所示的连接结构是一个LTCC板和半刚性电缆连接的例子。其他高频连接性好的结构也可以接受。

在图E. 4、图E. 5、图E. 6和图E. 7中,板材的相对介电常数是7.1,在LTCC板上的印制线是用银-钯(Ag-Pd)浆料印制成的。环形部分的印制线的最终尺寸具有 $\pm 2.5\%$ 的允差。括号中的尺寸也具有 $\pm 10\%$ 的允差。导体厚为15 μm ,允差为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。绝缘体(电介质)厚为120 μm ,允差为 $\pm 10\%$ 。在第1层和第5层的接地焊盘用金镀覆,厚约30 μm 。因此,可以增加接地焊盘的厚度,目的是将焊盘焊接到导体盒上。除非另有规定,否则印制线的尺寸具有 $\pm 10\%$ 的允差。

磁场的探测部分使用屏蔽环结构。此部分需使用精确的LTCC工艺进行严格制作。图E. 3示出了叠加的由5层玻璃陶瓷板制作的磁场探头的主层布线。第2层和第4层是接地层,对应同轴电缆的外壳;第3层是信号层,等效为中心导体。改进型探头的多层板的环和导线部分,除了过孔和信号布线外,相对第3层是对称的。带状线的特性阻抗设计为50 Ω ,这是考虑与测量系统的阻抗匹配。信号线的末端通过一个过孔连接到地。

改进前的探头在三板带状线的侧面(导线部分)有孔,但在图E. 3中,在第2层上地平面的两侧通过过孔连接到第4层。过孔的间距需为0.25 mm或更小。磁场探测环是一个0.2 mm $\times$ 1 mm的矩形。空间分辨率在6 dB下降点可以提高到250 μm (典型值)。如果测量目标是一条直走线,如微带线,则可以用电流校准因子把走线上测量到的磁场转化为电流。LTCC板上每一层的布线,理想对准的偏差需在10 μm 以内。探头的性能随着对准误差的增加而下降,这是因为探头的带状线特性阻抗偏离了50 Ω 。通过X射线进行筛选,对准误差超过10 μm 的不合格品需予以剔除。此外,LTCC板的前端面需精确切割并抛平。

第1层和第5层的接地焊盘如图E. 4和图E. 7所示。第1层的焊盘通过过孔连接到第2层,第5层上的焊盘通过足够数量的过孔连接到第4层。与第1层相比较,第5层的接地焊盘延长了。如图E. 5和图E. 6,走

线宽度逐渐减小形成窄走线。如图E. 4和图E. 7所示，地平面也呈锥形，因为第2层和第4层的布线呈锥形。图E. 8示出了LTCC板和半刚性同轴电缆的连接配置。连接结构由导体盒、LTCC板台阶部分、半刚性同轴电缆构成。如图E. 8所示，半刚性同轴电缆的中心导体焊接至LTCC板的第3层信号线的焊盘。由于LTCC板有一个台阶，因此第3层上的信号布线是暴露的。半刚性同轴电缆的中心导体可以与信号布线平行安装在信号布线上。半刚性同轴电缆的外导体与LTCC板的后边缘接触。此外，导体盒（铜）焊接到第1层和第5层上的接地焊盘，以覆盖和包围中心导体的接合部分。导体盒需与外导体焊接。此时，导体盒（铜）、外导体、接地焊盘可以理想无缝地焊接为一体。导体盒提高了接合部分的屏蔽性能，从而可以抑制输出噪声或者其他配线信号对传感器输出信号产生的电磁干扰。需通过调整信号焊盘和导体盒的尺寸，来设计包括导体盒在内的接合部分的特性阻抗，由于抑制了阻抗失配产生的反射损耗，从而可实现满意的高频信号的传输特性。

