基于基片集成波导的高速电子系统互连技术

李晓春, 毛军发*

上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

* 通信作者. E-mail: jfmao@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2018-03-05; 接受日期: 2018-04-27; 网络出版日期: 2018-08-20

上海市教育委员会科研创新计划 (批准号: 2017-01-07-00-02-E00059)、国家自然科学基金优秀青年科学基金 (批准号: 61522113) 和国家自然科学基金面上基金 (批准号: 61771311) 资助项目

摘要 人类社会正迎来大数据时代, 对数据传输速率的要求越来越高, 迫切需要发展高集成度、高速率的新型互连技术, 满足每秒太比特甚至更高速率数据传输需求. 传统平面集成互连技术, 如微带线、带状线、共面波导等, 采用开放式结构, 受带宽与损耗限制, 其时延、衰减、串扰等信号完整性问题在数据速率达到每秒吉比特以上时非常严重, 无法满足传输需求. 为了提高传输速率, 在传统互连技术基础上, 可采用串行链路与差分技术, 均衡与预加重技术等, 但仍无法从根本上解决互连的高速数据传输问题. 基片集成波导技术作为一种新型的平面集成互连结构, 兼具传统平面集成互连的易集成与波导的宽频带、低损耗与低串扰优点, 近些年来逐渐在高速互连技术中得到应用, 实现了高速率的数据传输. 本文详细介绍了各种新型基片集成波导互连的物理结构与传播特性、传输模式与机制, 以及已实现的数据传输速率, 其中包括了作者近几年的一些最新研究成果. 按照传输模式不同, 基片集成波导互连主要可以分为 3 类: TE 模式的基片集成波导互连 (substrate integrated waveguide, SIW)、TEM 模式的基片集成同轴互连 (substrate integrated coaxial line, SICL), 以及混合模式的基片集成波导互连. TE 模式 SIW 互连为带通信道, 需对基带信号进行调制方可进行传输. SIW 互连系统引入调制技术增加了传输复杂度, 但多种调制技术的灵活运用可以增加信道利用率, 从而提高数据传输速率. SICL 互连采用 TEM 模式, 不需调制解调, 并且准封闭式结构保证了良好的信号完整性. 混合模式的 SIW 互连通过共享导体或介质, 集成了 SIW 与其他结构互连, 可同时传输 TEM 模式与 TE₁₀ 模式. 按照物理通道数分类, 基片集成波导互连又可分为单物理通道单路信号传输、单物理通道多路信号并行传输、多物理通道多路信号并行传输. 单物理通道单路信号传输, 采用单个物理信道, 基于单模或多模方式传输一路信号. 单物理通道多路信号传输, 则采用单个物理信道, 通过多种模式或复杂调制技术传输多路信号. 多物理通道多路信号并行传输, 采用多个物理信道, 基于单模或多模方式并行传输多路信号. 各种新型基片集成波导互连的提出, 为实现高速率的数据传输提供了关键技术与解决方案.

关键词 基片集成波导, 基片集成同轴线, 互连, TEM 模式, TE 模式, 高速数据传输

引用格式: 李晓春, 毛军发. 基于基片集成波导的高速电子系统互连技术. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1165–1182, doi: 10.1360/N112018-00044
Li X C, Mao J F. Substrate integrated waveguide interconnects in high-speed electronic systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1165–1182, doi: 10.1360/N112018-00044

1 引言

1.1 研究背景

人类社会正迎来了大数据太比特时代, 对数据传输速率的要求越来越高, 因此迫切需要发展高速电子系统互连技术.

传统的平面集成互连技术, 如微带线、带状线、共面波导等, 采用开放式电路结构, 在高频条件下显示出高损耗的缺点, 并且随频率的上升损耗急剧增加, 导致时延、衰减、串扰等信号完整性问题. 在数据传输速率达到每秒吉比特以上时, 传统的平面集成互连技术的信号完整性问题非常严重, 无法满足高速率数据传输的需求.

为了提高互连的性能, 目前主要采用的改进技术包括: 串行链路技术 (serializer/deserializer, SER-DES), 将并行数据总线转为串行链路, 从而降低互连线间的串扰, 但同时也降低了布线密度; 均衡和预加重技术, 补偿了传统互连在高频时的损耗, 扩展了信道带宽, 但仍无法避免电磁干扰问题, 同时还增加了额外的电路开销, 导致成本的上升; 差分技术, 采用两路通道传输差分信号, 抑制共模噪声, 但无法降低损耗和增加带宽. 因此, 传统平面集成互连及其改进技术, 难以从根本上解决高速率数据传输的信号完整性问题.

基片集成波导 (substrate integrated waveguide, SIW) 作为一种新型的波导结构, 在 20 世纪 90 年代被提出^[1]. 它将矩形波导结构与平面集成电路工艺相结合, 兼具传统平面集成互连的高集成度与矩形波导的高品质因数 (Q) 值优点. 基片集成波导互连通常为准封闭式结构, 因此具有抗电磁干扰, 辐射小, 损耗低的优点. 图 1 对比了基片集成波导互连与微带线、带状线的损耗. 三种互连结构均采用 PCB 工艺 Rogers5880 材料. 可以看出基片集成波导互连在高频时 (频率超过 40 GHz) 的损耗远低于微带线与带状线的损耗. 之后, 随着集成电路新材料、新工艺的出现, 微波毫米波电路向高密度高集成的方向发展, 基片集成波导技术的概念得以扩展^[2], 矩形波导以及其他非平面化的波导结构均可转化为单一衬底上的平面集成波导. 方同轴波导在平面集成电路中转化为基片集成同轴互连 (substrate integrated coaxial line, SICL)^[3]. 为了降低介质损耗, 采用空气填充的基片集成波导在印刷电路板 (printed circuit board, PCB)、低温共烧陶瓷 (low temperature co-fired ceramic, LTCC) 工艺中得以实现^[4,5]. 为了提高集成度, 半模基片集成波导^[6]、折叠基片集成波导^[7]结构被提出, 可使基片集成波导所占面积减小一半, 提高了基片集成波导的集成度.

基片集成波导技术为基片集成电路的实现提供了关键技术. 一方面, 由于高 Q 值的优点, 基片集成波导广泛应用在谐振器^[8]、滤波器^[9]、相移器^[10]、功分器^[11]、天线^[12]、环形器^[13]等微波毫米波器件中; 另一方面, 由于基片集成波导具有低损耗、宽频带、抗电磁干扰的优点, 近年来逐渐在高速互连技术中得到应用, 实现了高速率的数据传输.

1.2 国内外研究动态与现状

按照传输模式不同, 基片集成波导互连技术主要可以分为 3 类: TE 模式的基片集成波导互连, TEM 模式的基片集成同轴波导互连, 以及混合模式的基片集成波导互连.

