动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024052002

玻璃在射频系统封装和射频元件中的应用研究进展

吴　磊[1,2*]

（1. 中国电子科技集团公司第十研究所，成都 610036；2. 四川省电子信息装备电气互联工程技术研究中心，成都 610036）

摘　要： 未来无线通信系统将部署更高频段以满足其高性能、微型化、多样化等发展需求。射频技术是实现无线通信系统的基础，直接决定整个通信系统的性能。玻璃因其具备优异的高频电学性能、高稳定性等优势而受到重视，加之玻璃表面高密度细金属导线成型技术和高可靠大高宽比通孔加工技术日趋成熟，玻璃正逐渐被广泛应用于射频系统先进封装和无源射频元件的衬底材料中。文章系统概述了玻璃在芯片后装、芯片埋置、三维堆叠这三种射频封装技术和传输线、互联线、滤波器、移相器、天线这五种无源射频元件中的最新研究进展，从结构集成度、工艺实现性、射频性能等角度剖析了不同先进封装结构和无源射频元件，并分析了各自所面临的挑战。最后，从光电共封装、SOP 集成、高效散热等方面探讨了玻璃基射频系统的未来发展方向。

关键词： 玻璃；射频系统；先进封装；无源射频元件

中图分类号： TN20；TN61　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－0861－09

Progress on the Application of Glass in RF System Packaging and RF Components

WU Lei[1,2]

（1. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Corporation，Chengdu 610036，CHN；2. Sichuan Engineering Technology Research Center for Electricity Interconnect of Electronic Information Equipment，Chengdu 610036，CHN）

Abstract： In the future，wireless communication systems will deploy higher frequency bands to meet their development needs，such as high performance，miniaturization，and diversification. Radio frequency（RF）technology constitutes the foundation for the implementation of wireless communication systems and directly determines the performance of the entire communication system. Glass exhibits an excellent high-frequency electrical performance and high stability. As surface high-density forming technology for fine metal wire and high-reliability processing technology for large aspect ratio through hole continue to evolve，glass is gradually finding wide application as a substrate material for advanced packaging of RF systems and passive RF components. This article provides a systematic overview of the latest progress in the research on the applications of glass in three RF packaging technologies：chip back loading，chip embedding，and 3D stacking，as well as five passive RF components：transmission lines，interconnect lines，filters，phase shifters，and antennas. Different advanced packaging structures and passive RF components are analyzed from the perspectives of structural integration，process feasibility，and RF performance，along with the corresponding challenges. Finally，directions for the development of glass-based RF systems in the future is discussed from the aspects of optoelectronic co-packaging，SOP integration，and efficient heat dissipation.

Key words： glass；RF system；advanced packaging；passive RF components

收稿日期：2024－05－20.

*通信作者：吴　磊

0 引言

随着高通量通信链路和高分辨率雷达等需求的日益增长，未来无线通信系统将部署在更高的工作频段中[1]。半导体技术的巨大进步推动了无线通信系统的快速发展。射频技术是实现无线通信系统的关键和基础，直接决定整体通信系统信号处理能力。目前，除了发展单片射频芯片集成技术之外，研究者还致力于在不用衬底表面实现先进射频封装和无源射频元件，以推动无线通信系统朝着高性能、微型化、多样化等方向发展[2-3]。目前，用于先进射频封装和无源射频元件的衬底材料包括低温共烧陶瓷(LTCC)、有机堆叠基板、高阻硅、玻璃等[4-5]。LTCC具有低介电损耗、高导热性以及与常用半导体材料(Si，GaAs)适配的热膨胀系数，因此，该材料是射频模块封装和无源射频元件的常用衬底材料。然而，在共烧过程中材料容易收缩，并且共烧金属的导电性较差，导致多层陶瓷的集成密度和性能受限[6]。由于传统PCB基板技术实现小尺寸仍然面临巨大挑战，由此推动了有机衬底堆叠技术的发展，其可以实现复杂信号传输和高密度互联。然而，有机衬底低弹性模量和高热膨胀系数限制了热机械加工工艺[1]。相较而言，高阻硅衬底可以利用硅通孔和再布线层(RDL)实现高密度、短距离互联，并且与硅基集成电路热膨胀系数相当，可有效减少堆叠过程引起的翘曲。然而，硅材料具有一定的导电性，在高频段容易产生漏电、传输信号串扰和耦合等问题[7]。