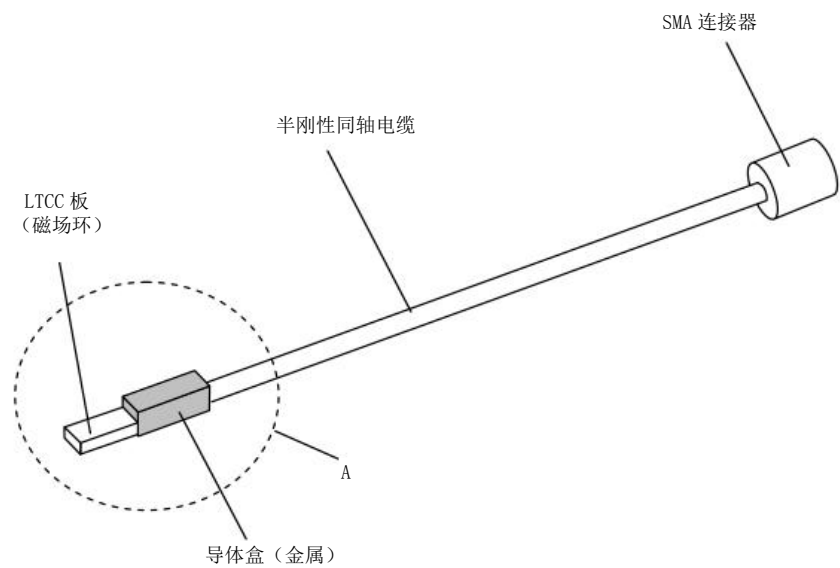


图 E. 1 改进型磁场探头装配图解

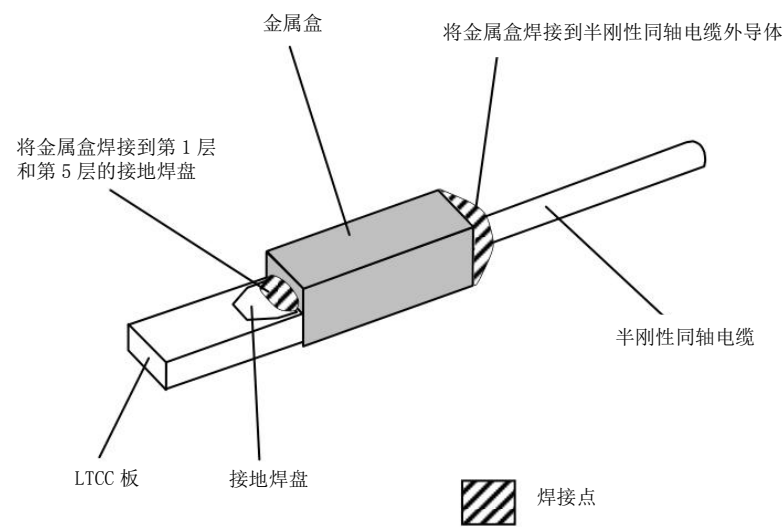


图 E. 2 图 E. 1 中 A 部分的放大视图（连接结构的示例）

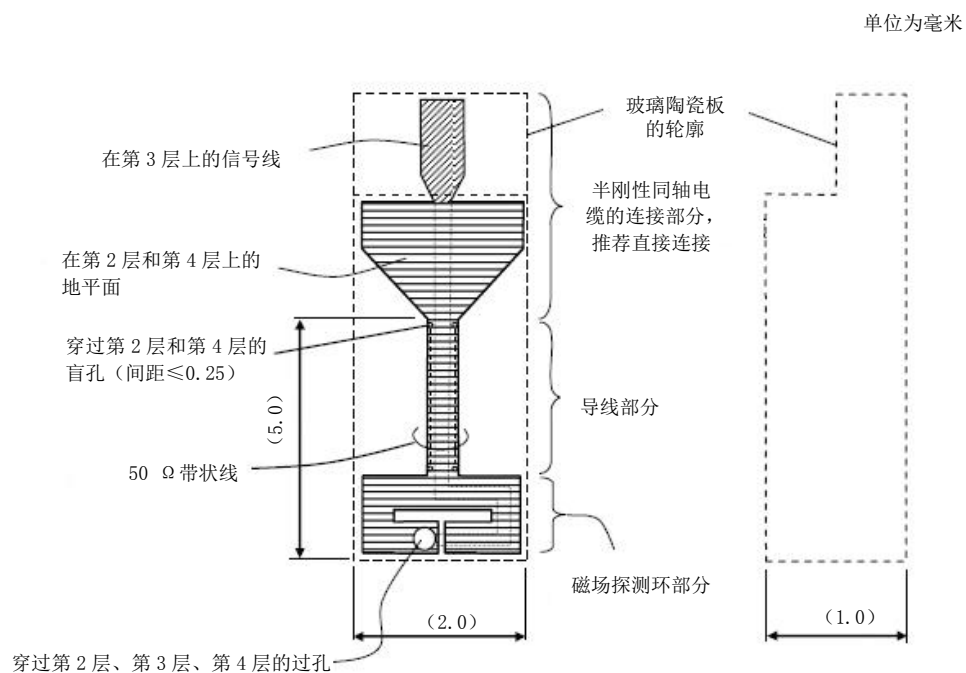


图 E.3 改进型磁场探头（第2层到第4层）的主要布线

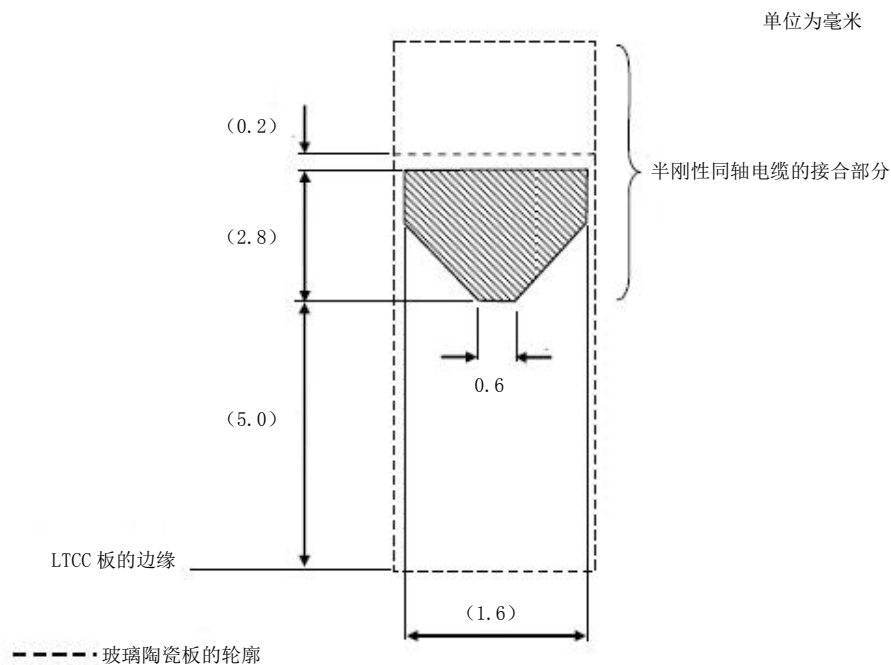


图 E.4 改进型磁场探头的第1层（接地布线）

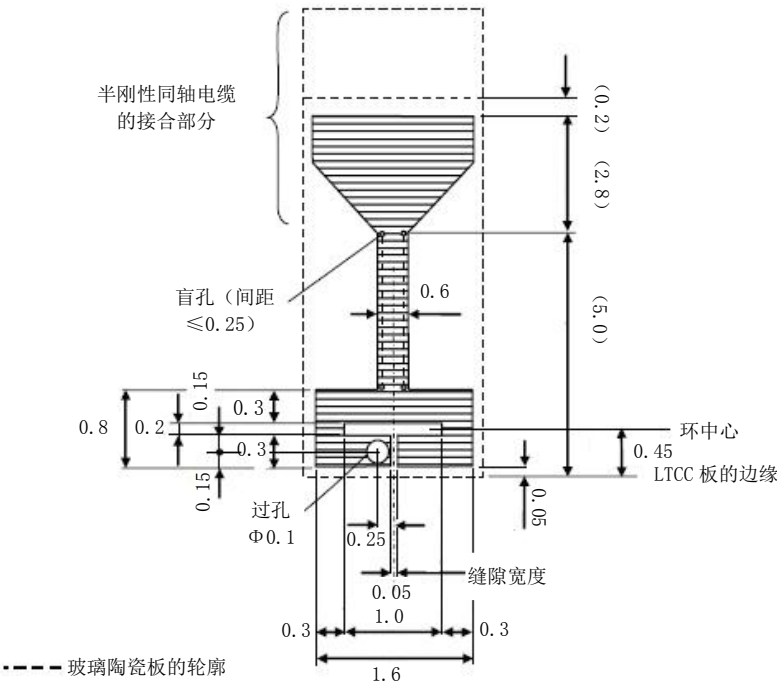


图 E.5 改进型磁场探头的第 2 层和第 4 层（接地布线）

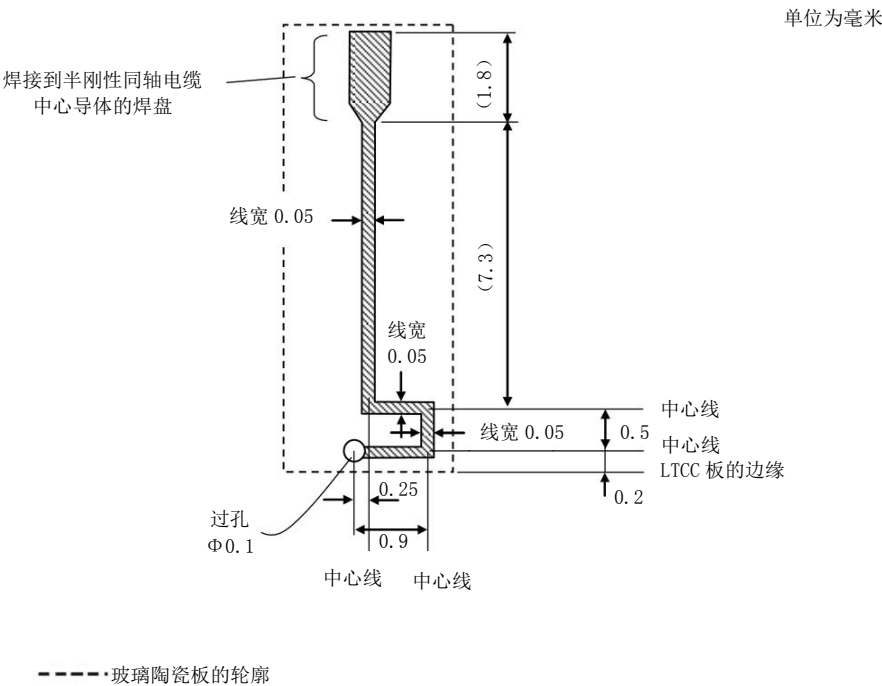


图 E.6 改进型磁场探头的第 3 层（信号布线）

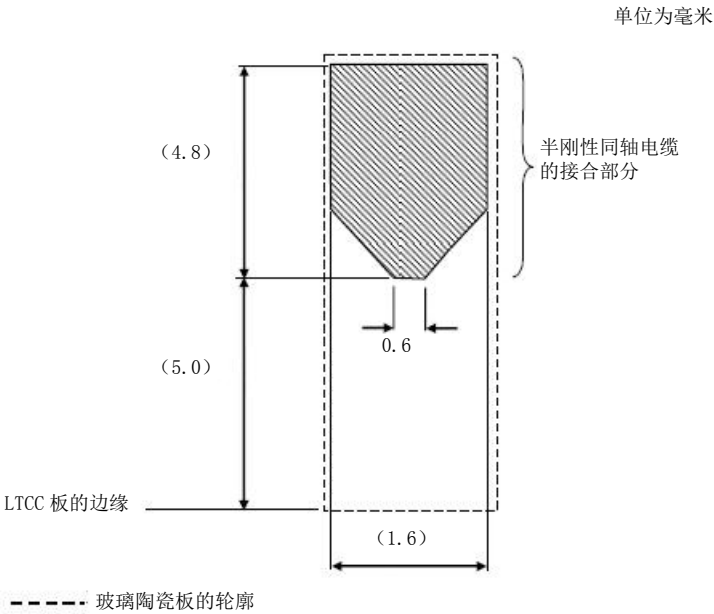


图 E.7 改进型磁场探头的第 5 层（接地布线）