TE 模式的基片集成波导互连 (SIW), 其传输模式与矩形波导类似. 它由上下导体板和两侧金属过孔阵列构成准封闭式结构^[1]. SIW 的主模为 TE₁₀ 模式, 第一个高次模为 TE₂₀ 模式, 信道呈现带通特性, 因此 SIW 在传输基带信号时, 信号必须经过调制解调. 直接混频技术是最简单的调制解调技术. 该技术将基带信号直接调制到载波上, 使频带落在 SIW 的通带内, 经基片集成波导互连传输后,

图 1 (网络版彩图) 基片集成波导 (SIW) 与带状线、微带线的传输性能对比

Figure 1 (Color online) Transmission performance of SIW, strip line and microstrip line

在接收端进行解调, 将其下变频到基带^[14]. 由于基片集成波导互连在截止频率处有较强的色散, 信号传输中应避免使用截止频率. 为了补偿基片集成波导在截止频率处的色散, 文献 [15] 设计了线性渐变的 SIW 色散均衡器. 此外, 小型化的基片集成波导结构, 如半模 SIW (half-mode SIW, 简称 HMSIW)、折叠 SIW (folded SIW, 简称 FSIW) 也在高速互连中得以应用. HMSIW 的主模为 TE_{0.5}, 第一个高次模为 TE_{1.5}. 因此, 与具有相同主模截止频率的 SIW 相比, HMSIW 的宽度是 SIW 的一半, 传输带宽是 SIW 的 2 倍^[16,17]. 折叠基片集成波导互连的面积是相同带宽基片集成波导互连的一半, 已在 CMOS 集成电路工艺中得到了应用^[18]. 进一步, 为了提高信道利用率, 正交移相键控 (quadrature phase shift keyin, QPSK)^[19,20]、正交振幅调制 (quadrature amplitude modulation, QAM)^[21,22] 等调制技术在 SIW 的传输系统中得以应用, 大幅提高了数据传输速率. 值得注意的是, 调制技术采用混频器、放大器等微波元器件, 目前这些器件的带宽限制了 SIW 传输系统的带宽, 成为限制传输速率进一步提升的主要因素. 采用 PCB 工艺 Rogers5880 的基片集成波导互连的损耗为 0.006 dB/mm, 已实现的最高传输速率为 15 Gbps^[20].

TEM 模式的基片集成同轴波导互连 (SICL), 与方同轴波导类似, 上下导体板和两侧金属过孔阵列构成了同轴互连结构的外导体, 中间的金属线则作为内导体, 金属层之间为介质^[3]. 由于 SICL 的主模为 TEM 模式, 不需调制可直接传输基带信号. 因此与 SIW 相比, SICL 的成本与复杂度都大幅降低. 此外, SICL 为准封闭式结构, 相邻通道间可共享外导体, 具有宽频带、高隔离度、低串扰的优点^[23,24]. 在此基础上, 文献 [25] 提出了 SICL 互连阵列结构, 并采用 LTCC 工艺实现了多通道并行传输的 SICL 互连阵列, 其单路带宽为 50 GHz, 损耗约为 0.02 dB/mm, 总数据传输速率达到 1.35 Tbps.

混合模式的基片集成波导互连, 采用单物理信道或多物理信道, 基于 TEM 与 TE 的混合模式, 传输高速率的基带信号或其调制信号. 文献 [26,27] 在 SIW 腔体中嵌入一条带状线, 在两个物理通道中分别采用 TE₁₀ 模式与 TEM 模式, 并行传输两路信号. 类似地, SIW 与两条内嵌带状线可实现三通道的三路信号并行传输^[28]. 而文献 [29] 则基于单个 SIW 物理信道, 分别采用 TE₁₀ 与 TE₂₀ 两种模式并行传输两路信号. 最近, SIW 与 SICL 的混合互连结构被提出^[30], 其特点为将 SIW 作为 SICL 的内导体, SIW 与 SICL 形成两路通道, 分别采用 TE₁₀ 与 TEM 模式并行传输两路信号. 文献 [31] 提出了模式选择传输线概念, 采用类似接地共面波导 (grounded coplanar waveguide, GCPW) 结构, 在低频时采用 TEM 模式, 高频时采用 TE₁₀ 模式共同传输一路直流到近太赫兹的超宽带信号. 混合模式的

基片集成波导互连采用多种模式传输信号, 其设计难点在于多种模式的激励与耦合, 模式的选择与调控. 然而, 目前模式耦合与调控理论尚不完善, 还需发展模式耦合与调控理论, 实现低色散多模传输的基片集成波导互连结构的设计与优化.

基片集成波导互连在与其他平面集成电路连接或测试时, 需要设计转接结构, 达到阻抗匹配与电磁场匹配, 实现宽频带、低损耗、低串扰的信号传输; 此外转接结构也可以作为模式的激励与耦合结构, 激发所需的电磁场模式. 基片集成波导互连的转接种类多样, 主要包括: SIW 与微带线的转接^[32~36], SIW 与 SIW 之间的转接^[37]; SIW 与共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 的转接^[38,39]; SICL 与共面波导的转接^[40,41]. 转接结构的形式主要有: 通孔转接、缝隙转接、渐变微带转接、渐变 SIW 转接等. 转接结构的设计难点在于: 结构的不连续性容易引起阻抗失配, 导致反射损耗增加. 此外, 不同模式间的转化与激励也是转接结构设计的难点. 因此, 如何对转接结构进行电路建模与设计优化是保证高速率信号传输的关键问题.

随着基片集成波导在微波毫米波与数字电路中的应用, 对其建模与性能仿真的研究工作也随之展开. 针对 SIW 的性能分析, 可采用全波电磁仿真方法, 包括: 边界积分谐振模展开 (boundary integral-resonant mode expansion, BI-RME) 方法^[42~44]、频率有限差分方法 (finite-difference frequency-domain, FDFD)^[45]、有限元方法 (finite element method, FEM)^[46,47]、线法 (method of lines, MoL)^[48]、矩量法 (method of moment, MoM)^[49]、时域有限差分方法 (finite-difference time-domain, FDTD)^[50] 等; 也可将 SIW 等效为矩形波导, 推导有效宽度与传播常数的解析公式^[42,47,51,52]; 还可将 SIW 等效为广义传输线, 求解其电报方程^[53]. 此外, 对 SIW 的功率容量^[54]、通孔阵列缝隙引起的辐射损耗^[47]、表面粗糙度对导体损耗的影响^[55]、空气填充孔对 SIW 介质损耗的影响^[56]、相邻 SIW 间的串扰与耦合特性^[57,58] 也进行了研究. 半模 SIW 也可等效为矩形波导^[59]. 文献 [60,61] 计算了 SIW 的复传播常数. 文献 [62] 分析了半模 SIW 的串扰特性, 其近端串扰与远端串扰特性均优于微带线. 文献 [63] 分析了折叠基片集成波导的传播特性. 文献 [64] 将 SICL 等效为方同轴波导, 推导了特性阻抗公式. 研究结果表明, 基片集成波导互连具有低损耗、低串扰、宽频带等良好的信号传输特性与电磁兼容性.

