

# RF SOI:引起射频系统设计的革命

## RF SOI: Revolutionizing RF System Design

作者 : Peter A. Rabbeni, Alvin Joseph, Theodore Letavic, Anirban Bandyopadhyay  
GlobalFoundries 公司

**最**近,在帮助解决一系列挑战(保证用户的无缝链接,无论何时何地都可访问到互联网等)的过程中,RF SOI也在移动射频世界掀起了一场风暴。云计算的引入使用户的预期更高。RF SOI的良好定位,使其成为一个创新的平台,它可以改进性能,降低整个系统成本(实现这些不断提升的预期,领先于不断革新的网络需求)。本文介绍了一些业界的发展状况和未来趋势以及RF SOI是如何提高射频系统性能的,等等。

### 无线环境

过去五年间,发送给用户的内容呈现指数增长。在发达国家,在互联网上,通过一些服务(比如Netflix和Hulu)发送高清视频已经是非常的普遍。随着人们对高质量信息内容的需求,他们会想到需要更大的带宽,但将来,这让位于真实非压缩1080p和4K的视频传输。Cisco预测,到2019年,全球互联网信息传输将是2014年水平的3倍,

上升为每月168艾字节(EB,Exabyte),每年累计上涨超过23%。

云计算应用的增多使得人们可以在任何地方访问这些内容丰富的数据,更为重要的,可以通过移动通信来访问。对经验丰富的用户来说,传输这些内容只有通过高数据率来进行(在可获得的频谱限制范围内尽可能地减少等待时间)。对高数据率的需求是当前无线通信标准向前发展的主要驱动因素之一。最近五年间,无论是蜂窝电话还是Wi-Fi都在以史无前例的速度向前发展着。蜂窝标准已经从2G/2.5G过渡到3G/4G,目前已有4G/

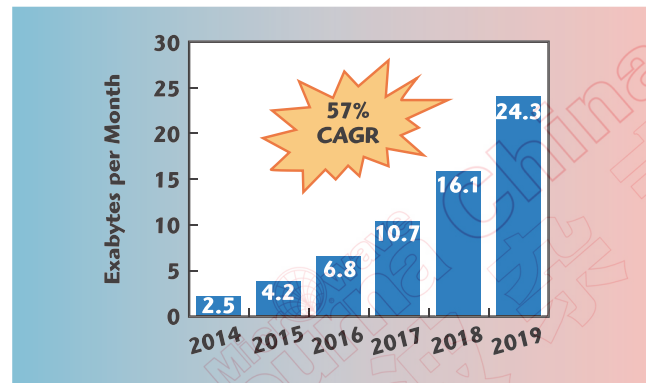


图1. (a)常规H面喇叭;(b)采用SIW技术的天线。

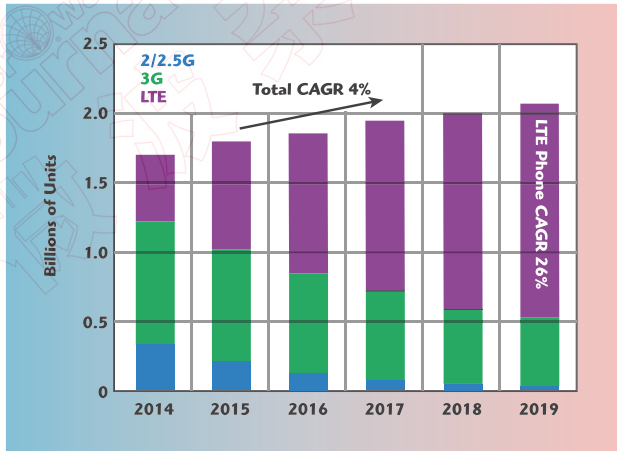


图2. 全球手提无线设备预测。

LTE。Wi-Fi 标准也是一样，已从开始的 802.11a/b/g (作为 56 Kbps 无线猫的替代) 发展到今天的 802.11ac, 与 CAT6 无线以太网联接标准形成竞争，展望了 Gbps 的无线通信速度。

无线数据消费的发展与这一转变同时进行着。Cisco 还预测，在 2014 到 2019 年间，全球总的移动数据信息传输量将增长 10 倍，将超过每月

(2014~19 CAGR = 26%)。尽管整个移动电话市场增长已开始趋于稳定 (CAGR = 4%)，但人们对 LTE 手机的实际需求将会维持整个移动终端市场的增长速度。设备不断从支持老旧的标准进一步向能够提供丰富用户体验的设备发展，这清晰地表明了这种转变，如图 2 所示。