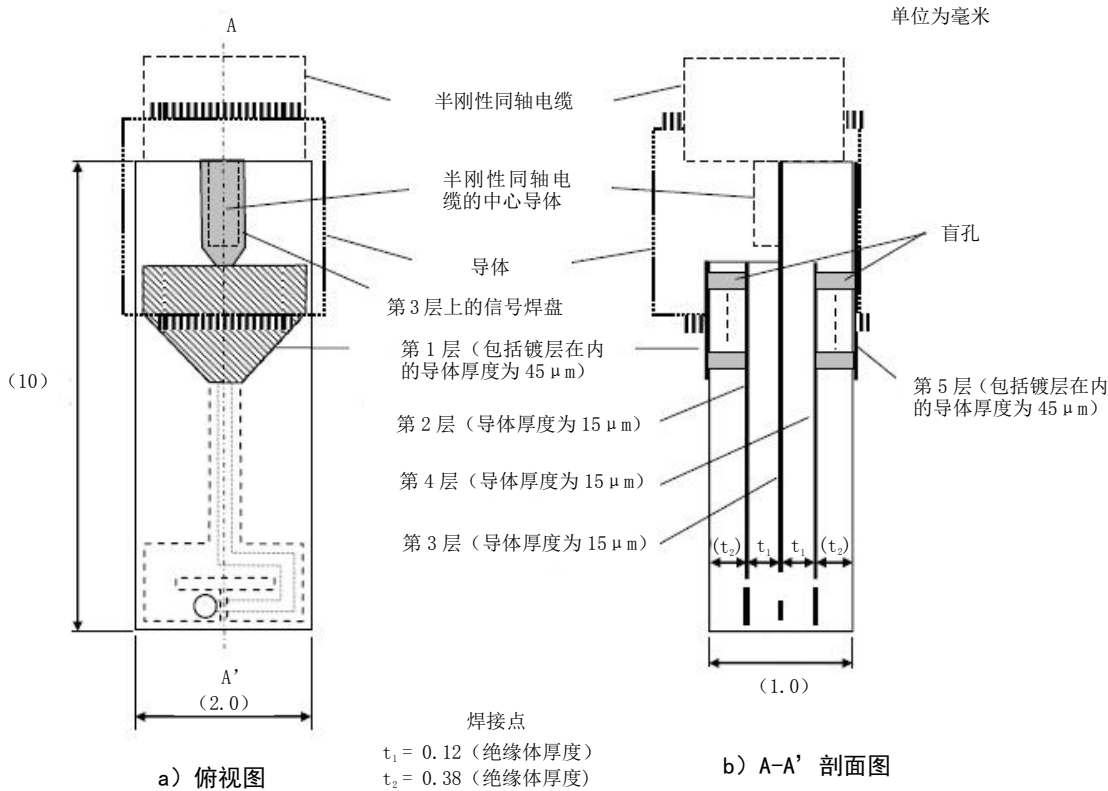


图 E.8 改进型磁场探头的结构

磁场探头的输出电压 (V_p) 取决于环中心和被测带状导体表面之间的距离 (D_m)。在图 E. 9 中，当试验板绝缘层的厚度为 0.6 mm 时，带状导体的宽度为 1.0 mm。特性阻抗为 $50 \Omega \pm 5 \Omega$ 。铜膜的厚度 (带状

导体) 需标准化。膜的厚度可以标准化为 $18\ \mu\text{m}\sim 35\ \mu\text{m}$ ，推荐值为 $35\ \mu\text{m}$ 。如图E. 10所示，环中心定义为第2层和第4层的接地布线的矩形孔。这使得测量时环中心与带状导体的距离保持在 $0.47\ \text{mm}$ ($470\ \mu\text{m}$) $\pm 20\ \mu\text{m}$ 范围内尤为重要。因此，宜使用探头间距夹具，使探头矩形环部分的底端与探头顶端的距离保持在 $0.07\ \text{mm}$ 。 D_m 为 $0.47\ \text{mm}$ 。