1.3 本文章节介绍

本文详细介绍了各种新型的基片集成波导互连结构、传播特性、传输模式与传输机制. 第 2 节介绍了 TE 模式的基片集成波导互连, 包括 SIW 与 HMSIW, 其波导与转接结构, 传播特性, 以及基于混频, QPSK, QAM 调制解调技术的 SIW 互连系统. 第 3 节介绍了 TEM 模式的 SICL, 其互连与转接结构, 传播特性以及多通道并行传输的 SICL 互连阵列. 第 4 节总结了各种混合模式的基片集成波导互连, 包括了多模传输的 SIW 互连、SIW 与带状线的混合互连、SIW 与 SICL 的混合互连、模式选择传输线. 第 5 节做出了总结.

2 TE 模式的基片集成波导互连技术

2.1 SIW 互连结构

标准 SIW^[1] 是由传统的矩形波导演变而来, 其结构是由上下导体板和通孔阵列构成的电子带隙结构, 如图 2 所示. 上下两层金属以及左右两列金属通孔组成了 SIW 的周壁, 金属层之间为介质基板. 图 2 中 l 是 SIW 的长度, W 是两列金属通孔之间的距离, d 是通孔的直径, s 是相邻两个通孔的距离,

图 2 标准 SIW 波导结构

Figure 2 The structure of a standard SIW

h 是介质层的厚度, t 是金属层的厚度. SIW 兼具传统波导损耗小、抗电磁干扰, 以及传统平面互连易集成的优点.

SIW 可以通过 MoM, MoL, FDTD, FDFD, FEM, BI-RME 等全波方法进行电磁特性分析. 通常 SIW 等效为宽度为 W_e 的矩形波导, 其等效宽度为^[42]

$$W_e = W - \frac{d^2}{0.95s}. \quad (1)$$

更加精确的等效关系经验公式为^[47]

$$W_e = W - 1.08 \frac{d}{s} + 0.1 \frac{d^2}{W}. \quad (2)$$

将 SIW 等效为矩形波导后, 就可以得到 SIW 的特性阻抗

$$Z_0 = \frac{\omega\mu}{\beta}, \quad (3)$$

与 SIW 的传播常数

$$\beta = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{W_e}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2}, \quad (4)$$

其中波数 $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$, ω 是角频率, ϵ 是基板的介电常数, μ 是磁导率, m 是正整数, n 是大于等于零的整数. SIW 的主模 (TE₁₀ 模) 截止频率为

$$f_{\text{TE10}} = \frac{1}{2W_e\sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (5)$$

第一个高次模式是 TE₂₀ 模, 其截止频率为

$$f_{\text{TE20}} = \frac{1}{W_e\sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (6)$$

由式 (5) 和 (6) 可以看出, SIW 的截止频率与 SIW 的宽度, 金属过孔的间距和直径相关. 在保证单模传输的情况下, SIW 的工作频带范围为 f_{TE10} 到 f_{TE20} 之间. 并且, 靠近截止频率处存在较强色散, 因此信号传输通常避免使用截止频率附近的频带. 电磁波在 SIW 中以类似于介质填充矩形波导中的电磁场模式传输, 但是由于两排金属过孔间存在一定的缝隙, 当信号在波导中传输时, 该缝隙可能会切断波导表面产生的表面电流, 进而引发辐射, 导致电磁能量的泄露. 只有金属过孔的直径和间距满足一定的设计规则时, 通过孔间缝隙泄露的能量才能忽略不计.

为了将 SIW 与平面电路中其他电路与元器件相集成, 需要设计合适的转接结构, 并要求 SIW 与其他电路的阻抗相匹配, 电磁场相匹配. SIW 与微带线的梯形渐变转接^[14] 是一种常用的微带线转接

图 3 SIW 与微带线的转接结构

Figure 3 The transition structure between the SIW and microstrip line

图 4 SIW 与微带线转接结构的电场分布

Figure 4 Electrical field distribution of the SIW and its transition

图 5 HMSIW 的结构

Figure 5 The structure of HMSIW

图 6 HMSIW 的微带线转接结构

Figure 6 The HMSIW and its microstrip transition

结构, 如图 3 所示. 其中, l_t 与 w_t 是微带转接结构的长度与宽度, l_m 与 w_m 是微带线的长度与宽度. 除渐变微带转接结构之外, 还有 SIW 与共面波导的通孔转接, SIW 与 SIW 之间的缝隙转接等. SIW 与微带线转接结构的电场分布如图 4 所示, 电场沿中轴线对称分布.

由于 SIW 的电磁场分布具有对称性, 所以 SIW 的中轴线可以等效为一个理想磁壁. 当基板厚度较薄时, 将 SIW 从中轴线分开不会影响电磁场分布. 利用这一特性, 沿 SIW 中轴线切开, 每一半可以构成一个半模 SIW (HMSIW)^[6], 其结构如图 5 所示. HMSIW 一侧的一排周期金属化通孔起到了金属侧壁的作用. 图 5 中 l 是 HMSIW 的长度, W 是 HMSIW 的宽度, d 是通孔的直径, s 是相邻两个通孔的距离, h 是介质层的厚度, t 是金属层的厚度. 与 SIW 相同, HMSIW 在平面集成电路中也需要转接结构, 微带线转接是最为常见的转接结构, 如图 6 所示. HMSIW 与转接结构的电场分布如图 7 所示.

波导宽度为 W 的 HMSIW 可等效为约 2 倍宽度的矩形波导^[59], 其等效宽度 W_e 为

$$W_{e,\text{SIW}} = 2W - 1.08 \frac{d^2}{s} + 0.1 \frac{d^2}{2W}, \quad (7)$$

图 7 HMSIW 与转接结构的电场分布

Figure 7 The electric field distribution of the the HMSIW and its microstrip transition

表 1 SIW 与 HMSIW 单模工作带宽对比

Table 1 The single mode bandwidth of the SIW and the HMSIW

Waveguide	SIW	HMSIW
Dominant mode	f_{cTE10}	$f_{cTE0.5,0}$
Waveguide width	W_0	$W_0/2$
Bandwidth	f_{c0}	$2f_{c0}$

或者将宽度为 $W_{e,SIW}$ 的基片集成波导沿纵向中轴线切一半, 得到宽度为 $W_{e,HMSIW}$ 的半模基片集成波导

$$W_{e,HMSIW} = \frac{1}{2}W_{e,SIW} + \Delta W, \quad (8)$$

其中 ΔW 代表边缘场效应引起的额外宽度. HMSIW 的主模为 TE0.5,0 模, 其截止频率为

$$f_{cTE0.5,0} = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_r}W_{e,HMSIW}}. \quad (9)$$

HMSIW 的第一个高次模是 TE1.5,0 模, 其截止频率为主模的 3 倍, 公式如下:

$$f_{cTE1.5,0} = \frac{3c}{4\sqrt{\epsilon_r}W_{e,HMSIW}}. \quad (10)$$

SIW 与 HMSIW 单模工作带宽对比如表 1 所示^[17]. SIW 主模为 TE10 模, 其单模工作带宽为从 TE10 模截止频率到 TE20 模截止频率. HMSIW 主模为 TE0.5,0 模, 其单模工作带宽为从 TE0.5,0 模截止频率到 TE1.5,0 模截止频率. 为方便对比, 设 SIW 的 TE10 模截止频率与 HMSIW 的 TE0.5,0 模截止频率均为 f_{c0} , 此时 SIW 与 HMSIW 宽度分别为 W_0 , $W_0/2$, 则相同主模截止频率下, HMSIW 具有两倍于 SIW 的信道带宽, 而尺寸只有 SIW 的一半.

