

基于直接测量建模的超低电阻无源元件

本文介绍了一种直接利用测得的 S 参数进行 MIM 电容器电阻建模的方法，使用的是称为“ S_{21} 并联 (shunt)”技术的超低阻抗测量方法。它利用了以前引入的晶圆穿孔 (through-wafer VIA) 建模的成果。模型参数的确定使用了直接测得的数据的斜率和截取方法，该数据是由“串联-并联 (series-shunt)”配置的测试结构获得的，之后是晶圆上 SOLT 校准。通过应用所提出的方法，可以消除由于探针接触电阻 (PCR) 误差及其相关变异。

作者: M.D. Brunzman, TriQuint Semiconductor 公司, 俄勒冈州希尔斯伯勒

金属-绝缘体-金属 (MIM) 电容器在各种 MMIC 电路的设计中扮演着至关重要的角色，在低损耗/高 Q 值是关键设计要求的场合尤为如此。由于其易于制造，硅和化合物半导体 (GaAs 以及 GaN) 技术中经常采用 MIM 电容器。当用作关键 RF 信号路径的匹配元件 (如功率放大器 (PA) 的输出网络) 时，MIM 的电阻对可实现的增益和 PAE 会有直接的影响。当用于滤波应用时，MIM 的电阻可直接影响相关网络的可实现 Q 值。因此，准确确定 MIM 的串联电阻是精确把握电路设计的关键要求。如果 MIM 用于并联配置 (RF 接地)，那么同样要求符合相关衬底通孔或 (直通) 衬底通孔 (SVIA) 建模的要求。^[1]

$30 \text{ m-}\Omega < \text{PCR} < 60 \text{ m-}\Omega$) 不能在校准过程中消除，而始终存在于一个或两个被测量的端口。^[2, 3]

重复的探头放置可引入 PCR 变异，从而妨碍准确确定底层串联电阻统计特性。(RF) 探针接触 (及其相关变

表1:
测试结构设计类型

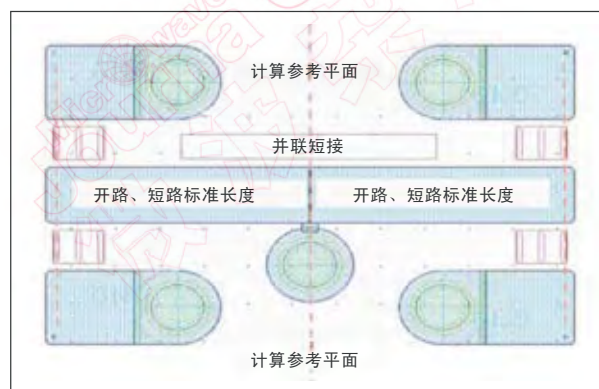
| 测试结构名称 | 布局配置 | 测量类型 |
|---------|------|------|
| “串联” | 2端口 | 传输 |
| “Shunt” | 1端口 | 反射 |
| “并联” | 2端口 | 传输 |

测量难题和解决方案

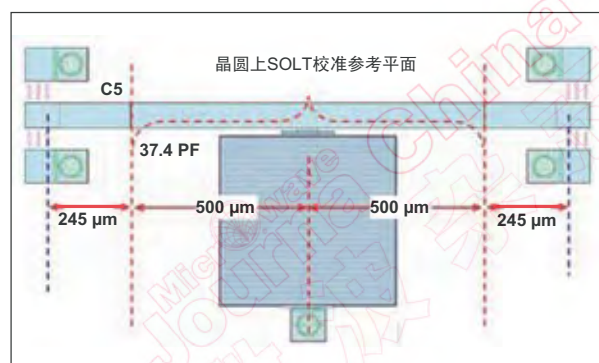
通过“标准”S 参数测量方法来确定 MIM 电容器的串联电阻已被证明是一个长期存在的难题，主要原因是：(1) 由 DUT 带来的超低阻抗，(2) 需要高精度来解决电阻分量和无功分量之间的差异，以及 (3) 由于探针接触，无法解决有限电阻贡献的问题。在表征超低电阻无源器件时，基于标准 S 参数的测量通常使用 DUT 串联或并联配置的测试结构设计，如表 1 所示。