在移动设备中，能够实现数据

24EB (图 1)，增长率几乎是全球总的数据传输的翻倍。打一个比方，这样的数据量相当于每个月将国会图书馆的所有文本和多媒体内容发送 7 万次。

假如在移动电话领域能够快速推广 LTE 的话，这些预测就不难理解了

率的增长并不容易。蜂窝频谱在各种领域的分配是面临的挑战，已浮出了水面，一些零碎的频带像个大杂烩，载体必须作为网络部署的一部分进行处理。作为一种蜂窝标准，LTE 的出现使得这更为明白；LTE 目前已定义了超过 40 个频段，它们中的许多是不连续的，目前覆盖了 700 MHz~2.6 GHz，有人建议在这一范围的上下再增加更多的频谱。通过采用各种技术 (包括高阶正交频分多址 (OFDMA) 和载波聚合)，标准条款可以使高数据率 (下载 >300 Mbps, 上传达到 75 Mbps) 得以实现。这些条款能够实现尽可能高的频谱效率，从而在给定的区域频率规划范围内获得尽可能高的目标数据吞吐量和

服务更多的用户。在 Wi-Fi 网络中，有关数据率扩展的类似条款不仅使用户在丰富数据内容下有更好的用户体验，而且可以通过卸载电信级 Wi-Fi 访问点的潜在方法来增加蜂窝网络容量。例如，IEEE 802.11ac Wi-Fi 标准自公布以来已得到广泛采用 (在 2014~20 年间预计 CAGR 为 13%)，Wave 2 规范展望认为，通过采用多输入多输出 (MIMO) 和信道绑定技术，数据率可达到 3.5 Gbps。

### 我们不能都成为朋友吗？

LTE 要想实现高数据率，则射频接口 (前端模块，FEM) 的所有部分都要增加复杂性，而且尤其是射频收发机和基带处理器。FEM 复杂性主要来源于以下 4 个方面：

- (1) 每个手提设备支持的频带数量不断增加 (除了原有的 2G/3G 频带，还有 2 到 18 个 LTE 频带)。
- (2) 引入了高频频带 (2.5 GHz 及以上有 6 个频带)。

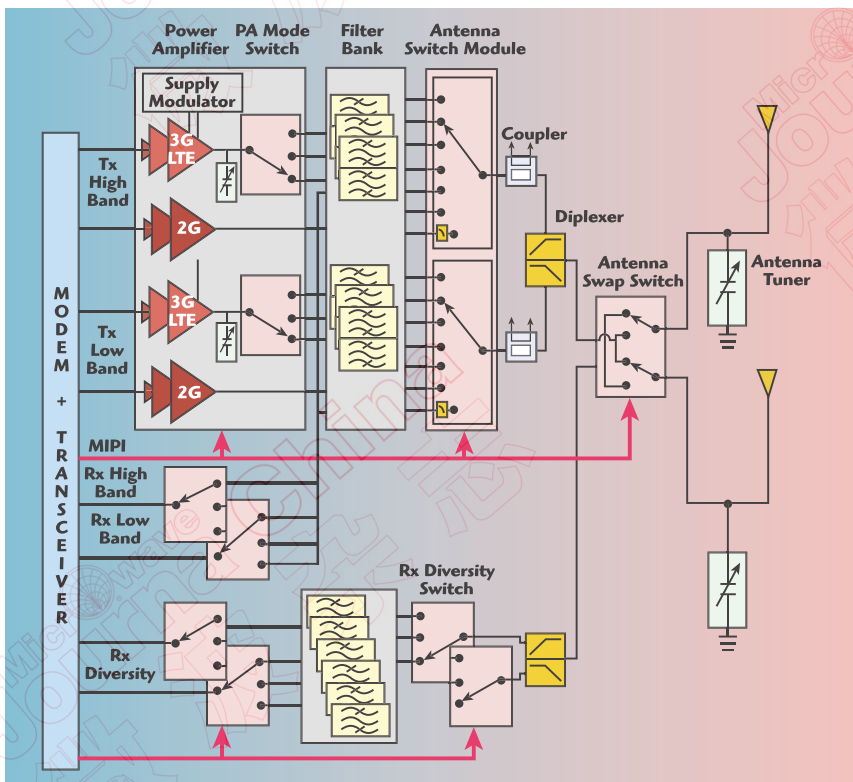


图3. 4G/LTE 射频 FEM 结构。

## 产品 到解决方案

# 毫米波 放大器

Ducommun有超过45年设计、测试和制造毫米波放大器的经验。

## Ducommun

· 高功率、单DC电源/内部时序偏置



### 32 至 36 GHz 功放

- AHP-34043530-01
- 增益：30 dB (最小)
- 增益平坦度：±2.0 dB (最大)
- P-1dB：34 dBm (典型)、33 dBm (最小)