单位为毫米

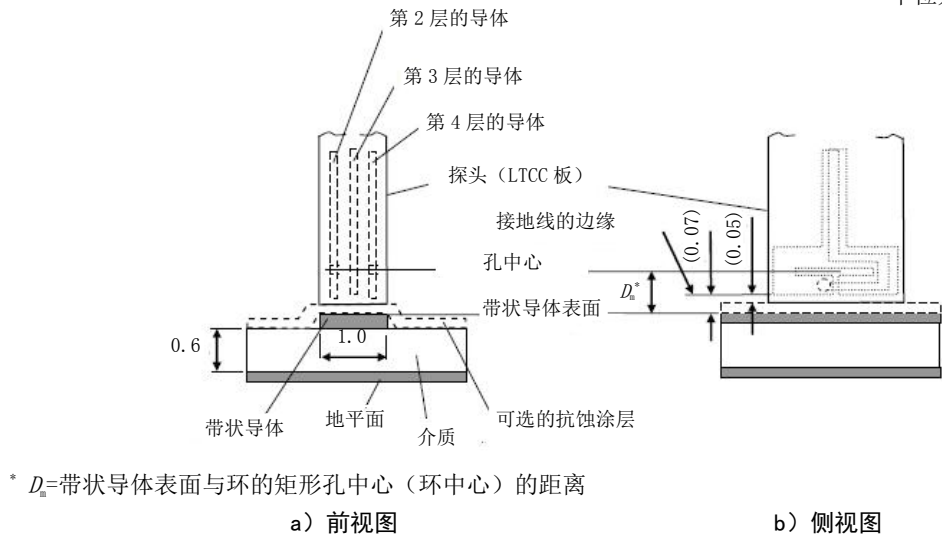


图 E. 9 测量配置

单位为毫米

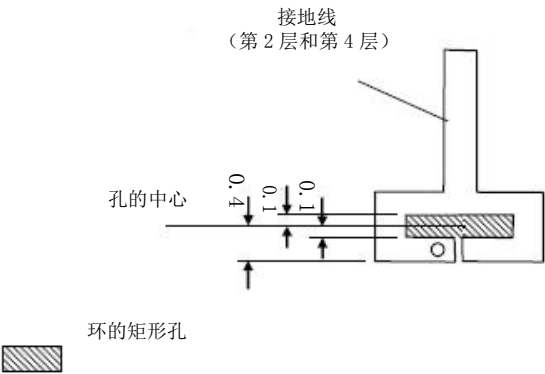


图 E. 10 环中心的定义

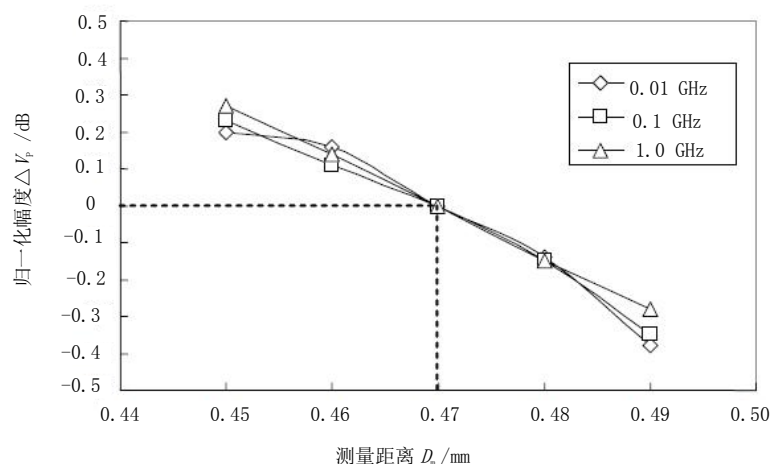


图 E.11 测量电压误差与测量距离的关系

E.3 磁场探头的空间分辨率

图E.12示出了测量微带线磁场分布的布置。如图E.13所示,该布置可实现高的空间分辨率。在 $D_0=0.47\text{ mm}$ 和 $f=1\text{ GHz}$ 条件下测量的空间分辨率为 0.7 mm (6 dB下降点)。因此,当探头放置在带状导体中心时,相邻走线产生的磁场的影响很小,可以忽略不计。试验板与图E.9的相同。

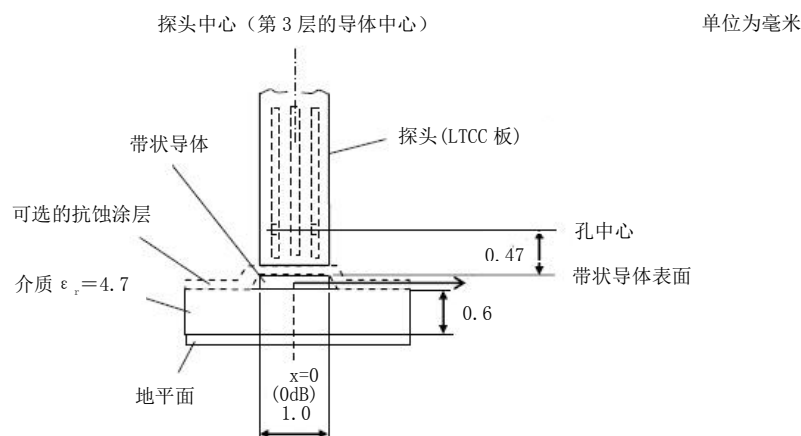


图 E. 12 测量磁场分布的布置

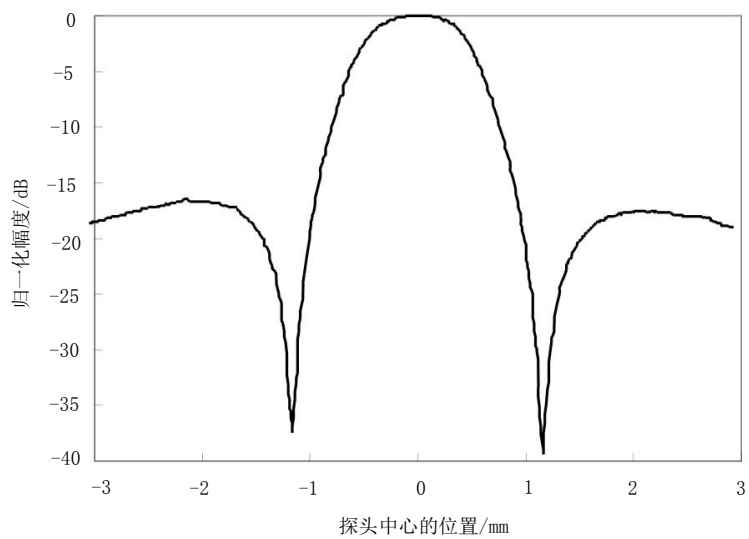


图 E. 13 微带线上的磁场分布 (1GHz)