在微波高频应用中，玻璃衬底具有高阻硅衬底无法比拟的优势[8]。主要包括：具有低的介电损耗和高的品质因数；可采用较低成本的工艺加工大尺寸玻璃基板；玻璃具有可调节的热膨胀系数，并且与硅基工艺和器件兼容；玻璃本身的电阻率较高，无需额外沉积介质绝缘层；玻璃基板具有超平整特性，利用精密加工技术可以使元器件排列密度更大；玻璃具有优良的稳定性、气密性和防潮性。随着玻璃基板表面高密度细金属导线成型技术和大高宽比通孔加工技术的成熟，其逐渐被广泛应用于射频系统先进封装和无源射频元件的衬底材料中[9-10]。

本文系统概述了玻璃在射频系统封装(芯片后装、芯片埋置、三维堆叠)和无源射频元件(传输线、互联线、滤波器、移相器、天线)中的最新研究进展。从结构集成度、工艺实现性、射频性能等多角度剖析了不同先进封装结构和无源射频元件，并分析了各自所面临的挑战。最后，从光电共封装、SOP集成、高效散热等方面探讨了玻璃基射频系统的未来发展方向。

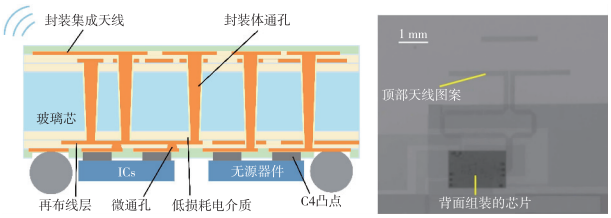
1 玻璃在射频系统封装中的应用

先进封装技术能够把不同材料、工艺、功能的芯片异质集成在一起，对于实现多功能、微型化射频系统起着决定性作用。玻璃基板在毫米波甚至太赫兹频段具有低损耗特性，因此已逐渐发展成为射频系统封装的重要衬底材料。其中，玻璃中介层(包括芯片后装和芯片埋置)和多层玻璃基板三维堆叠是玻璃基板在先进射频封装中的典型应用。

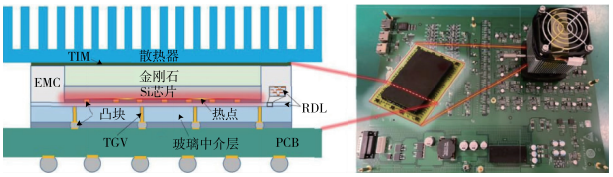
1.1 芯片后装

基于玻璃中介层的芯片后装技术是先在玻璃基板上进行金属化布线，再将芯片引脚与布线层上的焊盘互联，其具有高密度RDL线宽/线距，适用于大尺寸芯片、多芯片集成。玻璃基板表面超细金属线路成型通常采用半加成工艺(SAP)，增层介质材料选用味之素增层膜(ABF)，其主要通过内层基板超粗化、ABF压合、激光钻孔、孔内金属化、贴膜、曝光、显影、电镀、剥膜、闪蚀等一系列工艺流程实现基板表面线路增层成型[11]。

Watanabe等[12]展示了一种玻璃基的八木封装天线，如图1(a)所示，其采用100 μm厚度的低热膨胀系数玻璃基板，并通过SAP将有机薄膜层与玻璃基板进行压合。通过该封装方案可以将有源和无源组件与传输线、微通孔紧密互联，并且薄膜压合层可以有效克服玻璃基板的脆性。实验测得28 GHz时每个封装通孔的插损为0.021 dB，全链路损耗低于1 dB。Zhong等[13]提出了一种高效散热的异质集成封装方案，其采用低温低压键合技术，并将多晶金刚石导热基片与玻璃中介层上的硅芯片背面键合。由于引入具有卓越导热性能的金刚石材料，结至环境热阻下降了28.5%。尽管目前基于玻璃中介层的芯片后装工艺流程较为成熟，但互联距离和封装



(a) 一种基于玻璃-聚合物基板的封装天线[12]



（b）一种高效散热的异质集成封装方案[13]