· 宽带、低噪声及高增益



### 26.5至40.0 GHz低噪声放大器

- ALN-33144030-01
- 增益：30 dB (最小)
- 增益平坦度：整个频段±1.0 dB
- 噪声系数：4.0 dB (典型)

欲了解更多信息，  
请联系我们的销售团队

☎ +1 (310) 513-7256

✉ rfsales@ducommun.com

📱 微信 ID: rfsalesducommun

联系方式

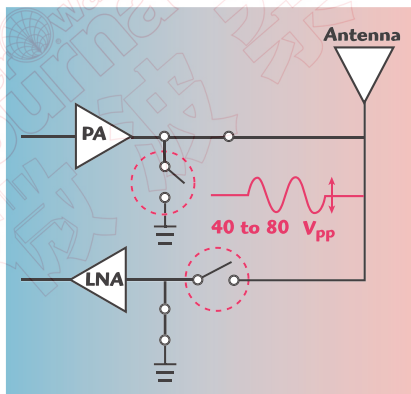


图 4. 具有高的天线 VSWR 的峰值电压。

(3) OFDM (也用在其它 UMTS 技术和 Wi-Fi 中) 较高的峰均功率比 (PAPR)。这里 PAPR 达到 11.5 dB。

(4) 由于手提终端天线的尺寸受限，从而带来低效率，而且对电池长寿命的需求，载波聚合也进一步提高了这种复杂性。

一种先进的 LTE 智能电话结构展示了这种复杂性，如图 3 的示例框图所示。在移动设备中，要想支持多个频带，需要有一组复杂的滤波器和开关 (具有较高掷数)，可以将信号在天线与主射频收发机 / 基带之间来回传送以进行收发处理。在这组滤波器和开关中，必须仔细考虑路径损耗、隔离度、阻带抑制以及线性度，以确

保被处理信号的保真度。

通过在“开”信道和“关”信道间提供高的电气隔离，射频开关在这一结构中扮演着重要角色，同时保护高灵敏度接收信道免受大功率发射信号的伤害。由于信号路径中任何 FEM 元器件的非线性，LTE 发射机的高峰值功率 (达到 1W 或以上) 还会产生谐波频率分量和非谐波互调频率分量。这些包括射频开关和其它有源无源元器件，比如调谐器、低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA) 和滤波器。这些非理想的频率分量会从理想的基础信号吸收功率，而且还可能在接收机低噪声放大器中引起饱和，这取决于功率电平。

调制 LTE 信号的高峰值平均比要求所有 FEM 元器件要有高的线性度特性。考虑到器件的平均功率入射，信号链中任何地方的线性度降低要求信号“减轻”以使整个信号路径保持在线性工作范围内。降低的线性度天生地转变为移动设备向发射基站发送的低功率信号，这种低功率然后由接收基带处理器进行处理。两种情形都可能引起通话中断。