E. 4 探头的放置角度

磁场探头相对于微带线方向的放置角度 (ϕ) 的测量布置如图E. 14所示。

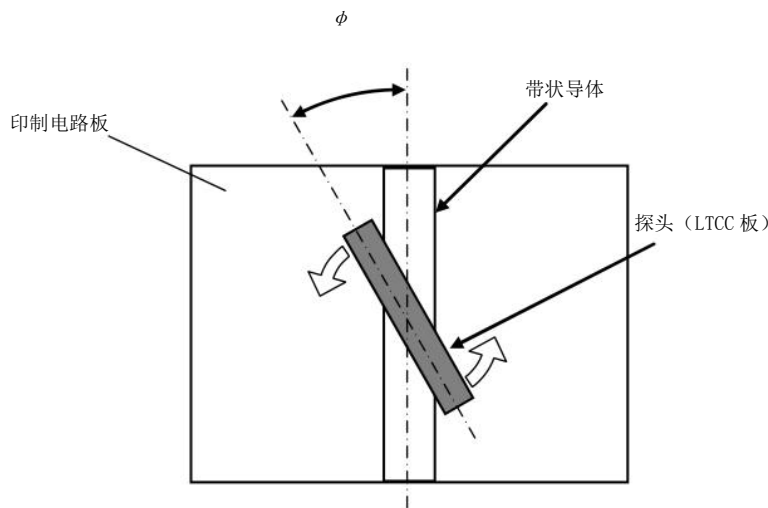
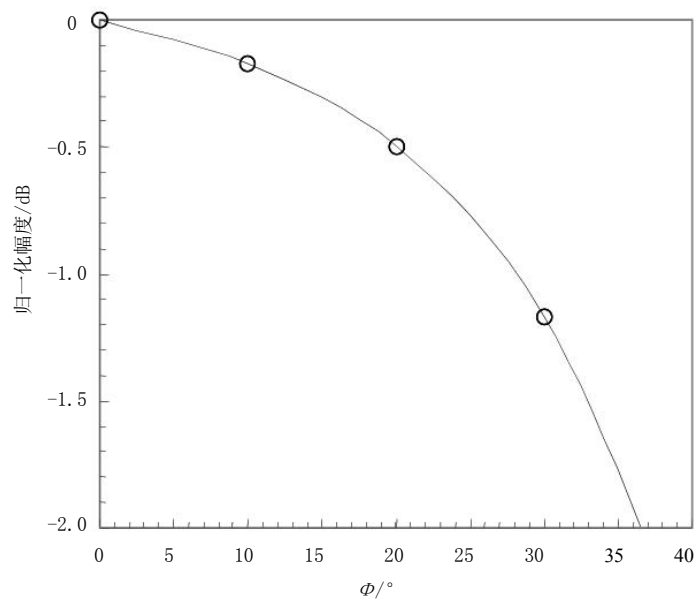


图 E. 14 探头放置角度的测量布置

磁场探头 (V_p) 的输出电压轻微取决于探头相对于微带线方向的放置角度 (ϕ)，如图E. 15所示。微带线与图E. 9的相同。带状导体和环中心的距离 (D_m) 为0.47 mm。

图 E.15 探头角度 ϕ 与探头输出幅度的关系 (D_m 为 0.47 mm)

E.5 校准因子

如图E.9所示, 磁场探头需放置在试验板上被测线表面上方一定的高度。按照IEC 61967-1的规定, 磁场探头的输出电压 (V_p) 通过频谱分析仪或测量接收机进行测量。对于附录B描述的试验板的典型示例, RF电流 (I_{dB} , 单位: dB A) 根据 V_p 的测量值、磁场探头的校准因子 (C_f) 和转移常数 (C_h), 通过式 (E.1) 计算得到。

$$I_{dB} = V_{p,dB} + C_{f,dB} - C_{h,dB} \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

$V_{p,dB}$ ——以分贝表示的 V_p , 单位为分贝伏特 (dB V);

$C_{f,dB}$ ——以分贝表示的 C_f , 单位为分贝西门子每米 (dB S/m);

$C_{h,dB}$ ——以分贝表示的 C_h , 单位为分贝每米 (dB 1/m)。

一种获得 I_{dB} 的方法是分别确定 $C_{f,dB}$ 和 $C_{h,dB}$ 。 $C_{f,dB}$ 可在适当的条件通过微带线方法测量, $C_{h,dB}$ 根据附录B计算。依据式 (B.6), 通过磁场 H 的 x 分量与微带线的电流 I 的比值计算转移常数 C_h 。在这种情况下, 图E.16 a) 给出的线电流模型用于计算附录B中的 H_x , 因为如式 (B.6) 所示, 距离 D_m 足够大。然而, 对于改进型磁场探头, 环区域的平均磁场的 x 分量 H_{x-ave} 需从图E.16 b) 所示的微带线带状导体的电流分布模型计算得到, 因为与图E.16 a) 所示的线电流模型比较, 测量距离更近。图E.16 b) 所示的电流模型是带状导体的真实电流分布模型^{[7], [8]}。如果很难确定电流密度分布的大小, 为了计算的简化^[9], 则可以使用近似均匀电流模型计算 H_{x-ave} 。

H_{x-ave} (单位: A/m) 可根据式 (E.2) 计算:

$$H_{x-ave} = \left| \frac{1}{S_{eq}} \sum_{k=1}^N \int_{S_{eq}} [H_{+x}(i_k) + H_{-x}(-i_k)] dS \right| \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

其中 $H_x(i_k)$ 和 $H_x(-i_k)$ 是通过带状导体的分布电流 i_k 和镜像电流 $-i_k$ 计算的分段 k 的磁场的 x 分量。 S_{eq} 是等效的环面积。 $(N i_k)$ 等于总电流 I 。分布电流模型的转移常数($C_{h-distributed}$)通过 H_{x-ave} 与电流 I 的比值计算,如附录B所述。把式(E.1)中的 C_h 用 $C_{h-distributed}$ 代替,得到计算 I_{dB} (单位: dBA)的式(E.3)。

$$I_{dB} = V_{p_dB} + (C_{f_dB} - C_{h-distributed_dB}) \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

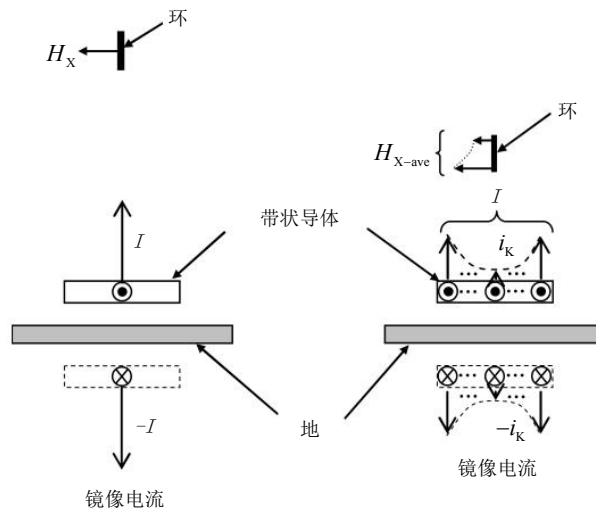
V_{p_dB} ——阻抗两端电压的分贝值,单位为分贝伏特(dB V);