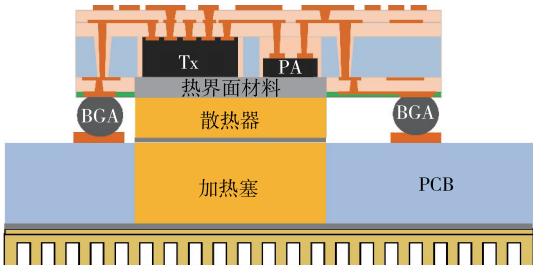
图 1　基于玻璃基板中介层的芯片后装技术在射频系统封装中的应用实例

结构紧凑度等因素制约了整个射频系统性能的进一步提升。

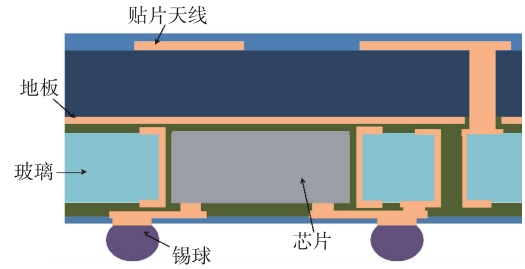
1.2　芯片埋置

基于玻璃中介层的芯片埋置技术（又称嵌入式玻璃封装）是先将芯片埋置于玻璃基板中，再进行金属布线，使得芯片互联引脚与金属布线层互联，具有结构紧凑、互联距离短等优点，能够满足高性能射频系统的应用需求。Watanabe 等[14]对比了嵌入式玻璃封装和基于 C4 凸点的倒装封装中芯片到天线的插损，结果表明嵌入式玻璃封装的插损比基于凸点的倒装封装的插损低 3 倍[15]。嵌入式玻璃封装结构由于其优异的射频性能，已被大量应用于射频系统中。

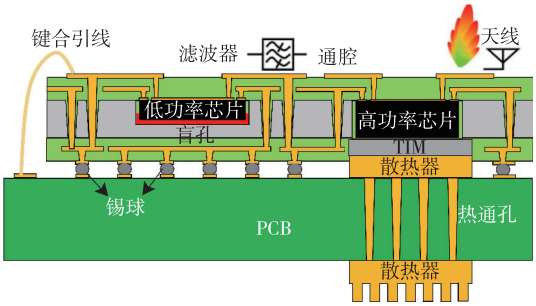
Jia 等[16]提出了一种用于下一代 D 波段无线通信射频模块的嵌入式玻璃封装结构方案，如图 2(a)所示。T 组件和功放组件均嵌入到玻璃基板空腔中，通过构建在低介电损耗介质薄膜（ABF-GL102）上的 RDL 与串联微带贴片天线集成，并且利用界面导热材料进行散热。实验测得芯片到封装体的损耗低于 0.5 dB，并且天线阵列在 141 GHz 时的峰值增益达到 14.2 dBi。由此可见，该封装方案能够提供低损耗、低寄生的互联，并且能够解决 D 波段功放组件散热问题，因而其在未来 6G 无线通信领域具有广泛应用前景。Yu 等[17]报道了一种用于 77 GHz 雷达芯片封装的嵌入式玻璃封装结构，如图 2(b)所示。在该结构中，天线与地板只有一种介质，更有利于天线特性的稳定。Galler 等[18]提出了一种应用于 150 GHz 以上频段雷达的嵌入式玻璃封装方案，将 MMIC 芯片埋于玻璃基板之上，总高度仅为 0.9 mm，并通过 TGV 和焊球实现信号传输。在 162 GHz 频段下，从芯片到介质波导的最小插损为 2.85 GHz，并且良好的封装气密性保证了其在恶劣环境下的应用。Li 等[19]报道了一种多芯片嵌入、高效散热、低翘曲的嵌入式玻璃封装结构，如图 2(c)所示。高功率芯片通过热界面材料连接散热片，并采用无载流子工艺和双面层压方法最大限度地减少了基板翘曲率。此外，Ravichandran 等[20]报道了一种基于芯片后装和芯片埋置的混合异质集成技术，如图 2(d)所示，其将嵌入式芯片与 RDL 顶部的倒装芯片一起集成到玻璃基板中，可以实现超短距离和超高密度互联。综上研究结果，嵌入式玻璃封装结构具有紧凑度高、损耗低等优点，为高性能射频系统提供了一个极具前景的异质集成方案。然而，玻璃基板易开裂，并且开孔形成埋置区域的工艺难度大、效率低，因而开发高效、高可靠玻璃开孔制造方法对于推动嵌入式玻璃封装技术具有重要意义。