尽管无法马上凭直觉获知，但

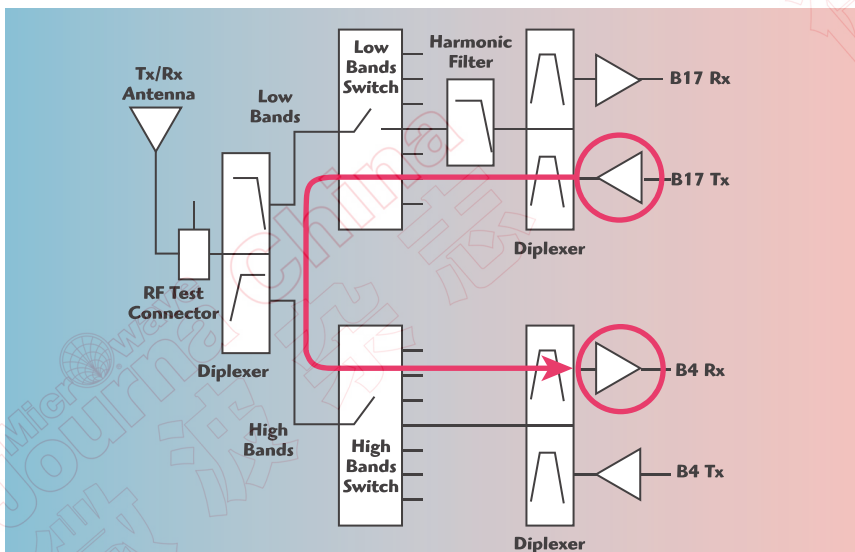


图 5. 隔离度和干扰对当前 LTE 频段计划中载波聚合的实现形成挑战。

信号“减轻”还是会影响电池的寿命的。当工作在饱和功率电平时，功率放大器常常是最为有效的；但是，对线性度来说，这些条件是最坏的。因此，对线性传输，需要减轻功率电平，从而会使放大器效率低些。一些特殊技术（比如平均功率跟踪（APT）和包络跟踪（ET））已被采用，从而根据被调制输出波形的包络实时地调整 PA 偏置，因而功率放大器总是工作在接近最佳效率。这些技术已经成功地实现了利用。从基带/应用处理器向 PA 偏置控制器发送所需的控制指令来精确跟踪调制信号包络，它需要额外计算周期。为提高 PA 的线性度，数字预失真（DPD）技术也已用于移动应用。这些 DPD 和 ET 技术也正兴起在 Wi-Fi 功率放大器应用领域，一些重要挑战需要加以解决。

当今移动设备形状因子的物理限制也对今天无线标准的不断变化有着影响。Wheeler 极限将天线结构的物理尺寸与其所得的增益和带宽联系起来。在所有 40 多个 LTE 频带上，要想从一部天线获得平坦的宽带增益和方向性，想不大于一片口香糖是非常困难的。此外，在这一频率范围内，天线提供给前端元器件（开关或滤波器/双工器）的阻抗不是恒定的，而且变化很大，导致 VSWR 很高，达到 20 : 1。这使得出现在主要天线射频开关上的天线反射信号高达 80 Vpp（图 4）。高反向击穿在可靠地处理这些情况时至关重要。在一些无线电路结构中，新近引入的一些技术，比如天线阻抗调谐和孔径调谐可以解决这些问题。

阻抗调谐器一般在主天线射频开关组件的天线端口处，用来调节提供给 PA 的阻抗，通过将一些能量

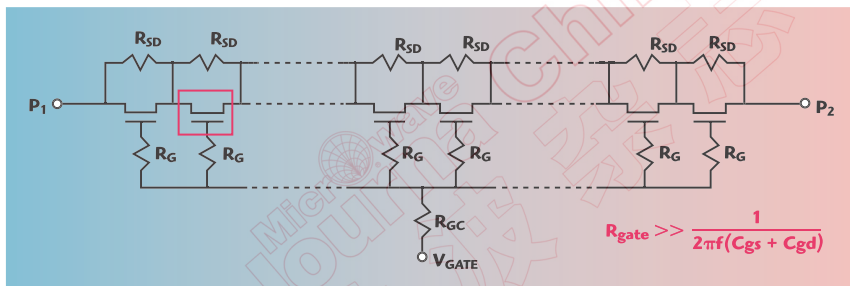


图 6. RF SOI 器件堆叠。

耦合到检波器来测量来自天线的反射电压。通过采用在基带实现的有源反射功率测量技术，可以采用固定调谐器设置在频带上（开环）或实时地（闭环）调节阻抗。孔径调谐器一般放置于天线输入端，用来主动调节天线辐射方向图，以在给定的方向上获得最大的 EIRP。两种方法都可用来提高移动设备的灵敏度，并在基站和用户之间提供可能最好的信号。

蜂窝 FEM 中讨论的所有复杂性（插入损耗、隔离度、非线性度、天线带宽和失配）由于载波聚合的引入变得更为糟糕。载波聚合同时将两个或两个以上的频道同时捆绑在一起，从而增大信号的有效带宽，提高整个数据率。在当今的光纤网络中，类似技术也得到采用，其中将多个高速信道组合在一起，产生一个超高速数据流。能够支持下行载波聚合的手提设备已经推向了市场。未来，LTE 标准可以使手提设备支持上行载波聚合。支持这些需求的手提设备必须能有效地工作，并具有良好的接收特性。这只有通过进一步提高一些品质因数（插入损耗、线性度）才能获得。

与 CA 相关的复杂性可以从频带 4 和频带 17 间的一个特殊聚合示例可以明显地看到，当人们发现 B17 发射（700 MHz）的第三个谐波落在 B4 接收（2.1 GHz）的位置时，几年前人们提出了一个问题，对射频开关隔