因此，器件的表征是分别通过 S_{21} (传输)、 S_{11} (反射) 数据的分析来确定的。与每种类型相关的测量精度因矢量网络分析仪 (VNA) 的能力而有所不同，该能力可解决残余 (校准后) 动态范围内低级别测试信号的实分量和虚分量问题。根据 VNA 架构，在低功耗 RF 驱动下，由此产生的“相位精度”具有频率依赖性，而在最低 IF 带宽条件下“相位精度”通常被最大化了 (对于给定测量类型)。

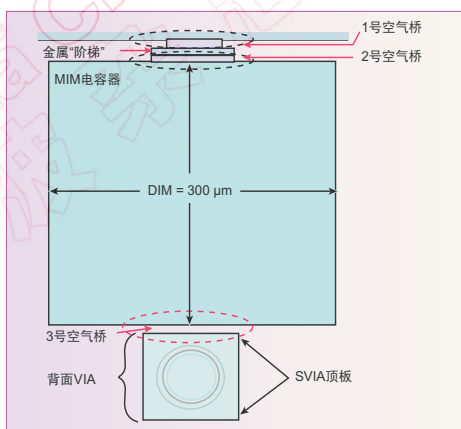
当 RF 探针接触测试结构的发射线 (launch line) 时，即产生有限电阻。该电阻是与金属系统相异的相关功函数 (work function) 的结果。这个接触电阻 (通常为



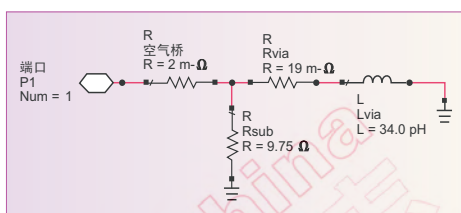
▲ 图1: 串联-并联配置的SVIA。



▲ 图2: “串联-并联”配置的MIM电容器。



▲ 图 3：“串联-并联”MIM 电容器细节。



▲ 图 4：SVIA 集总元件等效电路。

**表2：
MIM电容器互连电阻估算**

| 结构 | 宽度 (μm) | 长度 (μm) | 号码 sq. | 电阻 ($\text{m-}\Omega$) |
|-------|-------------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------------|
| 1号空气桥 | 60 | 10 | 0.167 | 0.833 |
| 金属阶梯 | 75 | 5 | 0.067 | 0.333 |
| 2号空气桥 | 90 | 10 | 0.111 | 0.556 |
| 3号空气桥 | 90 | 5 | 0.056 | 0.278 |
| 通孔顶板 | 100 | 100 | 0.360 | 18.000 |
| 总和 | | | | 20.000 |
| 单位 | | | | |
| 1号Rsh | 5 | ($\text{m-}\Omega/\text{sq}$) | | |
| 2号Rsh | 50 | ($\text{m-}\Omega/\text{sq}$) | | |

异)问题是使用针对“串联-并联”配置的测试设备,同时利用一个特殊传输测量条件加以解决的,当测量并联谐振器件时就会出现这样的情况。

测试结构设计

“串联-并联”配置的SVIA和MIM电容器测试结构的布局适用于高频($> 50\text{ GHz}$)晶圆上RF表征,如图1和图2所示。这两种测试结构采用了固定长度发射器,在端口1和2具有宽带CPW-微带过渡特性和探头索引标记功能。

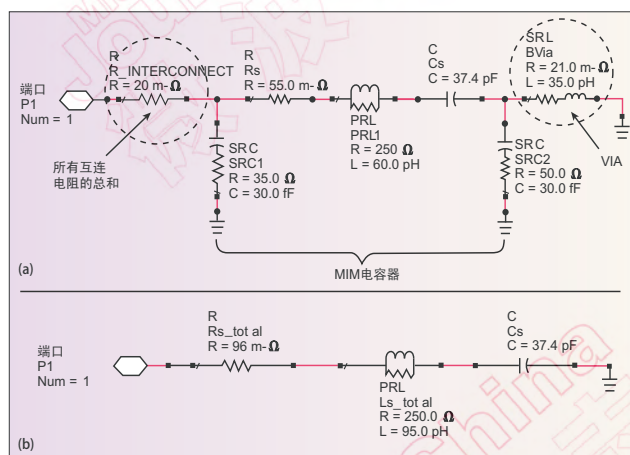
SVIA测试结构是这样设计的,物理通孔直接连接至测量参考平面,该点位于发射(传输)线互连两端。为进行验证选择的这种设计配置没有必要去嵌入(de-embedding)。MIM电容器测试结构集成了定义为方形几何

