

圆片测试中的熔丝修调方法研究*

高 剑 赵 影 李 杰

(北京自动测试技术研究所 集成电路测试技术北京市重点实验室 北京 100088)

摘要: 熔丝修调因工艺简单、速度快,被广泛用于混合信号电路芯片的圆片测试中,但其类型多样,控制电路繁琐,修调受电阻变化的影响且不可恢复,因此精度不易控制,测试效率低。针对此问题,提出一种对串行、并行结构通用的测试系统修调控制电路,展示了减小测试误差的计算方法,最后,改进了传统测试流程,提出了以合并测试步骤及并行测试为基础的简化方法。测试结果表明,该方法操作性强,能够有效提高测试效率和准确率。

关键词: 混合信号电路;修调;熔丝;圆片测试

中图分类号: TN407 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3010

Research of the fuse trimming method in wafer test

Gao Jian Zhao Ying Li Jie

(Beijing Key Laboratory of Integrated Circuit Testing Technology, Beijing Automation Test Technology Institute, Beijing 100088, China)

Abstract: Fuse trimming test is widely used in wafer test process of mixed signal circuit chip, however it's difficult to control test precision and the test efficiency is low because it has many kinds of types, the control circuit is complex and trimming is easily affected by changing in the resistance. Aiming at the problems, a test system control circuit for serial and parallel architecture of trimming is put forward, and a calculation method of reducing test error is displayed. Finally, the traditional test process is improved and a simplified procedure based on the combined test steps and parallel tests is made out. The test result turns out that this method can effectively improve test efficiency and accuracy.

Keywords: mixed signal circuit; trim; fuse; wafer test

1 引言

在混合集成电路的设计中,因为工艺的不确定性,生产芯片的参数与设计仿真的期望值可能存在偏差,尤其是难以保证电阻值的准确,其误差可能达到10%以上^[1]。为确保输出参数的可靠性,出厂前必须对芯片内部的阻值进行微调,即修调,从而使电路整体参数符合预期^[2]。修调技术广泛应用于对基准电压源,D/A,A/D转换器的电压精度微调^[3-4]和V/F转换器等电路的频率精度^[5]微调中。电路修调以精确测量为基础,前者通常需要对电压值滤波处理^[6],后者重点在于使用集成电路测试设备对待测频率信号快速测试后,进行时域和频域分析及处理^[7-8]。在测得精确结果的基础上,根据器件结构,结合外围控制电路完成修调。

本文介绍了常见的修调方式,重点讨论了熔丝修调电路的原理、结构,设计了一种对串行、并行结构通用的测试电路,探讨了常用的修调计算方法,介绍了最大精度下修调

段的计算公式和修调测试步骤,针对量产修调测试中的常见问题,研究了提高生产测试效率的方法。

2 常见的修调方式

从芯片修调的方式看,可分为内嵌非挥发性存储单元修调、激光修调、熔丝修调、齐纳二极管修调等。内嵌非挥发性存储单元修调通过在芯片内植入EEPROM单元或Flash单元^[9],利用存储器的记忆特性修调电路,该技术可以反复修调,但是工艺比较复杂^[10],成本高;激光修调精度高^[11]但同样成本很高,因此这些方式多用于带MCU的高端芯片中,而中低端芯片多采用熔丝修调技术^[12]。

熔丝修调包括金属熔线和多晶硅熔线修调技术,是一种封装前对圆片测试过程中的裸片修调。修调前,金属或多晶硅导通,修调时在其两端的PAD上加电,以大电流达到烧断熔丝的目的。因为熔丝修调成本低、工艺简单、编程简单、修调速度快,所以被广泛采用^[13]。

收稿日期:2015-10

* 基金项目:北京市自然科学基金委员会-北京市科学技术研究院联合(L150009)资助项目

3 熔丝电路的结构

熔丝是电子产品中的关键性组件,常用于内存(redundancy memory)切换,或在射频电路中,提供可调整电阻与电容特性。熔丝相当于一个开关,通过修调来改变开关状态,即可增大或者减小通路电阻,使最终的总电阻达到符合设计要求的精确阻值。混合电路中常常要用熔丝来调整电路的电阻、电容。实际芯片中测过程中烧断多晶硅熔线和烧金属熔线方法基本都一样,都是使用探针(probe)引接大电流熔断,图 1 为修调前后的电路基本结构。