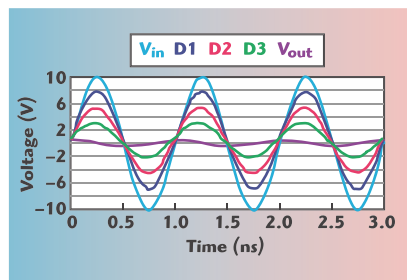


图 7. 一个 4 堆叠 SOI FET 上的 10V 峰间输入，在每个 FET (D1, D2 和 D3) 的漏极节点有几乎相同的压降。

离度、带外干扰抑制和路径线性度提出了更严格的约束条件，从而减轻了这一问题（图 5）。即便接收频率不是发射频率聚合频带的多倍，还是会对载波聚合频率对组合产生干扰，这里，接收频率与发射频带的一个互调频率相一致。有许多载波聚合频带对属于这一类型。

## Wi-Fi 怎么样？

FEM 结构的类似复杂性可以在标准 802.11ac Wi-Fi 中看到。采用 MIMO 通道绑定和波束形成技术，可以使信号保真度达到最佳，这些技术中的每一个在实现时都有其自身挑战。与蜂窝系统相比，Wi-Fi 工作在较低的信号功率电平（相比于 LTE 的 23 dBm 来说，其最大用户设备发射功率为 20dBm），因为其覆盖范围更近一些。但是，这些系统采用复杂的调制来支持高数据率（在 802.11ac 中达到 256 QAM）和高的载频（5.8 GHz），这些需要仔细进行系统设计。由于高 PAPR 和 EVM 需求（对 256

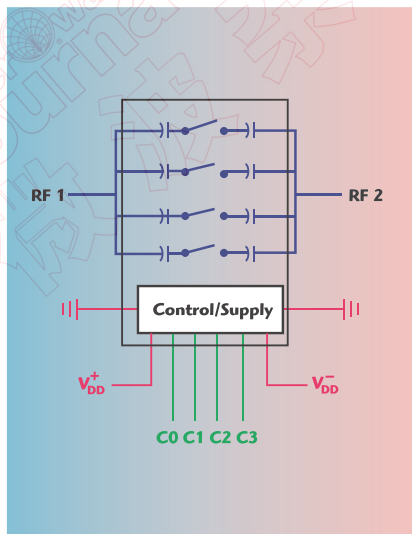


图 8.16 种状态可变电容组。

QAM 星座密度，发射要小于 1.8%)，Wi-Fi 802.11ac 功率放大器的线性度要求非常严格。由于重叠通道的干扰水平高，尤其在 2.5 GHz 频段，所以对 LNA 噪声系数和线性度的要求（对射频开关也是如此）也是非常严格的。这些需求对整个前端性能形成很大压力，其目的是要最大限度地降低功率损耗，并获得良好的接收性能。

在一个访问点，802.11ac 保证有 6.7 Gbps 的峰值数据率，有带宽 160 MHz 和一个  $8 \times 8$  的 MIMO 结构，同时兼容性终端设备将争取  $2 \times 2$  的 MIMO 结构有 1 Gbps。这些需求对 PA 效率和整个方案尺寸（它喜欢硅集成）形成了很大的压力。将来，为驱动大于 10Gbps 的数据率，今天这里讨论的标准将推向改进频谱效率的 802.11ac 传输（正在 802.11ax 中提出）或走向更高的频段（802.11ad）。在可以预见的未来，Wi-Fi 数据率要求将对整个前端效率施加很大的压力，从而最大限度地降低功率损耗和组件尺寸。