形状的电容器,以直接配合测量过程(PCM)规范的电阻估算。在这种情况下,MIM电容器是使用双层金属工艺(通常是GaAs和GaN技术)实现的,连接顶板和底板金属的薄膜电阻(sheet resistance)是需要考虑的唯一因素。不过,采用硅芯片技术还需要考虑如何协调顶板互连中使用的多个通孔“柱(post)”相关的电阻。^[4]

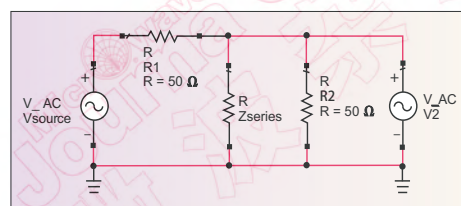
两个端口上MIM电容器测试结构采用了相同的发射(launch)。但是,它被有意嵌入在额外1mm的(传输)延迟以内,为的是测试基于直通标准(Thru standard)的去嵌入方法的有效性。每个测试结构是这样设计的,其大小因DUT的“插入长度”各不相同。在这种方式下,利用常见设置的(嵌入)传输线特性去嵌入非常方便。MIM电容器的详细视图如图3所示,突出显示了残余测量电阻的来源。该图显示使用了一个厚空气桥(airbridge)金属将MIM电容器连接至传输线及SVIA的顶部。所有金属互连相关的电阻估算如表2所示。

等效电路/模型

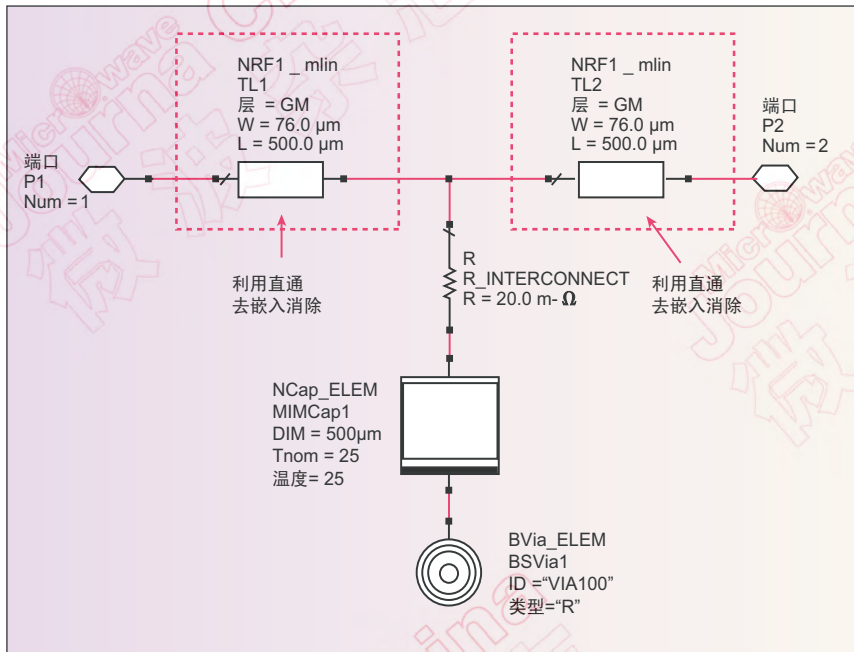
SVIA的等效电路是使用理想的集总元件等效电路(LE-EC)元件定义的,如图4所示。同样,并联MIM电容器的等效电路是由理想的LE-EC元件定义的,如图5细节所示。为了分析目的,MIM电容器LE-EC的低频近似值简化是通过在一个元件(R_{s_total})中组合每个元件



▲ 图 5:(a) 并联 MIM 电容器集总元件等效电路及(b) 简化的 MIM 电容器。



▲ 图 6： S_{21} -shunt test configuration.