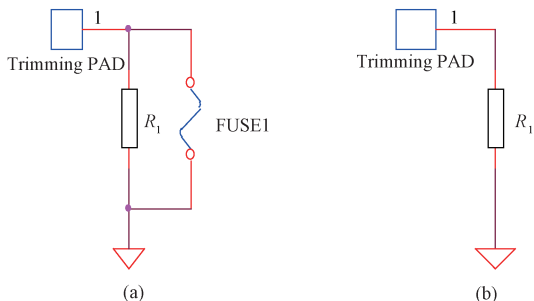


图 1 熔丝熔断前(a)/后(b)电路结构

由图 1 可以看出,某段熔丝一旦熔断,其电路阻值就会发生变化,并且不可恢复,因此熔丝修调测试最重要的就是准确计算测量值与预期值的差,并准确判断需要修调的熔丝段。

4 测试系统的修调电路设计

4.1 熔丝修调电路组合方式

熔丝修调电路组合方式有共地和不共地两种^[14],共地方式多为并行连接,如图 2 所示,不共地方式一般是熔丝彼此首尾相连形成的串行结构,如图 3 所示。

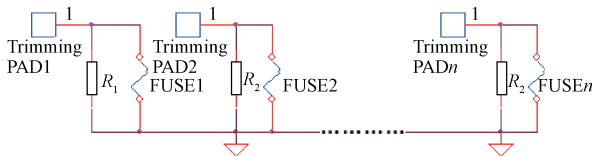


图 2 共地的熔丝修调电路

并行修调电路各个修调段的电阻作用相等,没有优先级之分,实际上可以预先计算出测试误差值与修调段的对照表。串行修调电路中阻值大的电阻对修调测试结果的影响大,所以要率先处理。不论采用哪种结构,使用修调的电阻段数 n 越大,修调精度越高,共可得到 2^n 种电阻值组合。

4.2 一种串行和并行通用的测试机修调电路

修调基本原理是在待修调的熔丝两端施加一个合适修调的电压差(该数值一般由设计公司设定),进而产生一段时间(如十几毫秒)的大电流,从而熔断熔丝,但针对上述两种不同修调结构,测试机修调电路设计也不相同,为了达

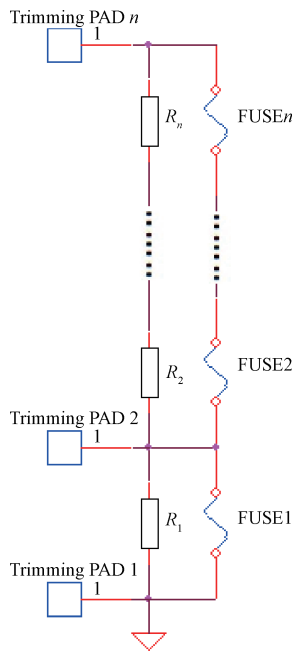


图 3 不共地的熔丝修调电路

到通用性,本文专门设计了一种通用的修调电路矩阵,以对 6 个修调管脚的单芯片修调电路为例,如图 4 所示,配合测试机达到快速修调的目的。

图 4 电路中单端继电器 RELAY SPDT 负责控制将测试电流施加的位置是 2 个 PAD 之间还是 PAD 和地之间,其控制信号由 K 决定,双端继电器 RELAY DPDT 控制修调段,控制信号由测试系统提供的控制字 K_i (i 表示测试段序号)决定,某个继电器闭合,即修调的 PAD 和测试系统负责修调的电源接通,可以通过施加恒压源烧断熔丝。

4.3 修调源的选取

由于修调测试具有不可恢复性,所以必须要寻求合适的方案,确保测试效率和测试成品率的统一,尤其是防止瞬时修调能量不足造成熔丝没有被彻底烧断和由于电流、电压过大造成过修调使器件内部结构发生损坏。这两种情况很容易发生,且对成品率影响很大。

比较可靠的方案是使用测试系统本身提供电源提供电流源或电压源,通过施加时间精确控制,达到熔断某段熔丝的目的,常用测试系统的恒压源加载方式,在给定电压的情况下设置钳位电流,使之符合修调的设计要求。测试系统往往具备多个电压源,因此可以通过并行修调提高测试效率。

5 修调测试的计算方法

5.1 实现最大精度的修调计算方法

以串行结构的修调为例,如图 3 所示,假设用于修调的电阻共 n 段,即 R_1, R_2, \dots, R_n ,其修调的电阻值通常为 $1:2:4:\dots:2^n$,经过不同的修调方案,可以得到 $2^{n+1}-1$