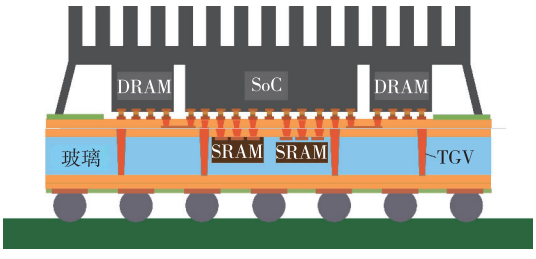
（a）下一代D波段无线通信射频模块[16]



（b）77 GHz雷达芯片[17]



（c）应用于 5G/6G 的翘曲最小化玻璃中介层封装[19]



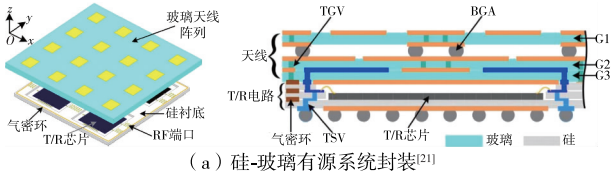
（d）基于芯片后装和芯片埋置的混合异质集成[20]

图 2　基于玻璃基板中介层的芯片埋置技术在射频系统封装中的应用实例

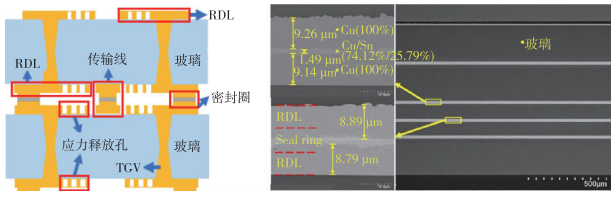
1.3 三维堆叠

基于玻璃基板的三维堆叠技术是采用 TGV 作为互联通道，将多个玻璃基板在垂直方向上进行堆叠，具有短的互联距离、超高集成、高功率等优点，有望成为一种高频信号高速传输的互联技术。

Yang 等[21]针对硅基天线封装存在高损耗、低效率、窄带宽等缺点，提出一种硅-玻璃有源系统三维堆叠封装架构，如图 3(a)所示。其中，有源部分集成在硅基板上，天线阵列由玻璃制成，采用球珊阵列形成空腔和两种屏蔽结构来提高阵列的扫描性能，并通过增加接地点来消除屏蔽结构内的谐振奇点。采用 8×8 天线阵列组件实现了大于 60°的广角扫描，可用于 Ka 波段通信和雷达系统。Fang 等[22]提出了一种基于多层玻璃基板堆叠的吸收滤波天线的封装方案，其中辐射贴片由反射滤波天线和带阻滤波器组成。辐射贴片通过 TGV 与衬底集成波导(SIW)馈电结构层连接，并采用激光键合进行封装。该封装方案的峰值增益可以达到 6.06 dBi，最大辐射效率达到 85%。Su 等[23]提出了一种五层玻璃堆叠的 77 GHz 毫米波汽车雷达，如图 3(b)所示，封装体的总体尺寸为 10 mm×9 mm×1 mm。采用皮秒激光诱导选择性刻蚀技术，在 230 和 100 μm 厚度玻璃基板上加工通孔，并采用低温铜锡互扩散共晶键合技术将玻璃基板逐层堆叠。由上可知，玻璃基板三维堆叠技术在高紧凑、高性能射频系统中具有广阔应用前景，但在工艺成本、良品率、生产时间等方面仍然面临巨大挑战。



(a) 硅-玻璃有源系统封装[21]



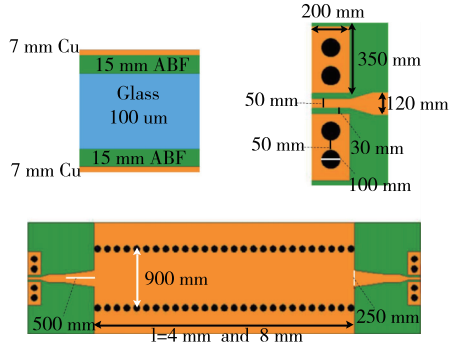
(b) 五层玻璃堆叠的77 GHz毫米波汽车雷达[23]