C_{f_dB} ——磁场校准因子的分贝值,单位为分贝西门子每米(dB S/m);

$C_{h-distributed_dB}$ ——电流分布模型的转移常数的分贝值,单位为分贝每米(dB 1/m)。

电流分布模型的实验结果见参考文献 [7]–[10]。通过计算得到的 $C_{h-distributed_dB}$ 是有效的。

当PCB尺寸变化时, H_{x-ave} 也随之变化。在最差情况下(绝缘层厚度(h)、抗蚀层厚度(t_r)、线宽(W)和导体厚度(t_s)的偏差为10%)的估计值为0.89 dB,这足以满足测量的准确度。



a) 电流集中在带状导体中心的线电流模型

b) 考虑边缘效应的电流分布模型

图 E.16 微带线的带状导体的电流模型

校准的目的并不是为了获得中间参数,因此,没有必要通过复杂的计算获得式(E.3)中的 $C_{h-distributed_dB}$ 。不通过式(E.2)的计算而直接获得电流 I 是可行的。因为测量距离为常数($D_m = 0.47$ mm), $(C_{f_dB} - C_{h-distributed_dB})$ 仅依赖于图E.9条件下的微带线参数。E.6描述了通过测量获得 $(C_{f_dB} - C_{h-distributed_dB})$ 的方法。

图E.17给出了当绝缘层厚度(h)和带状导体宽度(W)变化时计算的 $C_{h-distributed_dB}$,其由 H_{x-ave} 与电流 I 之比计算获得。此时测量距离(D_m)等于0.47 mm。当使用的微带线尺寸与图E.17中不同时,需使用与(W, h)对应的校准因子 $(C_{f_dB} - C_{h-distributed_dB})$ 。但是,采用E.6所述的程序进行重复校准是无效的。对于绝缘层厚度(h)和带状导体宽度(W)不同的试验板,可通过式(E.4)用转移常数 $C_{h-distributed_dB}(W_{cal}, h_{cal})$ 和 $C_{h-distributed_dB}(W, h)$ 计算电流值。 $C_{h-distributed_dB}(W_{cal}, h_{cal})$ 和 $C_{h-distributed_dB}(W, h)$ 可从图E.17中得到。与图E.9

相同的条件下在微带线测得的 ($C_{f_dB} - C_{h_distributed_dB}$) 的示例见图E. 18。非50 Ω 线路的电流也可以通过式 (E. 4) 得到。

$$I_{dB} = V_{p_dB} + (C_{f_dB} - C_{h_distributed_dB}(W_{cal}, h_{cal})) + \Delta C_h \quad \text{..... (E. 4)}$$

$$\Delta C_h = C_{h_distributed_dB}(W_{cal}, h_{cal}) - C_{h_distributed_dB}(W, h) \quad \text{..... (E. 5)}$$

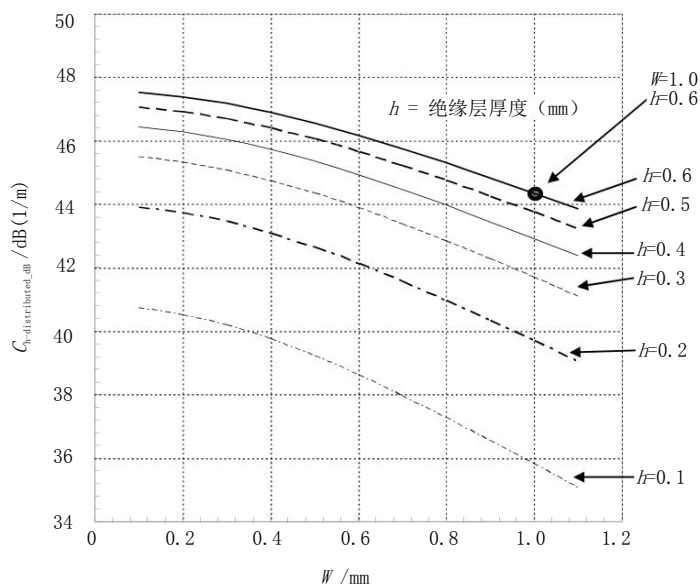


图 E. 17 不同板参数的校准因子

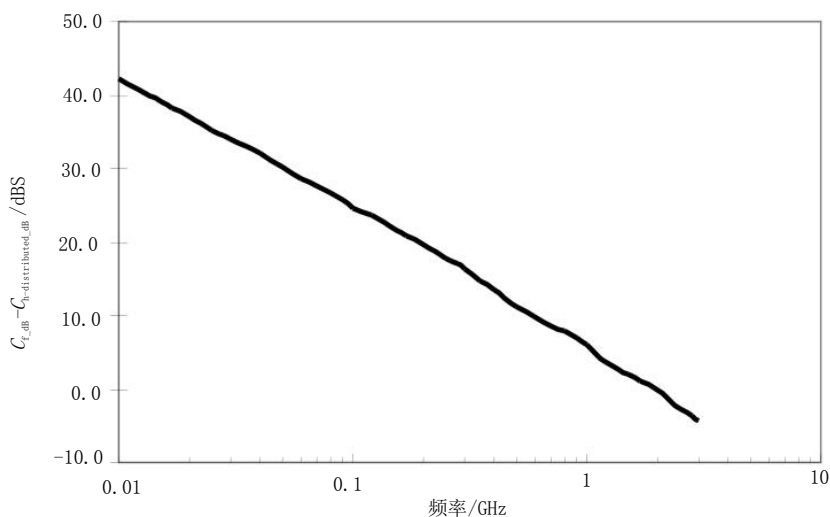


图 E. 18 与图 E. 9 相同的条件下 ($W=1.0$ mm、 $h=0.6$ mm) 在微带线测得的 ($C_{f_dB} - C_{h_distributed_dB}$) 的示例

E. 6 探头和微带线的校准

E. 6.1 概述

测量用磁场探头需按照以下描述的程序进行校准。可用微带线法获得磁场探头的校准因子 ($C_{h_distributed_dB} - C_{f_dB}$)，该方法的优点是能在正常工作条件下校准探头。

图E. 14示出了在PCB板上的参考微带线上校准探头。除了测量距离不同外，该校准可使用与在试验板上常规IC发射测量相同的布置。这需要探头的准确空间放置，以最小化测量误差和确保发射测量的高重复性。

E. 6.2 前置放大器

必要时采用 IEC 61967-1 中规定的前置放大器。

E. 6.3 频谱分析仪设置

采用制造商推荐的程序校准频谱分析仪。设置合适的衰减值，并将视频带宽设置为至少是分辨率带宽的三倍，以防止信号的视频平均。

E. 6.4 微带线

使用微带线结构来校准探头，图E. 19给出了示例。特性阻抗需为 $50\ \Omega \pm 5\ \Omega$ 。带状导体宽度(W)为1mm，微带板的绝缘层厚度(h)为0.6 mm。微带线的地平面宽度(W_g)宜足够宽(例如50 mm)。微带线宜足够长(例如50 mm)，以减小两边连接器的影响，并具有足够的高频性能。为了检查特性阻抗，宜使用RF测量设备，如网络分析仪或具有时域反射计(TDR)测量功能的示波器。