### 为什么是 RF SOI 和为什么是现在？

众所周知，在许多领域，RF SOI

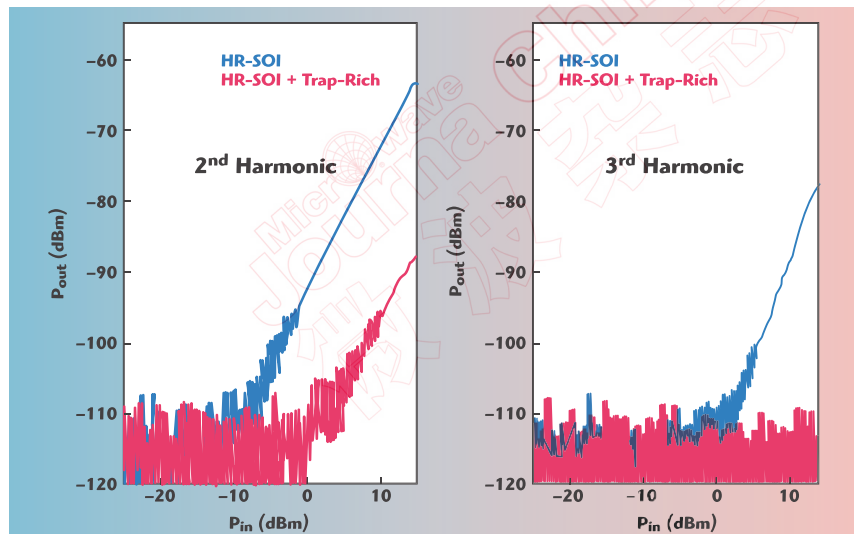


图 9. 共面传输线的谐波失真，HR SOI 与有一个多陷阱层的 HR SOI 之间的比较。

已经成为蜂窝和 Wi-Fi 射频开关适用的技术。在 3G/4G 应用的早期，人们需要一种新型技术可以获得相同或类似性能（考虑到  $F_t$ 、机动性和击穿电压），有足够的生产能力满足理想的市场需求（低廉的成本）。基于这一点，GaAs PHEMT 和 PIN 二极管技术常用于射频开关。RF SOI 固化在移动 FEM 中的主要特征包括：

- (1) 对更高的电压，设备具有堆叠能力；
- (2) 对低插入损耗，有低的导通电阻 ( $R_{on}$ )；
- (3) 对高隔离度和高的 Q 值，有低的低关闭电容 ( $C_{off}$ ) 和衬底寄生；
- (4) 逻辑和控制集成；
- (5) 采用 III-V 技术，有低成本和改善的经济价值；
- (6) 主流硅制造。

已有文献报导认为，高电阻率衬底（具有足够高的栅极电阻）上的 RF SOI 允许终端体漂浮，并允许多个 FET 设备堆叠以便处理高电压、大功率情况（图 6）。

将 RF SOI 这些固有特性与适当的偏置网络设计结合起来，可以获得

关闭状态下堆叠上的正确的分压和开启状态下 ( $R_{on}$ ) 很低的电阻，从而获得低的插入损耗（图 7）。通过降低通道长度，本征器件  $R_{on}$  的降低基本上是可以获得的，但这必须与相应的  $BV_{dss}$  的降低进行仔细平衡。为了维持高电压处理能力， $BV_{dss}$  的降低要求有较大的器件堆叠高度和芯片面积。关闭状态电容 ( $C_{off}$ ) 是开关设计中另一个关键性度量标准，决定着器件所能获得的关闭状态隔离度。通过降低  $C_{off}$  而获得大的隔离度是一项挑战，必须采用一系列技术，包括枢纽工程、器件设置布局和金属堆叠优化。 $R_{on} C_{off}$  乘积不断减少的同时维持合理的  $BV_{dss}$ ，允许设计出复杂的开关产品。

通过能够处理大功率电平，并可以获得高隔离度、低插入损耗的高质量射频开关，人们可以设想一下其它一些应用（这些器件可以用上）。通过将射频开关和电容串联或并联到一个阵列中，可以产生一个可选的或可调的高 Q 电容器组（图 8），它可以用作动态或可变调谐单元。当前许多 RF SOI 技术拥有高质量金属绝缘层金属 (MIM) 和金属-

Performance Metric	GaAs	SiGe	RF SOI	CMOS
Insertion Loss	+	+	+	-
Linearity	+	+	+	-
Passives Q	+	+	+	-
Breakdown Voltage	+	+	+	-
Thermal Conductivity	-	+	+	+
Digital Integration	-	+	+	+
Cost	-	-	+	+