▲ 图7：“串联-并联”MIM电容器两端口直通去嵌入配置。

的总串联电阻来实现的，如图所示。

测量理论

如上所述^[2]，“S₂₁ 并联”测量技术相当于DC测量过程的RF测量，可用来实现高精度电阻测量。由于该技术所提供的独特优势，这里重复了图6所示的串联阻抗(Z_{series})的推导。

图中所示是使用50Ω测试配置的情况，从简化方程得到的串联阻抗(Z_{series})可定义为：

$$Z_{series} = 25 (S_{21} / (1 - S_{21})) \quad (1)$$

式中：

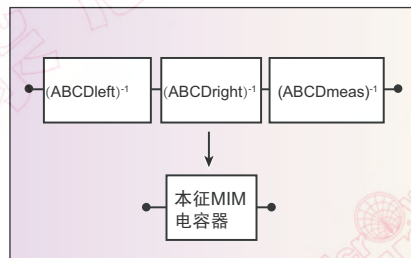
$$V2 = V_{source} (Z_{dut} / (50 + 2Z_{dut}))$$

$$V1 = 1 / (2V_{source})$$

$$S_{21} = V2 / V1$$

参数提取

习惯上，任何网络情况下的等效电路都可以通过采用简单的分析公式的集总元件来定义，模型参数可通过确定组成的实分量和虚分量的斜率和Y截距，直接利用测得的（本征）数据来提取。在SVIA的情况下，串联



▲ 图8：级联ABCD去嵌入方法。

阻抗可由公式2表示，假设 $\omega^2 L_{via}^2 \ll 1$ 。

$$Z_{series} = \underbrace{(R_{via} + \omega^2 L_{via}^2 / R_{sub})}_{\text{实分量}} + j \underbrace{(\omega L_{via})}_{\text{虚分量}} \quad (2)$$

R_{via} 是通过查找数据的y截距，从实分量(Z_{series})与 ω^2 的关系曲线中图形化提取的。L_{via}是通过查找

数据的斜率，从虚分量(Z_{series})与 ω^2 的关系曲线中图形化提取的。在MIM电容器情况下，串联阻抗可由

公式3表示，假设 $\omega^2 L_s^2 / R_p \ll 1$ 。

$$Z_{series} = \underbrace{(R_s + \omega^2 L_s^2 / R_p)}_{\text{实分量}} + j \underbrace{(\omega L_s - 1 / \omega C_s)}_{\text{虚分量}} \quad (3)$$

使用类似的图形提取方法可用于SVIA建模，C_s是从 ω_{imag} (Z_{series})与作为y截距的 ω^2 的关系曲线中

图形化提取的，式中L_s是从相同数据的斜率中提取的。R_s是由实分量(Z_{series})的y截距与 ω^2 数据的关系确定的。确定了L_s，R_p即可用实分量(Z_{series})的斜率与 ω^2 数据的关系除以 $\omega^2 L_s^2$ 。并联/衬底模型参数的提取是利用LE-EC完成的，方法类似通过等效衬底导纳(admittance)Y_{sub}的定义。^[5]

(晶圆上) 校准和验证

晶圆上SOLT校准已被用作表征的基础，因为人们发现它在非常低的频率条件下可以提供最准确的结果，此时可提取到伴随最大器件的（电）阻抗。标准应该这样设计，即参考平面定义在（物理上）放置最大DUT的RF焊盘框架(padframe)的中心。晶圆上TRL校准的第一次执行是为了建立SOLT标准的电气等值（校准套件常数）。为了支持与DUT相关的超低电阻测量，至关重要是TRL校准需要每个端口通过SOLT负载（匹配）标准测量的验证。适当调整与传输线标准相关的电容可确保负载（匹配）标准的DC和RF派生电阻的一致性。（这个过程很容易在WinCalXE中实现）。一旦校准完成，即可通过使用标准的重新测量程序，1, 6并通过独立的标准器件的测量进行验证。

直通去嵌入

串联-并联连接的MIM电容器测量配置如图7所示。与微带传输线相关的寄生效应可从MIM电容器中心延伸到每个校准参考平面，它可通过直通去嵌入程序，利用级联的ABCD矩阵方法予以消除。（这与ADS中使用的可逆两端口网络相同）。嵌入的传输线部分的数据可以

通过 EM (动量) 仿真, 或通过分裂 [7] 直通校准标准测得的 S 参数数据来获得。去嵌入过程的收益如图 8 所示。 [8]