注：在被测频率范围内，可预先确定获得足够信噪比(S/N)所需的功率。

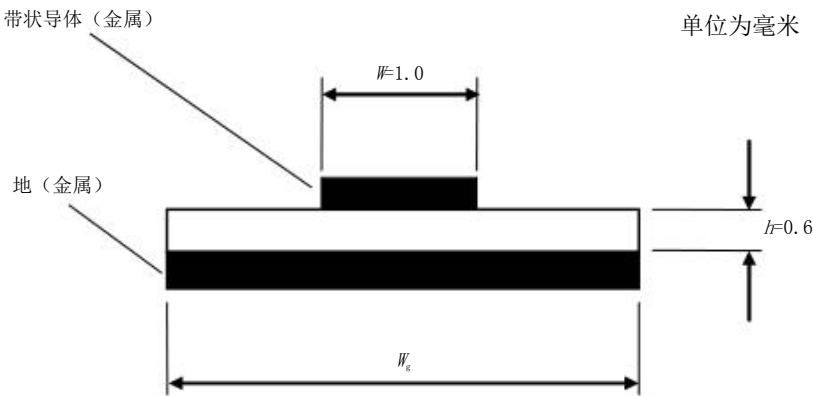


图 E. 19 校准用微带线的横截面视图（示例）

E. 6.5 校准

校准程序如下：

- a) 测量试验布置的增益或损耗，如使用了前置放大器，则测量时需包含前置放大器；
- b) 将探头放置于微带线的上方，使探头环的平面垂直于地平面并平行于微带线的纵轴。探头中心与微带线中心的距离需在 $\pm 0.2\text{mm}$ 范围内，或者找到一个探头输出电压最大的位置。探头环面法线与微带线轴线的角度偏差需在 5° 以内。微带线表面到环中心的距离需保持为 $0.47\text{mm} \pm 20\ \mu\text{m}$ 。需保持以上探头放置的限制，以尽可能准确地获得校准因子。在这些限制条件下，校准因子的最大误差估计在 $\pm 1.6\text{ dB}$ 范围内。
按本文件规定的尺寸，探头灵敏度的偏差在 $\pm 1.0\text{ dB}$ 范围内。与放置因素相关的更多信息见 E. 2、E. 3 和 E. 4；

- c) 微带线的一端连接信号发生器，另一端连接 50 Ω 终端负载。从磁场探头连接器连接电缆到频谱分析仪，如图 E. 20 所示；
- d) 在被测频率范围内选择一个频点，用信号发生器在参考微带线的周围激励产生场，用频谱分析仪测量并记录探头感应到的 RF 信号电平；
- e) 在被测频率范围内的其他测量频点重复步骤 d)。测量得到的数据可用来绘制被校探头的校准曲线图；
- f) 使用式 (E. 6) 来计算校准因子 ($C_{f_dB} - C_{h_distributed_dB}$) (单位: dB S)。

$$C_{f_dB} - C_{h_distributed_dB} = V_{s_dB} - V_{p_dB} - 20 \lg 50 \quad \dots\dots\dots (E. 6)$$

式中:

C_{f_dB} ——磁场的校准因子，单位为分贝西门子每米 (dB S/m)；

V_{p_dB} ——磁场探头的输出电压，单位为分贝伏特 (dBV)；

V_{s_dB} ——信号发生器的输出电压，单位为分贝伏特 (dBV)；

$C_{h_distributed_dB}$ ——从电流分布模型计算的转换常数，单位为分贝每米 (dB 1/m)。

注：当磁场探头放置在微带线中心时，微带线的传输损耗是总损耗的一半。

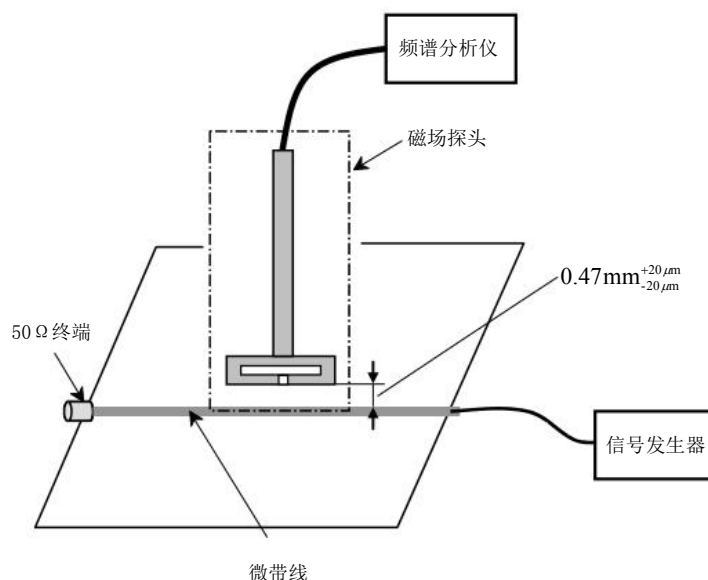


图 E. 20 探头校准的测量布置

E. 7 试验板

试验布置按照 IEC 61967-1 的要求。

测量布置及磁场探头测量法的电路原理图见第 7 章。

如第 7 章所述，需使用标准 IC 试验板。然而，由于改进型磁场探头宽度的减小，可根据探头对 IC 试验板进行修改。IC 试验板的基本设计示例见图 E. 21 和图 E. 22。 V_{DD} 测量线和地平面设计在底层。IC 试验板的 V_{DD} 测量线见图 E. 22。测量线的基本设计与图 9 中所示的相同。测量线与地平面的间隙为 2 mm。但是这个间隙需根据去耦电容器的尺寸进行调整。如果去耦电容器两级间的长度较大，在安装区的测量线和地平面之间的间隙需放宽。线宽也宜根据去耦电容器的尺寸进行调整。穿过地平面的过孔以 1 mm 节距进行布置。由于磁场探头的小型化，测量线的长度可减小为 3 mm。对于层的布置、层厚度、去耦电容器、I/O 引脚负载以及 IC 试验板的其他详细设计，宜参考图 5、图 6 和图 10。