2.2 基于调制解调的 SIW 互连系统

基片集成波导 (SIW/HMSIW) 具有带通特性, 无法直接传输基带信号, 因此若用于高速互连系统需要采用调制模块将基带信号频谱上移到波导的通带内, 调制信号经过 SIW/HMSIW 传输后, 再采用解调模块将信号解调到基带.

最简单的调制方式为直接混频调制. 基于 SIW/HMSIW 的混频调制互连系统^[14,16]的组成如图 8 所示. 系统包括混频器、功分器、SIW 或 HMSIW、放大器、移相器、低通滤波器. 本振信号经功分器一分为二, 移相器用作本振信号的相位调整. 输入信号与一路本振信号先进行混频调制, 再经 SIW/HMSIW 传输, 放大器放大, 再与另一路本振信号经混频器解调, 再经低通滤波器滤波后得到输出信号.

表 2 对比了基于 SIW 和 HMSIW 的互连系统指标, 各系统均采用基本混频调制方式. 文献 [17] 提出了基于 HMSIW 的互连系统, HMSIW 带宽为 8.8~26.4 GHz, 损耗约为 0.0038 dB/mm, 系统最高传输速率为 7.5 Gbps. SIW1 与 HMSIW 互连系统具有相同的主模截止频率, SIW1 的带宽为 8.8~

图 8 基于 SIW/HMSIW 的混频调制互连系统

Figure 8 The SIW/HMSIW interconnect system based on mixing modulation

表 2 基于 SIW 和 HMSIW 的互连系统指标

Table 2 The performance parameters of the systems based on SIW and HMSIW

Parameter	SIW1 interconnect	SIW2 interconnect [14]	HMSIW interconnect [17]
Bandwidth (GHz)	8.8~17.6	13.6~22	8.8~26.4
Insertion loss (dB/mm)	0.0022	0.0125	0.0038
Data rate (Gbps)	4.4	2.5	7.5

图 9 基于 SIW/HMSIW 互连的 QPSK 互连系统

Figure 9 The SIW/HMSIW interconnect system based on QPSK

17.6 GHz, 损耗约为 0.0022 dB/mm, 系统理论传输速率为 4.4 Gbps. SIW2 互连系统为文献 [14] 所提出, SIW2 的带宽为 13.6~22 GHz, 损耗约为 0.0125 dB/mm, 系统传输速率为 2.5 Gbps. 通过对比可知, HMSIW 的带宽指标优于 SIW, 因此 HMSIW 互连系统的传输速率比 SIW 互连系统有了显著提高.

正交移相键控 (QPSK) 是一种二维调制方式, 可在一个符号时间间隔中传输 2 个比特信号, 因此提高了信道利用率, 信号传输速率加倍. 基于 SIW/HMSIW 的 QPSK 互连系统如图 9 所示, 两路输入信号分别为 I 路与 Q 路, 分别与两路相互正交的本振信号混频调制, 再经 SIW/HMSIW 互连传输, 放大器放大, 再分别与两路相互正交的本振信号混频解调, 低通滤波器滤除噪声后输出基带信号. 文

图 10 基于 SIW/HMSIW 互连的 16QAM 互连系统

Figure 10 The SIW/HMSIW interconnect system based on 16QAM

献 [20] 提出的基于 QPSK 的 SIW 互连系统, 其波导带宽为 14~28 GHz, 数据传输速率达到了 15 Gbps.

正交振幅调制 (QAM) 是一种频谱利用率很高的调制方式. 它是利用两路独立的基带数字信号对两个相互正交的同频载波进行抑制载波的双边带调制, 利用这种已调信号在同一带宽内的频谱正交特性来实现两路信号的并行传输. 例如, 16QAM 调制共有 16 个符号, 即采用 16 进制的码元符号, 则在每个码元持续时间内可以传输 4 比特, 使得在相同信道带宽条件下数据速率增加了 4 倍, 有效地提高频带利用率. 基于 SIW/HMSIW 的 16QAM 互连系统, 如图 10 所示. 输入二进制比特流 X_n 经串并转换和 2-4 电平转换后将速率为 R_b 的序列分成速率为 $R_b/4$ 的 A_m , B_m 两路 4 电平信号, 经过低通滤波器得到 $A(t)$ 与 $B(t)$ 两路信号, 再分别与两路正交本振信号混频调制, 经 SIW/HMSIW 互连传输, 混频器解调, 低通滤波器滤除噪声, 门限判决, 并串转换, 最终得到输出信号 Y_n . 文献 [21, 22] 分别采用 16QAM 与 64QAM 调制技术, 设计了单物理信道传输速率分别为 20 Gbps 与 4 Gbps 的 SIW 互连系统.

3 基片集成同轴 (SICL) 互连技术

3.1 基片集成同轴线

基片集成同轴线 (SICL) [3] 是一种新型基片集成波导互连结构, 传输主模为 TEM 模, 不需要调制解调就可以直接传输基带信号, 适合高速数据的传输. SICL 与传统的同轴线类似, 基本结构如图 11 所示. 上下两层金属层以及两侧的金属通孔阵列, 共同组成了 SICL 的外导体; 中间的金属线是 SICL 的内导体; 在内导体和外导体之间填充着介质. SICL 具有损耗低、串扰小、频带宽、抗电磁干扰以及易集成的优点.

SICL 的 TEM 模单模工作频带是从直流到 TE₁₀ 模的截止频率, 该截止频率的计算公式为 [3]

$$f_{TE10} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \left(a - \frac{d^2}{0.95s} \right)^{-1}, \quad (11)$$

其中 c 是真空中光速, ϵ_r 是基片的相对介电常数, a 是 SICL 的外导体宽度 (两排过孔的间距), d 是通孔直径, s 是通孔间距. SICL 是一种超宽带的高速互连, 文献 [64] 给出了 SICL 特性阻抗计算公式.