从程序上看, (1) 测得的数据从 S 转换成 ABCD 格式, (2) DUT 被去嵌入 (使用级联的 ABCD 矩阵, 或通过 ADS), 而 (3) 残留的 (本征) 数据从 ABCD 格式转换为 S。

测量结果

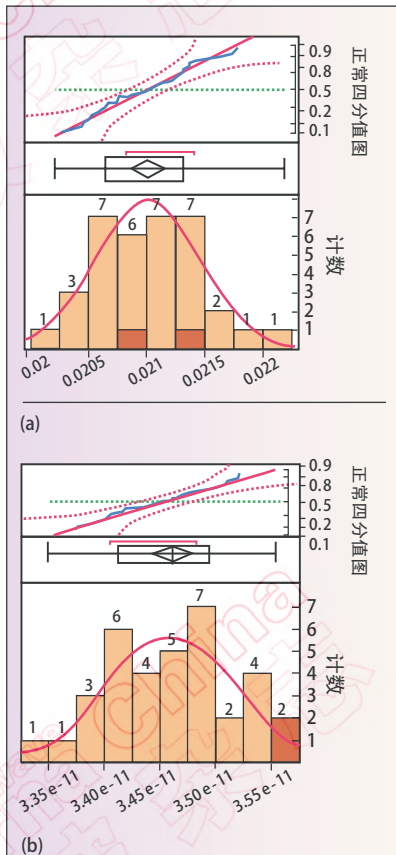
“串联 - 并联”连接的 SVIA 的测量数据与前面显示的 R_{via} ($\alpha = 21 \text{ m-}\Omega$) 且 L_{via} ($\alpha = 34.5 \text{ pH}$) [1] 统计得出的值非常一致, 这两个参数表明了正态分布的特征, 如图 9 所示。

串联 - 并联配置的 MIM 电容器的典型数据如图 10 所示。

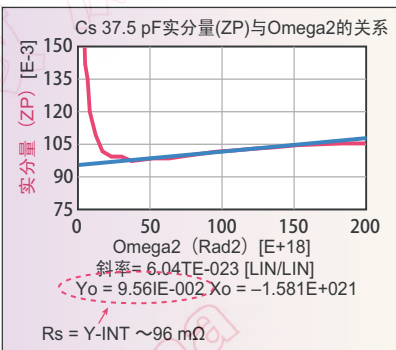
值得注意的是, 对于 37.5 pF 的电容器, 来自去嵌入实分量 (Z_{series}) 数据的 R_s 提取在大约 $900 \text{ MHz} < \text{频率} < 2 \text{ GHz}$ 的范围内有效。低于这个频率, 测量的准确性就开始降低, 因为 VNA 无法解决与 C_s 相关的不断增加的、非常大的无功信号分量对电阻的影响。

验证

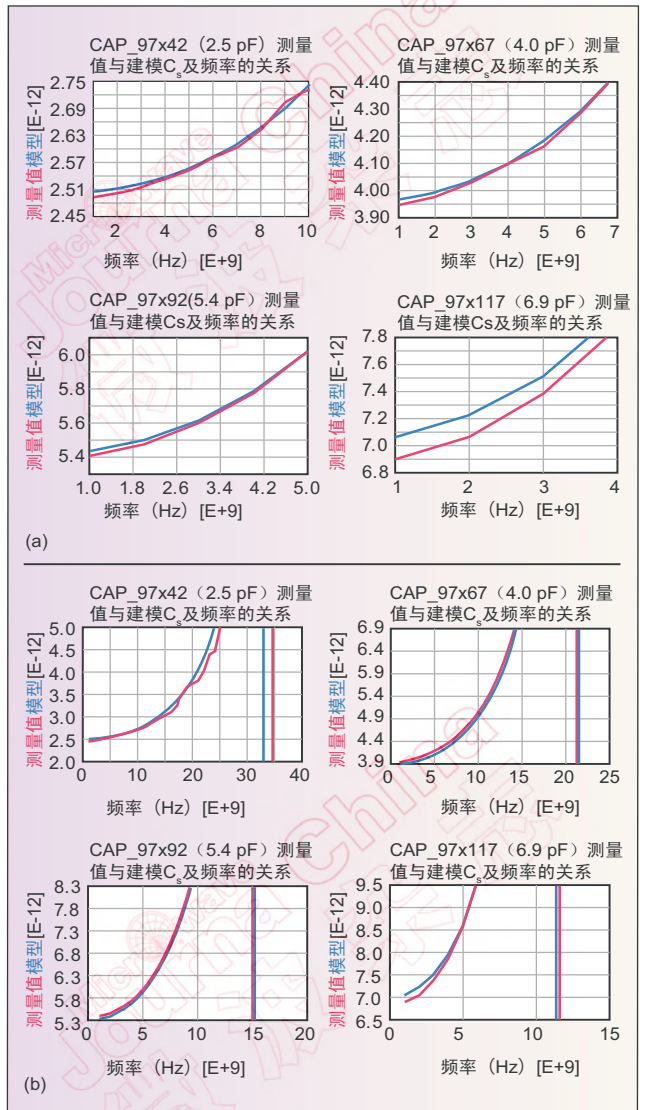
建模技术的验证显示了在表征多个 37.5 pF 方形 MIM 电容器过程中, 结合应用去嵌入和参数提取方法的所获