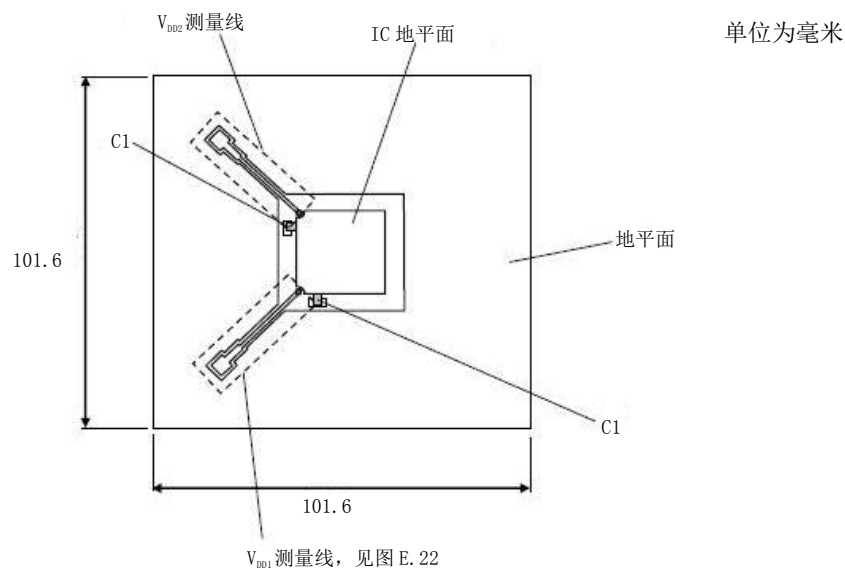


图 E. 21 IC 试验板的示例—底层

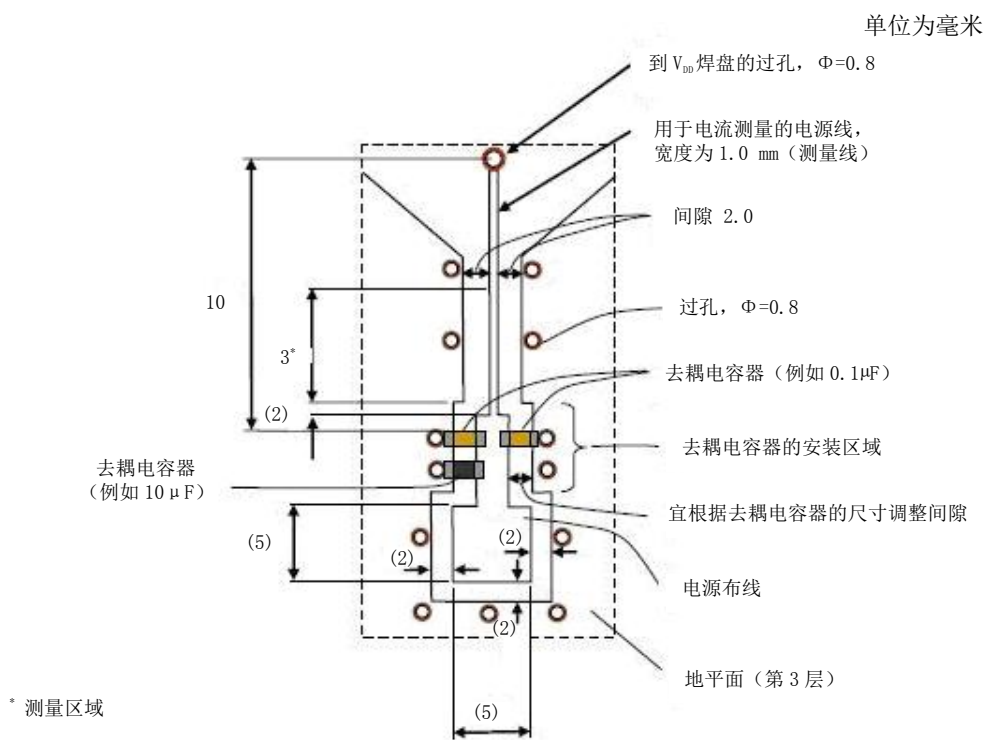


图 E. 22 V_{DD1} 测量线示例

参考文献

- [1] PAUL, Clayton R., NASAR, Syed A., Introduction to Electromagnetic Fields, second edition (Chapter 4), McGraw-Hill, Inc. (1987).
 - [2] WABUKA, H., MASUDA, N., TAMAKI, N., TOHYA, H., WATANABE, T., YAMAGUCHI, M. and ARAI, K., Estimation of the RF Current at LSI Power Terminal Using Magnetic Probe with Multilayer Structure, Technical Report of IEICE EMCJ98-6, pp. 39-43 (1998 April).
 - [3] MASUDA, N., TAMAKI, N., WABUKA, H., WATANABE, T. and ISHIZAKA, K., RF Current Evaluation for ICs by MP-10L, NEC R&D Review, Vol. 40, No. 2, pp. 253-258 (1999 April).
 - [4] MASUDA, N., TAMAKI, N., WABUKA, H., WATANABE, T. and ISHIZAKA, K., A Multilayer Board-type Magnetic Field Probe with High Spatial Resolution and RF Current Estimation Method for ICs, 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility in Tokyo (EMC'99/Tokyo), pp. 801-805, Advanced Products and Technology Session (APTS), S14, (1999 May).
 - [5] Time-Domain Magnetic Field Waveform Measurement Near Printed Circuit Boards, Electrical Engineering in Japan Vol. 125, No. 4, 1998, translated from Denki Gakkai Ronbunshi, Vol. 117 - A, No. 5, May 1997, pp. 523-530, by T. Harada, H. Sasaki, and E. Hankui.
 - [6] Norio MASUDA, Naoya TAMAKI, Takeshi WATANBE and Kazuyoshi ISHIZAKA: "A Miniature High-Performance Magnetic-Field Probe for Measuring High-Frequency Currents," NEC Res. & Develop., Vol. 42, No. 2, pp. 246-250, April, 2001.
 - [7] Naoya Tamaki, Norio Masuda, Toshihide Kuriyama, Jin-Ching Bu, Masahiro Yamaguchi, and Ken-Ichi Arai: "A Miniature Thin-Film Shielded -Loop Probe with a Flip-Chip Bonding for Magnetic Near Field Measurements," Electronics and Communication in Japan, Part 2, Vol. 88, No. 4, pp. 37- 45, 2005.
 - [8] N. ANDO, N. MASUDA, T. KURIYAMA, M. Saito, S. Saito, K. Kato, K. Ohashi, and M. Yamaguchi: "Development of miniaturized thin-film magnetic field probes for on-chip measurement," J. Magn. Soc. Jpn., 30, 429-434 (2006).
 - [9] Toshiki SHIMASAKI, Katsuji KOBAYASHI, Norio MASUDA and Naoya TAMAKI: "Development of measurement method of high-frequency current for the wide microstrip line", Proceedings of JIEP Annual Meeting, Vol. 18, pp. 227-228, Japan Institute of Electronics Packaging, Mar., 2004.
 - [10] Norio MASUDA, Naoya TAMAKI, Jin Chin BU, Masahiro YAMAGUCHI and Ken-Ichi ARAI : "High Frequency Magnetic Near field Measurement on LSI chip using Planar Multi-layer Shielded Loop Coil," 2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 80-85, Aug., 2003.
-