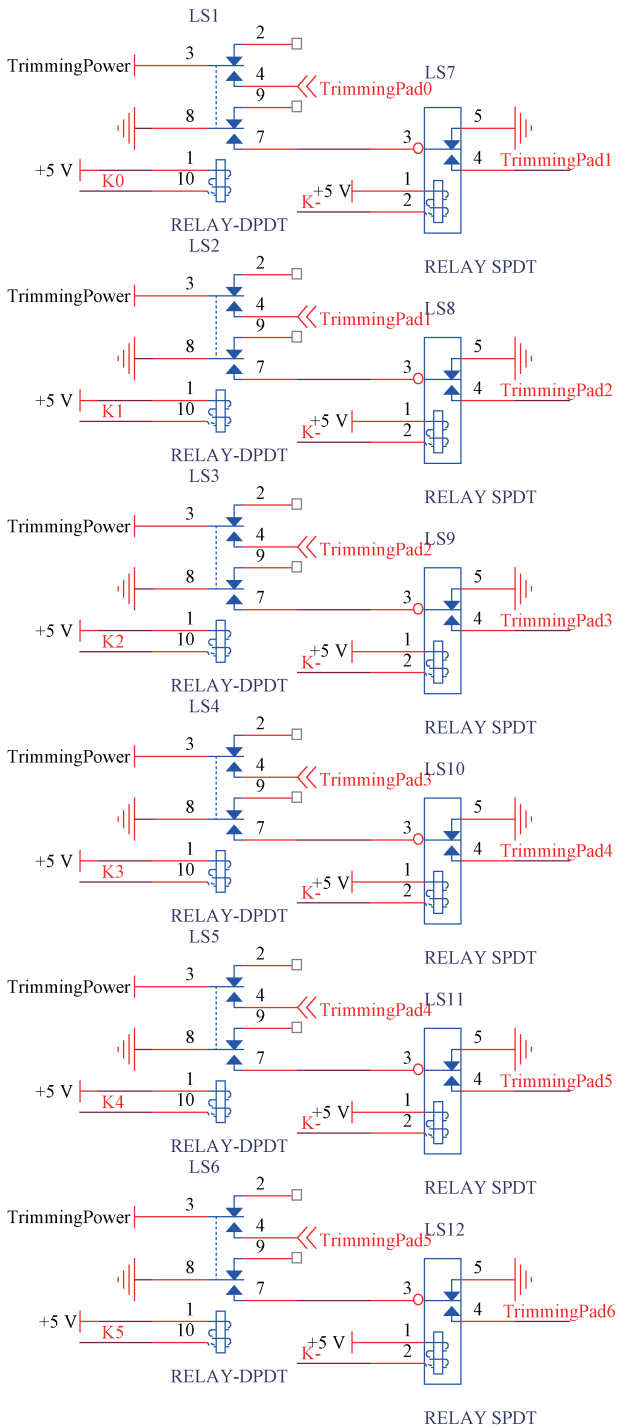


图 4 6 修调管脚器件的修调控制电路

个不同的修调方案,电阻数目越多能够得到的总体精度也越高。

由于以上电阻值关系,以修调 R_1 所产生的精度记为 LSB(最低有效位精度),多数厂商修调精度要求为 1 LSB,但实际最高修调精度可以达到 $1/2\text{LSB}$ ^[15],本文借鉴原算法,在整理、简化后,调整如下:首先计算期望值与实测值的误差 Δ ;其次计算 Δ 与最大精度的倍数关系:总修调计数

值,记数值 $= (\Delta + 1/2\text{LSB}) / \text{LSB}$;然后将该值取整,取整的过程实际可去除 $1/2\text{LSB}$ 以内的误差;进而把取整的数值转为 2 进制的值即可得出待修调的各个段,“1”标示需要修调,“0”表示不需修调。最后修调完的数值应在(预期值 - $1/2\text{LSB}$, 预期值 + $1/2\text{LSB}$)区间内。

5.2 修调计算实例

表 1 是某电路修调误差与修调电阻代码说明,预期值为 4.185 V。某芯片实测值为 4.114 V, $1\text{LSB} = 0.0135\text{V}$,则修调记数 $= (4.185 - 4.114 + 0.0135/2) / 0.0135 = 5.76$,取整(修调记数) = 5,转为 2 进制后为 (000101),需要修调段位 PAD1 和 PAD3,修调后的值为 4.1815,在(4.1175, 4.2525)范围内。