图 10. 关键 FEM 技术的比较。

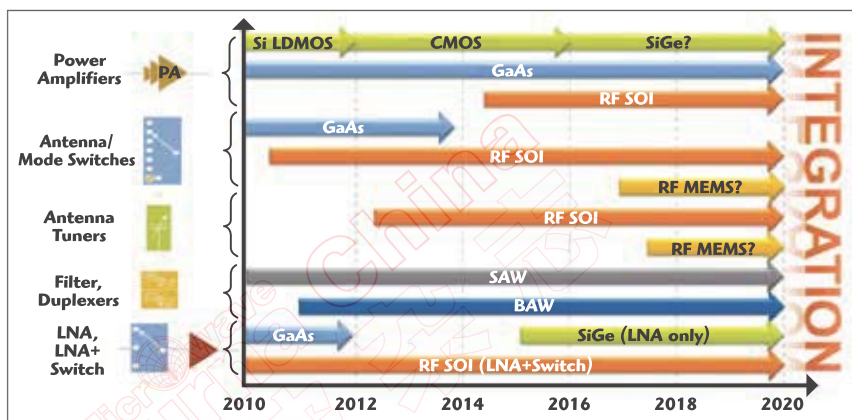


图 11. RF FEM 技术发展趋势。

氧化物-金属 (MOM) 电容, 具有合理的高密度 ( $>2 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ ) 和高的击穿电压, 从而支持大的驻波信号。MIM/MOM 电容和射频开关的组合使调谐器成为可能, 从而使得 RF SOI 可以用于其它一些应用中, 比如天线阻抗匹配或天线孔径调谐, 从而解决天线带宽和阻抗变异性的问题。

所描述的两种应用都要求一个数字控制单元来选择给定的开关结构或调谐器状态。在 GaAs 或其它 III-V 技术中, 这一般要求有一个独立的 CMOS 控制芯片与 GaAs 器件搭配, 从而根据来自基带处理器的指令动态地调整器件状态。RF SOI 允许将控制单元和射频功能集成到单个芯片中, 从而降低成本、空间以及整个系统的复杂性。

为了最大限度地降低大功率、多载频条件下畸变产物的产生, 考虑到功率电平问题, 所描述的每个应用要求很高的线性度和低的谐波响应。在今日的 LTE 系统中, 技术指标要求射频开关产生任何谐波在主载波信号下应大于 70 dB。提高后的 FET 击穿电压允许降低堆叠的高度, 改进入插入损耗和相关的谐波振荡。但是, 非线性度的另一个分量与衬底中表面电荷复合有关, 这里, 大功率射频信号会在 SOI 硅衬底/ 隐埋氧化物 (BOX) 界面上感应生成寄生导电层。射频信号可能会耦合到这一寄生导电层, 并调制其导电特性。通过各种衬底处理, 比如电荷陷阱注入 (charge trap-injection), 这种动态变化已得到处理, 它最大限度地减少了在界面上产生寄生导电层的可能。与没有经过

这些处理的标准高电阻率衬底相比, 器件的线性度性能得到 15 dB 的改善 (图 9)。

RF SOI 能让 FEM 的另外两个关键元器件 (LNA 和 PA) 进行集成。LNA 的噪声系数和增益性能受到  $f_t$ 、 $f_{max}$  和 FET 栅极电阻的影响。SOI 提供了一个极低电容器件, 因此有助于  $f_t$  和  $f_{max}$ 。自从 RF SOI 引入初期, Wi-Fi FEM 已广泛用于开头和 LNA (集成单个芯片上)。随着载频聚合在 LTE 蜂窝应用中的发展, 无论对主发射/接收, 还是分集接收天线路径, 人们都期待 LNA 性能得到改善。这为 RF SOI 提供了一个机会, 允许优化的开关和 LNA 在蜂窝 FEM 中进行集成。另一方面, 功率放大器需要高的  $f_t$  和击穿电压。文献中, FET 堆叠概念已在高电阻率 (HR) 衬底 RF SOI 器件上得到验证, 从而能够提供可接受的蜂窝 PA 性能。HR SOI 还允许改善的无源元器件支持片上匹配。许多挑战 (与 SOI 上 PA 集成有关), 比如热和衬底耦合, 随着时间推移已得到了解决, 而且产品已得到演示验证。在使这些解决方案成为主流的过程中, RF SOI 电路和结构创新是重要的驱动因素。今天, 在解决 FEM 应用问题的所有技术中, 在满足关键性技术和经济需求的过程中, RF SOI 能够提供独特的平衡 (图 10)。

### RF SOI 的未来

随着智能电话、平板电脑以及其它移动消费应用的快速兴起, 这对基于 RF SOI 技术的芯片产生了机会, 但也提出了更高的要求, 尤其是对天线接口和射频前端元器件, 比如射频开关和天线调谐器。相比于 GaAs, 作为一个低成本、更为灵活的备选方

上海军友射频技术有限公司  
Juncoax RF Technologies Co., Ltd.