图 3 基于玻璃基板的三维堆叠技术在射频系统封装中的应用实例

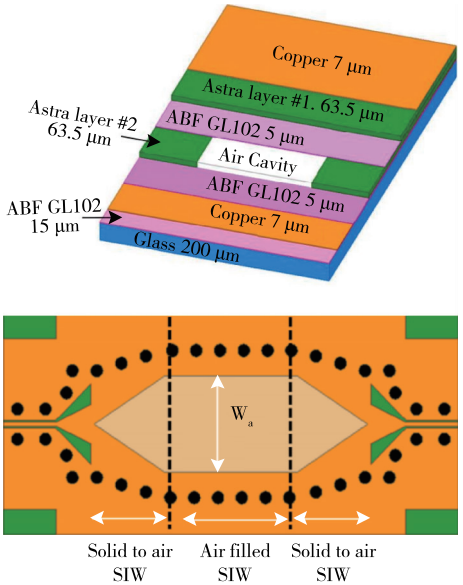
2 玻璃在射频元件中的应用

2.1 传输线和互联线

传输线和互联线的性能直接决定射频系统的性能。由于玻璃基板优异的射频特性，已经发展了多种玻璃和玻璃-聚合物基板上的平面传输线结构，如微带线、共面波导等[24]。Yu 等[25]在玻璃衬底表面设计加工了长度为 10 mm 的共面波导，并且该波导结构在 40 GHz 频率下的插损仅为 0.05 dB/mm，它证明了玻璃基传输线优异的射频性能。相较于平面波导，基于玻璃基板的 SIW 由于其低介电损耗和高金属化质量在高频段受到越来越多的关注[26]。Rehman 等[27]展示了基于玻璃基板的 D 波段 SIW，如图 4(a)所示，其由 100 μm 的玻璃芯层和两侧 15 μm 的 ABF 薄膜压合而成，并设计共面波导到微带的转换，实验测得该 SIW 在 D 波段的插损约为 0.5～0.8 dB/mm。然而，玻璃基板中的 SIW 波导结构包含高密度 TGV，对制造工艺提出了更高的要求。Rehman 等[28]又提出了玻璃基板上 D 波段空气填充 SIW，如图 4(b)所示，其通过两个 63.5 μm 的 Astra MT77 和 5 μm ABF 薄膜层压而成，金属层采用 SAP工艺制造。实验测得无空气填充和有空气



(a) D波段玻璃基CPW到SIW转变的顶视图和侧视图[27]

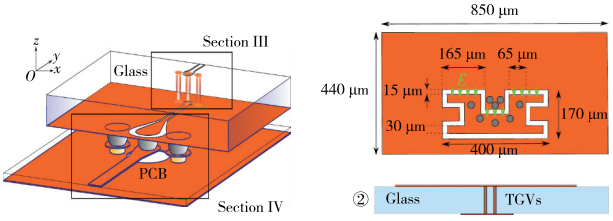


(b) D波段玻璃基空气填充 SIW[28]

图 4 基于玻璃基板的 SIW 在射频系统中的应用

填充 SIW 的单位长度插损分别为 0.34 和 0.13 dB/mm，证明了基于玻璃基板的空气填充 SIW 能够实现超低损耗互联，进而有望应用于射频系统中的传输线组件。

基于 TGV 的射频信号布线通常形成三线或准同轴线，也可通过堆叠带有 TGV 的玻璃基板实现射频信号传输[22-29]。Galler 等[30]提出了从 PCB 板上的微带线到玻璃顶面共面波导结构的完整互联设计，如图 5(a)所示，其通过三个 400 μm 焊球实现 PCB 板与玻璃基板底面的电气互联。同时，利用三线垂直布线 TGV(中间为信号传输线，两侧为接地线)实现玻璃基板两侧射频信号的传输，并测得射频信号通过玻璃基板传输的最大插损仅为 0.4 dB。Galler 等[31]又提出了利用准同轴垂直布线 TGV 实现 MMIC 芯片到介质波导的互联，如图 5(b)所示。其中，三个用于信号传输的 TGV 被五个用于接地的 TGV 包围。实验测得基于该互联结构的最小插损为 2.62 dB，1 dB 带宽为 18 GHz。上述研究证明了玻璃基板是一种高密度、低损耗传输线和互联线的衬底材料，在未来高性能射频系统中具有广泛的应用前景。然而，金属材料与玻璃基板的粘附力较差，难以实现通孔均匀实填充，进而可能会导致可靠性问题。