表 1 某 6 段串行修调电路代码说明

Trimming PAD	R	$\Delta V_{\text{out}} / \text{mV}$
PAD1	1K (R 细调)	13.5 (1LSB)
PAD2	2K (2R 细调)	27 (2LSB)
PAD3	4K (4R 细调)	54 (4LSB)
PAD4	8K (8R 细调)	108 (8LSB)
PAD5	16K (16R 细调)	216 (16LSB)
PAD6	32K (32R 细调)	432 (32LSB)

6 测试系统修调算法流程

6.1 常用的修调步骤

在标准修调测试中,大多设计厂商首先要给出参数预期值,该值为在同一工艺条件下根据理论数值对一批样品预先修调后得到的平均值^[16],将该值作为期望数值,修调过程如下。

- 1) 设置测试条件,使器件运行于相应的状态,测试相关管脚的数值,得到实测值。
- 2) 计算误差 $\Delta = (\text{期望值}) - (\text{实测值})$ 。
- 3) 根据增量和修调 Pad 的关系表,决定修调管脚。
- 4) 通过测试系统控制修调电路矩阵,选择修调通道。
- 5) 测试系统修调电源加电熔断熔丝。
- 6) 重新测试该管脚的数值(实测值 2)。
- 7) 比较期望值和实测值 2。当两者误差在允许范围内时,即修调成功。

6.2 修调过程中常见问题

实际测试中,往往会遇到电路中修调电阻值不够准确的情况,常见于是数值大的电阻不准确,因此通常不能通过一次计算完成修调,这就需要在圆片测试过程中多次修调,每修调一次再重新测试输出值并计算增量,用于下次修调测试。这种方式带来了更大的计算复杂度和更多的计算及测试时间。如果采用常见的顺序测试^[17],就会把循环多次的测试时间、控制电路操作时间和修调熔丝时间相叠加,测试效率比 5.1 节所述的理想状态明显降低。

6.3 改进的修调算法流程

芯片单次参数的测试时间由其内部特性决定,往往难以缩短,因此减少测试时间最重要的是要减少 6.1 节所述的 1)、4) 和 5) 过程所用的时间,具体方法是减少单颗芯片的测试次数、合并测试动作以及多芯片并行测试的应用。

将以上三种方式综合,本文设计了如图 5 所示的操作流程。

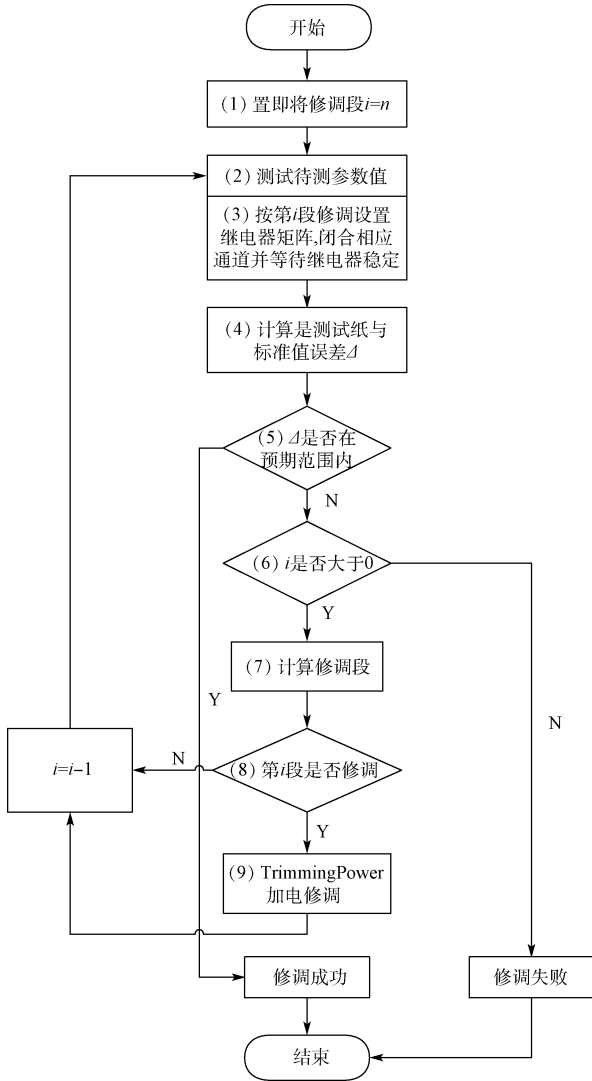


图 5 修调测试流程

在修调过程中,每一段熔丝修调时间由测试系统 PMU(或 DPS)决定,压缩修调时间主要是指压缩修调熔丝的次数,本文采用专用 Trimming Power 作为修调电源即可。系统采取从 R_n 到 R_1 依次扫描的方式,测试参数结果后计算增量,决定下一段是否需要修调,每完成一次修调后即控制外围电路,为下次可能的修调做好准备,同时重新测试输出值并计算增量。在上述过程中,2) 和 3) 可同步进行,该步时间为二者中的最大值。如果测试系统有 N 路独立的 PMU 作为参数测试电源,因为各 SITE 的操作完全一