由于 SICL 的内导体位于多层结构的内层, 在实际应用中需将其与其他层电路, 特别是表层电路相连接. 在测试中也需要将 SICL 引到外层电路, 以便连接测试电缆或探针. 因此需设计 SICL 的转接

图 11 SICL 的结构示意图
Figure 11 The structure of the SICL

图 12 (网络版彩图) SICL 与共面波导转接结构
Figure 12 (Color online) The structure of the SICL and its coplanar waveguide transition

图 13 (网络版彩图) 三通道 SICL 互连
Figure 13 (Color online) The three-channel SICL interconnects

结构, 目前常用的转接结构包括类同轴和共面波导两种. SICL 的类同轴转接结构^[25] 是利用金属通孔组成类似同轴的 3D 转接结构, 其中心位置处的通孔为信号孔, 相当于同轴线的内导体, 周围的一圈通孔为地孔, 相当于同轴线的外导体. 为了便于实际应用和测试, 在信号孔与地孔上方设有焊盘和反焊盘. SICL 与共面波导 (CPW) 的转接结构如图 12 所示. 转接结构中 SICL 的内导体和 CPW 的信号线通过金属通孔进行连接. 为了控制 CPW 的特性阻抗, 将参考平面放置在 CPW 附近. 文献 [23] 采用 LTCC 工艺设计实现了 SICL 互连与共面波导转接, 其传输速率达到 32 Gbps.

3.2 双/三通道基片集成同轴线互连

双通道 SICL 互连结构^[24] 可实现两路信号并行传输. 其相邻两通道共享了外导体, 即位于中间的金属化通孔阵列, 4 个端口均采用了共面波导转接结构. 由于 CPW 转接是一种半开放式结构, 相邻通道的端口之间靠得太近易产生耦合. 因此为了避免耦合, 两个 SICL 传输线各有一端做了 90° 的直角弯曲, 称为双 L 型基片集成同轴互连. 在 SICL 内导体的弯曲处, 电磁场的分布会产生一些突变, 这些突变将激发一些高次模. 根据传输线理论, 这种弯曲结构也会使得 SICL 阻抗发生改变, 从而产生反射. 为了减少反射, 故将内导体拐弯处设计为圆弧形. 仿真与实验测试显示^[24]: 在 0~40 GHz, 双 L 型基片集成同轴互连阵列的近端耦合和远端耦合均小于 -40 dB. 这表明双 L 型基片集成同轴互连阵列的两个通道具有良好的隔离特性.

三通道 SICL 互连如图 13 所示, 其输入端口分别为 1, 3, 5, 输出端口分别为 2, 4, 6. 三通道 SICL

图 14 (网络版彩图) 3 种三通道互连线的传输特性和反射特性仿真结果. (a) 中间通道 S_{11} ; (b) 侧面通道 S_{33} ; (c) 中间通道 S_{21} ; (d) 侧面通道 S_{43}

Figure 14 (Color online) The transmission and reflection performance of three types of interconnects each with three channels. (a) S_{11} of the middle channel; (b) S_{33} of the side channel; (c) S_{21} of the middle channel; (d) S_{43} of the side channel

互连的性能指标与具有相似尺寸的三通道带状线和三通道微带线的性能指标相比具有显著优势^[65]. 图 14 给出了这 3 种三通道互连的传输特性和反射特性对比. 由图 14(a) 与 (b) 可知 SICL 的反射特性相关参数, 包括中间通道的 S_{11} 和侧面通道的 S_{33} , 性能指标均优于带状线与微带线. 由图 14(c) 与 (d) 可知, SICL 的传输特性相关参数, 包括中间通道的 S_{21} 和侧面通道的 S_{43} , 其性能指标也均优于带状线与微带线. 图 15 给出了 3 种三通道互连的隔离度仿真结果. 由图 15 可知 SICL 的近端串扰 S_{13} 和 S_{35} , 远端串扰 S_{14} 和 S_{36} , 均小于微带线与带状线. 因此, SICL 更适合用于多通道并行传输, 可提高布线密度与信号传输速率.

3.3 SICL 互连阵列

由于 SICL 具有良好的隔离度, 因此 SICL 适合采用阵列形式进行多通道并行信号传输^[25]. 阵列中相邻的通道可以共用外导体, 即水平方向相邻的通道可以共用通孔阵列, 垂直方向相邻的通道可以

图 15 (网络版彩图) 3 种三通道互连线的隔离度仿真结果. (a) 近端串扰 S13; (b) 远端串扰 S14; (c) 近端串扰 S35; (d) 远端串扰 S36

Figure 15 (Color online) The isolation performance of three types of interconnects each with three channels. (a) The near end crosstalk S13; (b) the far end crosstalk S14; (c) the near end crosstalk S35; (d) the far end crosstalk S36

共用金属层, 从而达到高密度集成. 由于金属通孔与 TEM 模的电流方向垂直, 金属通孔对 SICL 的 TEM 模屏蔽作用不是十分理想. 为了提高隔离度, 在金属化通孔阵列上增加水平的金属栅栏来强化通孔阵列的屏蔽效果. 金属栅栏与 TEM 模的电流方向平行, 可以有效地增强外导体的隔离性能.

文献 [25] 采用 LTCC 工艺设计加工了 15×3 通道的 SICL 互连线阵列. 仿真与测试结果表明, 每个通道的信号传输速率为 30 Gbps (传输速率的测试受测量仪器所限), 并且在水平和垂直方向相邻的通道间耦合度均小于 -30 dB, 因此 15×3 通道 SICL 互连线阵列的总数据传输速率达到 1.35 Tbps.

4 混合模式的基片集成互连

4.1 双模传输的 SIW 互连

SIW 通常采用单模传输, 避免使用高次模. 这是由于一方面高次模的激励比较困难; 另一方面传播常数随模式改变而不同, 多模传输存在色散. 然而, 采用合适的转接结构, SIW 仍可采用多模传输,

即在单个物理信道中,实现多模并行传输.文献[29]在单个 SIW 互连中采用两种转接结构,分别激励 TE₁₀ 与 TE₂₀ 模式,传输两路相互独立的射频信号.输入有两个端口激励:其中一个端口采用差分微带线结构,激励 TE₂₀ 模式的信号;另一个端口采用通孔转接结构,激励 TE₁₀ 模式的信号.在差分线转接结构之后设计了一段鳍线,一方面用于阻止 TE₁₀ 模的反向传播,另一方面可以看作功分器,激励 SIW 互连的 TE₂₀ 模式差分信号,这里鳍线将 SIW 一分为二,鳍线部分传输 TE₁₀ 模式.实验系统中,TE₁₀ 模的截止频率为 9.35 GHz,3 dB 带宽为 9.7~18.5 GHz;TE₂₀ 模的截止频率为 18.7 GHz,3 dB 带宽为 19.1~40 GHz.两路速率为 1 Gbps 的伪随机信号(pseudo-random binary sequence, PRBS)分别与 8.3 GHz 与 13.4 GHz 载波混频后,经 SIW 的 TE₁₀ 与 TE₂₀ 两种模式传输,随后经混频器解调,低通滤波器滤除噪声后输出.