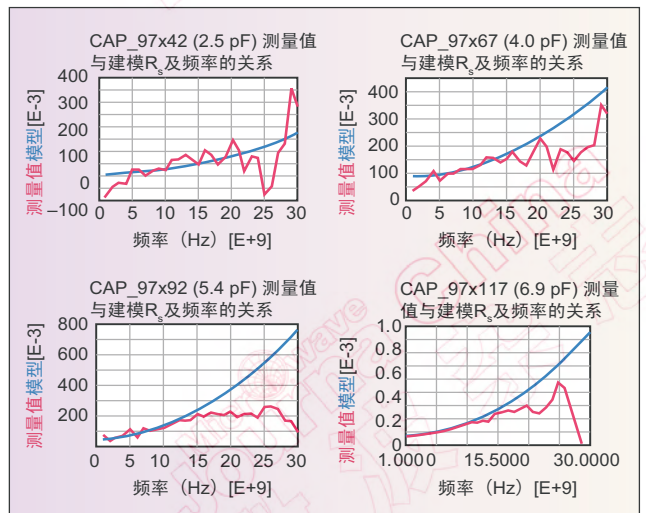
▲ 图9: SVIA R_s (a) 和 L_s (b) 分布。



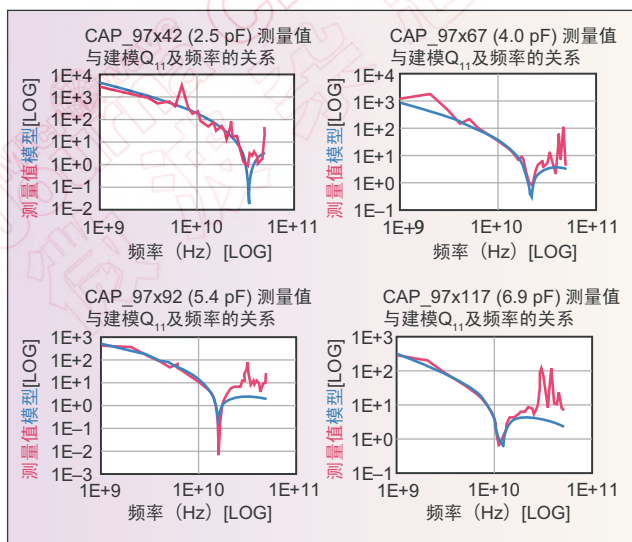
▲ 图10: MIM 电容器实分量 (Z_{series}) 与 ω^2 的关系。



▲ 图11(a) (接近)与频率的关系及(b) (远离) C_s 与频率的关系。



▲ 图12: R_s 与频率的关系。



▲ 图13: Q_{11} 与频率的关系。

表3:
37.5 pF MIM电容器统计数据

| 片芯 | R_s (Ω) | R_{sq} |
|-------|-----------------------|----------|
| 2, 2 | 9.0986×10^2 | 0.9944 |
| 2, 3 | 9.4345×10^2 | 0.9952 |
| 3, 2 | 8.8307×10^2 | 0.9976 |
| 3, 3 | 9.5368×10^2 | 0.9899 |
| 4, 2 | 9.5490×10^2 | 0.9935 |
| 4, 3 | 9.5912×10^2 | 0.9892 |
| MEAN | 9.3401×10^2 | 0.9933 |
| STDEV | 3.0727×10^3 | 0.0032 |
| 标准 % | 3.29 | 0.32 |