致,所以 N 个 SITE 修调测试时间几乎等同于单个 SITE 的时间,从而最大程度上实现了效率的优化。

7 测试实验

本文以图 6 所示的电源管理芯片为例,由于要对 Bat 端的电压测试并修调,而该管脚需要并联 $470 \mu\text{F}$ 电容以达到测试要求,因此测试 V_{Bat} 电压的时间较长,至少 15 ms,而修调电路矩阵导通及稳定时间约 5 ms,确保熔丝熔断加电压时间 10 ms。

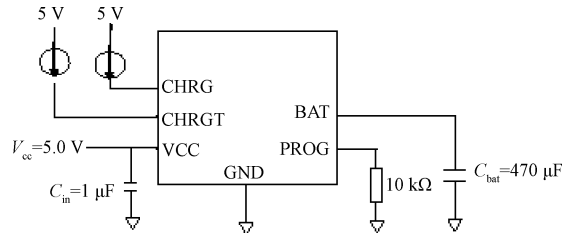


图 6 某电源管理芯片外部连接

以 4 芯片测试、6 段熔丝为例,如果阻值不够准确,每段熔丝修调后都需要重新计算,以标准方法,使用普通串行测试最多需要 720 ms,而采用本方法理论上仅仅需要 150 ms,实际测试时间几乎和理论时间相当。

8 结 论

本文根据串行和并行熔丝修调电路的结构特点,设计了通用的测试电路,以此为基础,在不占用更多测试资源的前提下,通过优化测试流程和并行测试的方法减少了测试时间,提高了测试效率。

参考文献

- [1] NING Z H, HE L N. A low drift curvature-compensated bandgap reference with trimming resistive circuit[J]. Journal of Zhejiang University-Science C: Computers & Electronics, 2011, 12(8): 698-706.
- [2] 刘宁,徐东明,赵新毅. 一种用于模拟电路测试与修调方法[J]. 中国集成电路, 2014(5):69-72.
- [3] 徐立松,李佩玥,葛川,等. 高精度 DA 电路的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(12):21-25.
- [4] 杨诗洋,陈岚,陈巍巍,等. 适用于片内集成的可修调低失调 LDO[J]. 电子设计工程, 2014,22(6):77-81.
- [5] 鲍钰文,徐瑶,张金辉,等. 高性能晶体振荡器及频率校准电路设计[J]. 现代电子技术, 2014, 37(9): 149-153.
- [6] 施健健,朱蕴璞. 基于 AC-DC 开关电源外接滤波电路设计[J]. 电子测量技术, 2014,37(6):8-10.
- [7] 王飞. 基于 FPGA 的全数字化峰值时刻检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(6):914-919.

- [8] 张亦弛,黄见明,何昭. 基于相位谱测量的脉冲调制信号频域测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2508-2514.
- [9] KULKARNIS H, CHEN Z, HE J, et al. A 4 KB metal-fuse OTP-ROM macro featuring a 2 V programmable 1.37 μm^2 1T1R bit cell in 32 nm highk metal-gate CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(4): 863-868.
- [10] 王继安,邢俊青,李肇基. 数字修调技术在高速高精度流水线 ADC 中的应用[J]. 微电子学, 2009, 39(2): 169-172.
- [11] 魏本建,顾汉玉. 激光修调产品熔丝设计小结[J]. 硅谷, 2014, 256(12): 50-51.
- [12] 黄冲,欧健,袁政,等. 一种电压基准高精度双向修调电路的设计[J]. 电子科技, 2013, 26(7): 82-84.
- [13] 王欢,罗玉香,宋黎明. 一种基于标准工艺的熔丝修调电路设计[J]. 微电子学, 2014, 44(4): 503-506.
- [14] 李文昌,王继安,李威,等. 修调技术在高精度集成电路中的实现[J]. 微处理机, 2006(1): 1-6.
- [15] 张鹏辉,王己钢. 熔丝类电路的修调探索[J]. 电子与封装, 2010, 10(4): 24-27
- [16] 葛南,陈东坡. ATE 测试中的 Bandgap Trim 技术研究[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(4): 70-78.
- [17] 胡明明,王小力. SoC 芯片可测试性设计策略的实现研究[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 56-61.