4.2 SIW 与带状线的混合互连

频率低时,SIW 的尺寸相对较大.为了增加布线密度,在 SIW 腔体中可嵌入内导体,形成 SIW 与带状线的混合互连^[27,28].在 SIW 中嵌入一条带状线结构,可并行传输 TEM 与 TE₁₀ 两路信号.文献[27]采用该结构实现了每路 3.125 Gbps 的两路信号并行传输.在 SIW 中嵌入两条带状线结构,可并行传输两路 TEM 信号一路 TE₁₀ 信号,文献[28]采用该结构实现了三路信号的并行数据传输,每路信号的传输速率为 5 Gbps,总传输速率为 15 Gbps.

4.3 SIW 与 SICL 的混合互连

与 4.2 小节中 SIW 腔体中嵌入带状线不同,文献[30]则将 SIW 作为 SICL 的内导体.该结构由 4 层金属与 3 层介质组成:第 1 层金属,第 4 层金属,连接第 1 层金属与第 4 层金属的两排金属通孔阵列构成外导体;第 2 层金属,第 3 层金属,以及连接第 2 层金属与第 3 层金属的两排金属通孔阵列构成内导体;金属层之间为介质层.因此内导体可看作 SIW,外导体与内导体共同构成 SICL 结构.内导体采用 TE₁₀ 模式传输信号,而外导体则采用 TEM 模式传输信号.低频时,内导体处截止状态,外导体处于传播状态;当频率超过 TE₁₀ 截止频率,内外导体均处于传播状态,但是内导体 TE₁₀ 模式的损耗小于外导体 TEM 模式的损耗.由于这种 SIW 与 SICL 混合波导结构的转接结构设计较困难,该结构的带宽仅为 7.5~10.5 GHz 与 25~39 GHz.

4.4 模式选择传输线

模式选择传输线(mode selective transmission line, MSTL)^[31]由两层金属层,一层介质层构成.上层金属层刻蚀了两条槽,两侧为金属通孔阵列,与接地的共面波导形式类似.在低频时,采用 TEM 模式传输;当频率升高到超过 TE₁₀ 模截止频率时,采用 TE₁₀ 模式传输,即单物理信道采用多模传输单路信号.最终实现了单路信号的低频与高频分量分别采用两种模式传输,带宽为 DC~0.5 THz,损耗为 0.35 dB/mm.

5 总结与展望

微带线、带状线、共面波导等传统互连呈开放式结构,采用单一 TEM 模式传输信号,因此传输带宽有限,且在高频时的损耗、辐射与串扰严重,限制了互连的传输速率.因此为了克服互连线间的串扰,高速互连通常采用串行链路与差分技术.但串行链路与差分技术的使用,影响了系统的布线密度与总

数据传输速率. 传统互连的高频损耗高, 限制了信道带宽. 因此在互连的驱动与负载芯片引入均衡与预加重技术, 通过有源电路的增益补偿互连信道衰减, 从而扩展互连信道的带宽. 目前, 串行链路与差分技术, 均衡与预加重技术的引入使得基于微带线、带状线等传统互连结构的系统最高传输速率达到 28 Gbps, 但仍无法满足太比特速率数据传输需求. 因此急需发展低损耗、低辐射与低串扰的新型高速互连技术. 基片集成波导互连, 作为一种新型的平面集成毫米波波导互连, 采用准封闭式结构. 与微带线、带状线、共面波导等传统开放式互连相比, 基片集成波导互连具有损耗小、频带宽、抗电磁干扰的优点, 适合应用于小型化、高密度集成、高速率的数字/微波射频电路的信号传输. 此外, 基片集成波导的传输模式不再为单一的 TEM 模式, 还可采用多种高次模式. TE 模式在高频时具有低损耗的优点, 并且采用多模传输技术可显著提高互连信道的频谱利用率与数据传输速率. 本文详细介绍了各种新型基片集成波导互连, 包括主模为 TE 模式的基片集成波导互连 (SIW), 主模为 TEM 模式的基片集成同轴互连 (SICL), 以及基于 TE 与 TEM 混合模式的基片集成波导互连. SIW 与 SICL 分别采用 TE 与 TEM 模式传输, 因此分别适合调制信号与基带信号的传输. 并且, 为了提高频带利用率与数据传输速率, 在 SIW 与 SICL 基础上发展出了多种调制技术 (如 QPSK, 16QAM, 64QAM 等), 多模并行传输以及多通道并行传输的混合基片集成波导互连技术. 随着研究的深入, 基片集成波导互连的带宽与传输速率不断增加. 例如, 模式选择传输线的带宽已经达到 500 GHz, 基片集成同轴线阵列的传输速率已经达到 1.35 Tbps. 展望未来, 针对太比特速率数据传输的迫切需求, 采用多通道多模式并行传输机制的基片集成波导互连, 将成为高速电子系统互连技术的重要发展方向. 模式选择与调控理论尚待完善, 该理论的突破将为多模传输时低损耗低色散模式的选择与设计提供理论基础. 并且, 随着先进集成电路工艺的进步, 高密度集成组件、系统级封装 (SoP)、片上系统 (SoC) 的迅速发展将推动基片集成波导互连从印刷电路板 (PCB), 芯片封装逐步走向集成电路, 基片集成波导互连的性能指标将得到进一步的提升.

参考文献

- 1 Shigeki F. Waveguide line. U.S. Patent 06-053711, 1994
- 2 Wu K. Integration and interconnect techniques of planar and nonplanar structures for microwave and millimeter-wave circuits-current status and future trend. In: Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Taipei, 2001. 411-415
- 3 Gatti F, Bozzi M, Perregrini L, et al. A novel substrate integrated coaxial line (SICL) for wide-band applications. In: Proceedings of European Microwave Conference, Manchester, 2006. 1614-1617
- 4 Ranjkesh N, Shahabadi M. Reduction of dielectric losses in substrate integrated waveguide. Electron Lett, 2006, 42: 1230-1231
- 5 Isapour A, Kouki A B. Empty LTCC integrated waveguide with compact transitions for ultra-low loss millimeter-wave applications. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2017, 27: 144-146
- 6 Liu B, Hong W, Tian L, et al. Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) multi-way power divider. In: Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, 2006. 917-920
- 7 Grigoropoulos N, Sanz-Izquierdo B, Young P R. Substrate integrated folded waveguides (SIFW) and filters. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2005, 15: 829-831
- 8 Cassivi Y, Perregrini L, Wu K, et al. Low-cost and high-Q millimeter-wave resonator using substrate integrated waveguide technique. In: Proceedings of the 32nd European Microwave Conference, Milan, 2002. 1-4
- 9 Deslandes D, Wu K. Millimeter-wave substrate integrated waveguide filters. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Toward a Caring and Humane Technology, Montreal, 2003. 3: 1917-1920
- 10 Che W Q, Yung E K, Wu K. Millimeter-wave ferrite phase shifter in substrate integrated waveguide (SIW). In:

- Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest, Columbus, 2003. 4: 887–890
- 11 Germain S, Deslandes D, Wu K. Development of substrate integrated waveguide power dividers. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Toward a Caring and Humane Technology, Montreal, 2003. 3: 1921–1924
 - 12 Yan L, Hong W, Hua G, et al. Simulation and experiment on SIW slot array antennas. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2004, 14: 446–448
 - 13 D’Orazio W, Wu K, Helszajn J. A substrate integrated waveguide degree-2 circulator. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2004, 14: 207–209
 - 14 Suntives A, Abhari R. Experimental evaluation of high-speed data transmission in a waveguide-based interconnect. In: Proceedings of IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging, Scottsdale, 2006. 269–272
 - 15 Smith N, Abhari R. Dispersion-equalization techniques for substrate integrated waveguide interconnects. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2010, 58: 3824–3831
 - 16 Yuan X W, Li X C, Wang N, et al. High-speed data transmission system using half mode substrate integrated waveguide. In: Proceedings of 2014 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium (EDAPS), Bangalore, 2014. 105–108
 - 17 Yuan X W, Li X C, Yuan B, et al. High-speed data transmission system based on half mode substrate integrated waveguide. *J Microw*, 2015, 31: 41–45 [袁希望, 李晓春, 袁斌, 等. 基于半模基片集成波导的高速数据传输系统. *微波学报*, 2015, 31: 41–45]
 - 18 Shahidzadeh Mahani M, Roberts G W. A mmWave folded substrate integrated waveguide in a 130-nm CMOS process. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2017, 65: 2775–2788
 - 19 Wang N, Li X C, Yuan X W, et al. High-speed data transmission system based on QPSK scheme in substrate integrated waveguide. In: Proceedings of IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium (EDAPS), Bangalore, 2014. 117–120
 - 20 Wang N, Li X C, Mao J F. High-speed interconnect system using QPSK scheme based on substrate integrated waveguide. *J Circuits Syst Comput*, 2018, 27: 1–19
 - 21 Shen L M, Li X C, Mao J F. A 16-ary quadrature amplitude modulation high-speed transmission system based on substrate-integrated waveguide interconnection. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2014, 48: 1368–1371 [沈利梅, 李晓春, 毛军发. 基于基片集成波导互连的 16 进制正交振幅调制高速传输系统. *上海交通大学学报*, 2014, 48: 1368–1371]
 - 22 Bensalem B, Aberle J T. A new high-speed memory interconnect architecture using microwave interconnects and multicarrier signaling. *IEEE Trans Compon Packag Manufact Technol*, 2014, 4: 332–340
 - 23 Wei X, Li X C, Wang N, et al. A wide band millimeter-wave substrate integrated coaxial line (SICL) for high speed data transmission. In: Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Nanjing, 2015. 1–3
 - 24 Wei X, Li X C, Shao Y, et al. A new double L-type integrated coaxial interconnect array. *J Microw*, 2016, 8: 59–64 [魏鑫, 李晓春, 邵妍, 等. 一种新型的双 L 型基片集成同轴互连阵列. *微波学报*, 2016, 8: 59–64]
 - 25 Shao Y, Li X C, Wu L S, et al. A wideband millimeter-wave substrate integrated coaxial line array for high-speed data transmission. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2017, 65: 2789–2800
 - 26 Suntives A, Abhari R. Dual-mode high-speed data transmission using substrate integrated waveguide interconnects. In: Proceedings of the 16th IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging, Atlanta, 2007. 215–218
 - 27 Mahani M S, Abhari R. Experimental evaluation of flexible high-speed interconnect system using substrate integrated waveguide technology. *Electron Lett*, 2012, 48: 1500–1501
 - 28 Suntives A, Abhari R. Ultra-high-speed multichannel data transmission using hybrid substrate integrated waveguides. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2008, 56: 1973–1984
 - 29 Suntives A, Abhari R. Design and application of multimode substrate integrated waveguides in parallel multichannel

- signaling systems. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2009, 57: 1563–1571
- 30 Guo J, Djerafi T, Wu K. Mode composite waveguide. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2016, 64: 3187–3197
- 31 Fesharaki F, Djerafi T, Chaker M, et al. Low-loss and low-dispersion transmission line over DC-to-THz spectrum. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2016, 6: 611–618
- 32 Yang T H, Chen C F, Huang T Y, et al. A 60GHz LTCC transition between microstrip line and substrate integrated waveguide. In: *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, Suzhou, 2005. 1: 1–3
- 33 Nam H, Yun T S, Kim K B, et al. Ku-band transition between microstrip and substrate integrated waveguide (SIW). In: *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, Suzhou, 2005. 1: 1–4
- 34 Ding Y, Wu K. Substrate integrated waveguide-to-microstrip transition in multilayer substrate. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2007, 55: 2839–2844
- 35 Sanchez J E, Ayala V G. A general EM-based design procedure for single-layer substrate integrated waveguide interconnects with microstrip transitions. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Atlanta, 2008. 983–986
- 36 Esteban H, Belenguer A, Sanchez J R, et al. Improved low reflection transition from microstrip line to empty substrate-integrated waveguide. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2017, 27: 685–687
- 37 Suntives A, Abhari R. Transition structures for 3-D integration of substrate integrated waveguide interconnects. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2007, 17: 697–699
- 38 Patrovsky A, Daigle M, Wu K. Millimeter-wave wideband transition from CPW to substrate integrated waveguide on electrically thick high-permittivity substrates. In: *Proceedings of European Microwave Conference*, Manchester, 2007. 138–141
- 39 Lee S, Jung S, Lee H Y. Ultra-wideband CPW-to-substrate integrated waveguide transition using an elevated-CPW section. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2008, 18: 746–748
- 40 Wei X, Li X C, Wang N, et al. A wide band millimeter-wave substrate integrated coaxial line (SICL) for high speed data transmission. In: *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, Nanjing, 2015. 3: 1–3
- 41 Belenguer A, Borja A L, Esteban H, et al. High-performance coplanar waveguide to empty substrate integrated coaxial line transition. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2015, 63: 4027–4034
- 42 Cassivi Y, Perregrini L, Arcioni P, et al. Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2002, 12: 333–335
- 43 Bozzi M, Perregrini L, Wu K. Direct determination of multi-mode equivalent circuit models for discontinuities in substrate integrated waveguide technology. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, San Francisco, 2006. 68–71
- 44 Bozzi M, Perregrini L, Wu K. Modeling of radiation, conductor, and dielectric losses in SIW components by the BI-RME method. In: *Proceedings of European Microwave Integrated Circuit Conference*, Amsterdam, 2008. 230–233
- 45 Xu F, Zhang Y L, Hong W, et al. Finite-difference frequency-domain algorithm for modeling guided-wave properties of substrate integrated waveguide. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2003, 51: 2221–2227
- 46 Xu F, Wu K. Numerical multimode calibration technique for extraction of complex propagation constants of substrate integrated waveguide. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Texas, 2004. 2: 1229–1232
- 47 Xu F, Wu K. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2005, 53: 66–73
- 48 Yan L, Hong W, Wu K, et al. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines. *IEE Proc Microw Antennas Propag*, 2005, 152: 35–42
- 49 Deslandes D, Wu K. Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2006, 54: 2516–2526