\*超低损耗  
\*温度相位稳定  
\*机械相位稳定

线径: 3.5mm 1-DC-40GHz 阻抗: 2.5dB M=40GHz  
线径: 3mm 1-DC-50GHz 阻抗: 1.2dB M=26.5GHz  
线径: 2.5mm 1-DC-18GHz 阻抗: 0.6dB M=18GHz  
线径: 3.5mm 1-DC-40GHz 阻抗: 2.9dB M=40GHz  
线径: 1.6mm 1-DC-26.5GHz 阻抗: 1.5dB M=26.5GHz  
线径: 2mm 1-DC-26.5GHz 阻抗: 1.5dB M=26.5GHz  
线径: 2mm 1-DC-18GHz 阻抗: 1dB M=18GHz  
线径: 2.5mm 1-DC-26.5GHz 阻抗: 4.4dB M=26.5GHz  
线径: 4mm 1-DC-26.5GHz 阻抗: 2.5dB M=26.5GHz  
线径: 3.18mm 1-DC-40GHz 阻抗: 3.8dB M=40GHz  
线径: 3.5mm 1-DC-26.5GHz 阻抗: 1.7dB M=26.5GHz  
线径: 2.24mm 1-DC-87GHz 阻抗: 1.7dB M=87GHz  
线径: 2.5mm 1-DC-40GHz 阻抗: 8dB M=40GHz  
线径: 1mm 1-DC-26.5GHz 阻抗: 2.5dB M=26.5GHz

PT系列 极低温相电连接器  
— 解决重要苛刻的测试场景

硬相电连接器  
DC-67GHz

Juncoax

Tel.: 021-69760391  
E-mail: sales@juncoax.com  
www.juncoax.com

案, RF SOI 被认为是目前为移动设备制造的大多数射频开关和天线调谐器的选用技术。

随着无线标准的进一步发展, 整个 RF SOI 价值链 (包括手提设备供应商、射频元器件制造商、SOI 生产厂家以及衬底供应商) 将面临更为艰巨的挑战。下一个 3GPP LTE 标准 (Rel. 13) 的发布将为上行载波聚合铺平道路。这一需求将对所有 FEM 元器件 (尤其是射频开关) 提出线性度要求, 比今日的要求更进了一步 (估值在 85~90 dBm IIP3 间变化)。

对在未授权频带上的 LTE 应用也将定义技术指标, 并要求与 Wi-Fi 和谐共存。与此同时, 在 Wi-Fi 发展的下一阶段, 人们将会应用 1024 QAM 调制 (将进一步对 Wi-Fi FEM 元器件中的线性度和相位噪声提出要求)。在减轻线性度和接收机灵敏度要求时, 所有这些标准的动态都将对蜂窝和 Wi-Fi FEM 制造商提出一个有趣的挑战。

为解决这些极为复杂的多频带和多标准设计, 射频前端组件将要求进一步集成多个射频功能 (像功率放大器、天线开关和收发器以及数字处理和功率管理), 以减化结构和降低成本。今天, 这些功能已通过不同的技术得以解决, 但发展趋势倾向于可以获得真正集成的硅方法 (图 11)。

采用 RF SOI 实现射频前端组件功能的移动设备能够从高度集成化 (线性度和插入损耗得到改进, 从而具有更好的发射效率和更长的电池寿命, 能够享有更长的通话时间 (更低功率) 和更好的用户体验) 中受益。高度集成还导致射频电路和结构的革新, 这些技术的好处与数字信号处理结合起来, 从而产生一个灵活的动态解决方案, 以适应给定的环境条件。

这些就是硅基技术明确的好处。对 RF SOI 能力的开发利用, 这仅仅是个开端。■

#### 参考文献

1. Cisco White Paper: Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019, May 2015.
2. Cisco White Paper: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic, 2014-2019, February 2015.
3. iHS smartphone-electronics-design-intelligence-data base, Q2 2015.
4. "Cisco Will Ride the 802.11ac Wave," <http://blogs.cisco.com/wireless/cisco-will-ride-the-802-11ac-wave2>.
5. Sassan Ahmadi, "LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE releases 10 and 11 Radio Access Technologies," Chapter 13, Academic Press, 2014.
6. SOITEC White Paper, February 2013.
7. Ali Tombak, "Silicon on Insulator (SOI) Switches for Cellular and WLAN Front End Applications," IMS 2012 Workshop.
8. "Recent Advances in RF Front End for D/L Carrier Aggregation," muRata, IWPC, Lund, Sweden, June, 2013.
9. M.B. Shifrin, P.J. Katzin and Y. Ayasli, "Monolithic FET Structures for High Power Control Component Applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 37, Issue 12.
10. J. P. Raskin et al., "RF SOI CMOS Technology on Commercial Trap-Rich High Resistivity SOI Wafer", 2012 International SOI Conference.
11. S. Pornpromlikit et al., "A Watt-Level Stacked-FET Linear Power Amplifier in Silicon-on-Insulator CMOS," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010.