作者简介

高剑,1977 年出生,工学硕士,副研究员,主要研究方向为集成电路测试方法及测试系统开发。

E-mail: gaoj@bjtest.com.cn

英国 Pickering 公司展示射频与微波开关解决方案

2016 年 6 月 6 日-英国-作为电子测试与仿真领域模块化信号开关和信号调理解决方案的领导者,英国 Pickering 公司在 2016 年 6 月 14 日至 16 日举行的微波及天线技术会(IME2016 南京)上展示其 PXI 和 LXI 总线射频与微波开关解决方案。

英国 Pickering 公司的射频与微波开关解决方案选型范围广,覆盖从低至 DC 信号到射频和微波信号全部范围。这些开关适用于提高测试测量系统的灵活性,信号带宽可达 65GHz。产品支持 PXI 和 LXI 两种系统平台,结构形式包括多路复用、矩阵以及通用开关。

这些射频与微波开关解决方案包括:

PXI 总线 RF 多路复用开关(40-760 系列)-该系列最新的产品 PXI 多路复用 RF 开关提供了以下多种的不同配置:双、四、八组 SP4T;单、双、四组 SP8T;单、双组 SP16T;以及单组 SP32T。每一型多路复用开关产品都同时提供具有自动端接的版本,以优化 VSWR,从而降低对整个测试系统性能的影响。

固态射频开关(40-882)-The 40-882 是一个 6 GHz 4 对 1 的多路复用器,该型号是固态继电器开关中 40-88X 系列的成员。每个采用固态继电器的开关产品都能确保更快的切换速度、更多的可重复性能和在额定值范围内的使用寿命。该系列的多路复用器可以控制功率超过 +30 dBm 的信号以及从 10 MHz 到 6 GHz 以上频率范围的信号。未使用的端口自动终止管理 VSWR 的影响。

PXI 微波多路复用器开关(40-785B)-该系列产品设计用于切换 50 Ω 、频率高达 40 GHz 的信号,同时提供具有自动端接的版本,以优化 VSWR,从而降低对整个测试系统性能的影响。本产品模块内部可安装 1 或 2 组 6 通道多路复用开关,还提供单槽支持多达 3 组外部安装的多路复用开关形式的产品。

PXI 微波多路复用开关(40-784A)-该系列产品提供 1 至 3 组包含 4 通道或 6 通道多路复用器,提供 6 GHz,

18 GHz, 26.5 GHz 或 40 GHz 型号,在产品所支持的带宽范围之内提供极佳的性能。所有型号均占用 2 个 3U PXI 槽位。

PXI 微波 SPDT 开关(40-780A)-该系列产品提供 1 至 4 组 SPDT 开关,特征阻抗 50 Ω ,提供多种频率范围的产品可选——从 12.4 GHz 到 65 GHz。此外还提供 1 款 75 Ω 2.4 GHz 的产品。

PXI 微波交错开关(40-782A)-该系列产品提供 1 或 2 组交错结构的开关产品,可选频率范围包括 18 GHz, 26.5 GHz 和 40 GHz。

PXI 自动端接 SPDT 微波继电器模块(40-781)-该系列产品为 18 GHz 自动端接的 SPDT 开关模块,提供 1 或 2 组开关,可选择使用内部或外部端接器的产品形式。采用外部端接器的版本允许用户在外部安装大功率的负载以提高开关可承载的功率。

以上全部新产品以及升级产品均在前面板安装有蓝色 LED 指示灯以标示当前选通的通道。这些指示灯可以为用户直接提供可视的辅助,非常有助于用户对测试系统的开发与调试。

此次参展的另一大亮点是: Pickering 公司最新的 eBIRST 开关系统检测工具系列。该工具专为 Pickering 的 PXI、PCI 及 LXI 产品设计,通过这些工具可以减少开关系统故障定位的工作量,快速检测系统中的开关节点性能,定位故障继电器的位置。定位之后,该工具可以显示开关设备 PCB 组件的实物图,高亮显示需要维修的故障继电器。

以上全部多路复用开关产品全部兼容适用于任何 PXI 机箱以及 PXIe 机箱的混合插槽。也适用于 Pickering 公司的 LXI 模块化机箱从而允许用户通过以太网接口控制开关系统。

英国 Pickering 公司同时也会展示一系列的 LXI 和 PXI 开关产品和 PXI 机箱。