- 50 Xu F, Wu K, Hong W. Domain decomposition FDTD algorithm combined with numerical TL calibration technique and its application in parameter extraction of substrate integrated circuits. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2006, 54: 329–338
- 51 Wang D, Chow Y L, Deng K, et al. Analytical equivalence between substrate-integrated waveguide and rectangular waveguide. *IET Microw Antenn Propag*, 2008, 2: 35–41
- 52 Salehi M, Mehrshahi E. A closed-form formula for dispersion characteristics of fundamental SIW mode. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2011, 21: 4–6
- 53 Ranjkesh N, Shahabadi M, Busuioc D. Effect of dielectric losses on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide. In: *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, Suzhou, 2005. 3: 1–4
- 54 Cheng Y J, Wu K, Hong W. Power handling capability of substrate integrated waveguide interconnects and related transmission line systems. *IEEE Trans Adv Packag*, 2008, 31: 900–909
- 55 Gabriela M J, Svetlana C, Reydezel T T. Modeling and parameter extraction for the metal surface roughness loss effect on substrate integrated waveguides from S-Parameters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 975–882
- 56 Kim J Y, Chun D W, Lee H Y. Efficient modeling and analysis of the multiple air hole effect in substrate-integrated waveguide. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2018, 28: 93–95
- 57 Suntives A, Abhari R. Design and characterization of the EBG waveguide-based interconnects. *IEEE Trans Adv Packag*, 2007, 30: 163–170
- 58 Scogna A C, Orlandi A. Systematic analysis of the signal integrity performance of surface integrated waveguide structures (SIWs). In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Florida, 2010. 784–789
- 59 Hong W, Liu B, Wang Y, et al. Half mode substrate integrated waveguide: a new guided wave structure for microwave and millimeterwave application. In: *Proceedings of International Conference Infrared and Millimeter Waves*, Shanghai, 2006. 219–219
- 60 Liu Z, Zhu L, Xiao G B, et al. An effective approach to deembed the complex propagation constant of half-mode SIW and its application. *IEEE Trans Compon Packag Manufact Technol*, 2016, 6: 109–116
- 61 Lai Q, Fumeaux C, Hong W, et al. Characterization of the propagation properties of the half-mode substrate integrated waveguide. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2009, 8: 1996–2004
- 62 Ma W, Wu K, Hong W, et al. Investigations on half-mode substrate integrated waveguide for high-speed interconnect application. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components*, Chengdu, 2008. 120–123
- 63 Che W, Geng L, Deng K, et al. Analysis and experiments of compact folded substrate-integrated waveguide. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2008, 56: 88–93
- 64 Wu Q, Wei W, Wang H, et al. Approximate SICL synthesis method. In: *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, Nanjing, 2015. 1: 1–322
- 65 Mao J F, Tang M. *Interconnects in High-Speed Integrated Circuits*. Beijing: Science Press, 2017. 220–221 [毛军发, 唐旻. 高速集成电路互连. 北京: 科学出版社, 2017. 220–221]

Substrate integrated waveguide interconnects in high-speed electronic systems

Xiaochun LI & Junfa MAO*

School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

* Corresponding author. E-mail: jfmao@sjtu.edu.cn

Abstract The big data era has arrived, and the requirements for high-speed data transmission continue to increase. It is urgent to develop new types of ultra high-speed and high-density interconnects to realize Terabit and even higher data transmission. Conventional planar interconnects such as microstrip lines, strip lines, and coplanar waveguides are in the form of open structures. Owing to the bandwidth and loss limitation, their signal integrity problems such as delays, attenuation, and crosstalk are severe and cannot transmit high-speed data when the data transmission rate is higher than a Gigabit. Based on conventional planar interconnects, SerDes (Serializer-Deserializer), differential lines, equalization, and pre-emphasis techniques were developed to improve the transmission performance. However, these techniques could not radically solve interconnect problems in high-speed data transmission. Substrate integrated waveguides (SIWs), as a new kind of planar interconnect, take advantage of the easy integration of conventional planar interconnects and the high bandwidth, low loss, and low crosstalk of waveguides. SIW interconnects have been gradually applied to realize high-speed data transmission. This paper presents all kinds of SIW interconnects, their physical structures, propagation performance, transmission modes and mechanisms, and data transmission rates in detail. Recent research studies of the authors are also introduced. According to the transmission mode, SIWs can be classified into three types: SIWs with TE mode, substrate integrated coaxial lines (SICLs) with TEM mode, and SIWs with mixed modes. The SIWs with TE mode have band-pass and hence base-band signals that should be modulated before transmission and demodulated after transmission. The introduction of modulation and demodulation techniques in SIWs increases the complexity of the transmission systems but can also improve the channel utilization and increase the data transmission rate. An SICL does not need modulation and demodulation since it propagates the TEM mode and has good signal integrity performance owing to its quasi-closed structure. SIWs with mixed modes integrate the SIW and other types of interconnects to simultaneously transmit TE mode and TEM mode by sharing conductors or media. According to the number of channels, SIWs can transmit single-channel signals through one physical channel, multichannel signals through one physical channel, or multichannel signals through multiple physical channels. Single-channel signal transmission through one physical channel uses one physical channel to transmit single-channel signals in single or multiple modes. Multichannel signal transmission through one physical channel uses one physical channel to transmit multichannel signals with complicated modulation techniques or multiple modes. Multichannel signal transmission through multiple physical channels uses multiple physical channels with single or multiple modes based on parallel data transmission. All kinds of new planar interconnects based on SIWs provide key techniques and solutions for high-speed data transmission.

Keywords substrate integrated waveguides, substrate integrated coaxial line, interconnects, TEM mode, TE mode, high-speed data transmission

Xiaochun LI was born in 1977. She received the B.S. degree in electronic engineering and the M.S. degree in telecommunication and information systems from Tianjin University, Tianjin, China, in 1999 and 2002, respectively, and the Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, in 2007. From 2008 to 2009, she was a visiting scholar with the

School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta. Since 2002, she has been a faculty member with the Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, where she is currently a professor. Her current research interests include high-speed circuits and EMC.

Junfa MAO was born in 1965. He received the B.S. degree in radiation physics from the University of Science and Technology of National Defense, China, in 1985; the M.S. degree in experimental nuclear physics from the Shanghai Institute of Nuclear Research, Shanghai, China, in 1988; and the Ph.D. degree in electronic engineering from Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai, China, in 1992. Since 1992, he has been a faculty member at Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, where he is currently a chair professor and the dean of the School of Electronic Information and Electrical Engineering. He is member of the Chinese Academy of Science. He was a visiting scholar at Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, from 1994 to 1995, and a postdoctoral researcher at the University of California, Berkeley, from 1995 to 1996. His research interests include interconnect and package problems of integrated circuits and systems, and the analysis and design of microwave circuits.