表4:
(串联-并联) MIM电容器估算的电阻

| 互连 | | MIM电容器 | | 总数 |
|---------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| 电阻 | 估算的 | 电阻 | 估算的 | |
| 来源 | 阻值 | 来源 | 阻值 | |
| | (m- Ω) | | (m- Ω) | |
| Rvia | 21.0 | Top Plate | 50 | 总计 |
| Rint | 20.0 | Bottom Plate | 5 | (m- Ω) |
| R-Total | 41.0 | R-Total | 55 | 96 |

得的统计数据。表3摘要提供的数据是来自同一个晶圆上六配置片芯自动探测的结果。

通过回顾通孔和互连电阻总和的结果(如表2),测得的和估计的MIM电阻之间的误差小于5%(2.6 m- Ω),如表4所示。器件表征和相关MIM电容器建模方法的进一步验证呈现了 C_s 、 R_s 和 Q_{11} 的结果,见图11至13。^[9]显示的数据是用TQP15矩形MIM生成的。

与 C_s 提取相关的准确性可以在 C_s 与频率的关系图(图11a)中看到,其中显示了很窄的带宽。与 L_s 提取相关的准确性可以在 C_s 与频率的关系图(图11b)中看到,其中显示了较宽的带宽。与 R_s 提取相关的准确性可以在 C_s

与频率的关系图(图12)中看到,其中显示了较宽的带宽。与整体模型提取过程相关的准确性可以在 Q_{11} 与频率的关系图(图13)中看到。与 Z_{series} 的实分量和虚分量相关的拟合误差的影响显示在50 GHz的完整表征带宽上。

结论

为确定SVIA串联电阻开发的方法已成功应用于MIM电容器的表征。该方法表明,MIM电容器的电阻很容易从测得的S参数数据获得,方法是:(1)设计/使用“串联-并联”配置的测试结构,(2)应用“ S_{21} 并联”超低阻抗测量技术,以及(3)合适的VNA配置/设置。大型方形MIM电容器的串联电阻已直接利用测得的S参数数据(基于使用的斜率和截取方法)提取出来,比其他类似建模程序获得的数据更好。六个片芯获得的10个数清楚表明,由于测量误差和统计变异而出现的探针接触电阻(PCR)及其相关变异的影响已被消除。

致谢

本文所述工作的完成得到了Nitronex公司的大力支持。我想感谢John Kearney的测试结构布局,还要感谢Prity Patel在晶圆上校准套件构建,以及相关S参数数据的收集过程中所做出的努力。

参考文献

1. M.D. Brunzman, “基于直接RF特性的晶圆穿孔建模”,第76届ARFTG微波测量会议,佛罗里达州清水,论文C-1,2010。
2. “采用2端口测量的超低阻抗测量”,Agilent应用笔记5989-5935EN。
3. “RF探头选择指南”,Cascade Microtech出版物。
4. Liu Lianto等,“用于RFIC的新型MIM电容器等效电路模型”,2007微波和毫米波国际会议技术文摘,第1-3页。
5. Seong-Sik Song等,“用于RF应用的简单宽带金属-绝缘体-金属(MIM)电容模型和衬底接地屏蔽的影响”,日本应用物理学会,43卷4B,2004年,第1746-1751页。
6. M.D. Brunzman,“晶圆上(SOLT)校准的验证”,Agilent EEsof EDA出版物5989-9467EN.pdf,2003年9月。<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9467EN.pdf>。
7. M.D. Brunzman,“去嵌入串联连接/传输配置器件”,Agilent EEsof EDA出版物5989-9466EN.pdf,2008年3月27日。<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9466EN.pdf>。
8. X. Shi等,“CMOS RFIC晶圆上单个和多个过孔的表征和建模”,微波和光学技术快报,50卷第3号,2008年3月,第713-715页。
9. R. Sanusi等,“应用于2.4 GHz PHEMT低噪声放大器设计的可扩展MIM电容器多项式方程模型的开发”,2009年亚太微波会议文摘,第2518至2521页。
10. A. Mellberg和J. Stenarson,“三个简单可扩展MIM电容器模型的评价”,IEEE微波理论和技术,54卷第1期,2006年1月,第169-172页。