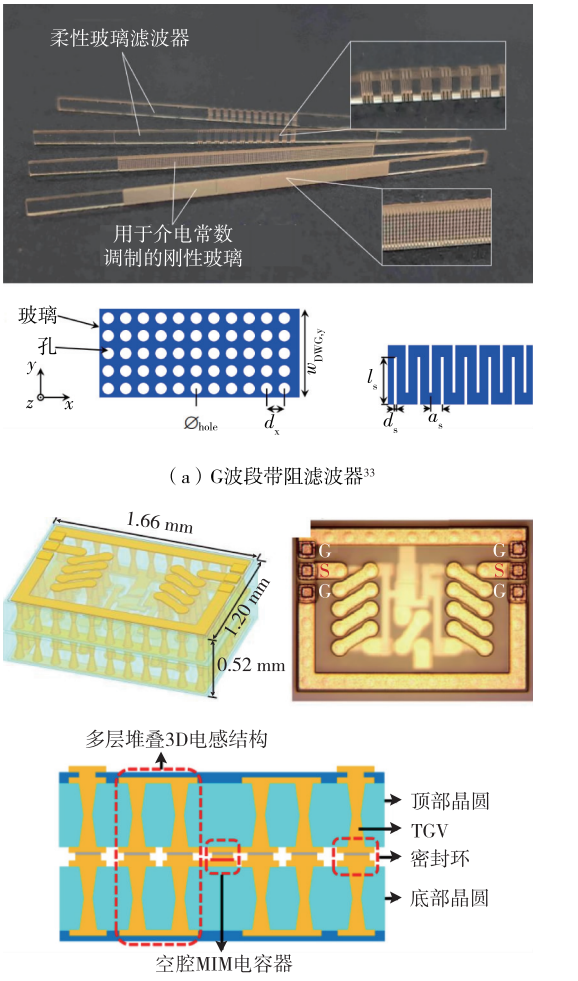
(a) 地线-信号线-地线配置[30]　(b) 五个用于接地的TGV包围三个用于信号传输的TGV[31]

图 5　基于 TGV 射频信号布线在射频系统中的应用实例

2.2　滤波器

滤波器是一种选频元件，其可以将一个特定频率的信号以最小损耗传输到下一个元件，直接决定整个射频系统的噪声和信号干扰。玻璃基板由于具有低介电损耗和低粗糙度等特性，特别适用于具有高 Q 因子的滤波器[32]。

Galler 等[33]提出了一种 G 波段玻璃介质波导带阻滤波器，如图 6(a)所示，通过激光诱导刻蚀技术在玻璃基板上加工通孔，进而实现玻璃介质波导介电常数的有效调控。在 156 GHz 中心频率下，陷波深度低于−14 dB。此外，通过在玻璃介质基板上加工弯曲槽，不仅可以实现介电常数调控，还能够在 8°的弯曲角度下实现稳定的滤波器性能，因此可应用于恶劣环境中。Bartlett 等[34]展示了一种基于矩形玻璃波导腔的 W 波段四阶带通滤波器，主要分为三层，顶部为源和负载耦合层，中间为谐振腔和耦合结构层，底部为非结构化层，玻璃结构同样采用激光加工。在 82～94 GHz 频率之间，插损约为 1.43～1.97 dB，回波损耗优于 22 dB。Ma 等[35]提出了一种基于玻璃基集成无源器件和玻璃通孔技术的三阶低插损带通滤波器，如图 6(b)所示。该组件采用双层玻璃堆叠电感结构和空腔金属-绝缘体-金属电容结构产生高 Q 值的 LC 元件，极大降低了滤波器的尺寸和插损。同时，顶部和底部晶圆加工采用低成本玻璃基晶圆工艺，并通过铜锡键合方法实现互联。实验测得该滤波器的尺寸和插损分别为 $0.018\lambda_0 \times 0.013\lambda_0$ 和 0.81 dB。由上可知，玻璃基射频滤波器具有低损耗、小尺寸等优点，但仍然需要开发更小线宽/线距、更高密度通孔、更优兼容性玻璃基板制造工艺，以实现更高集成度、更高性能的射频滤波器。



(a) G波段带阻滤波器[33]

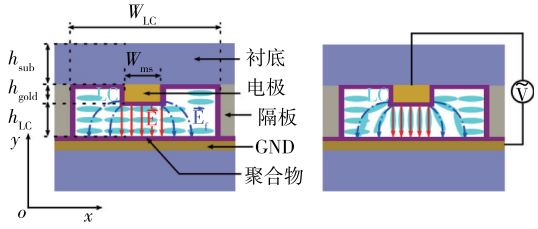
(b) 三界低插损带通滤波器[35]

图 6　玻璃基板在滤波器中的应用实例

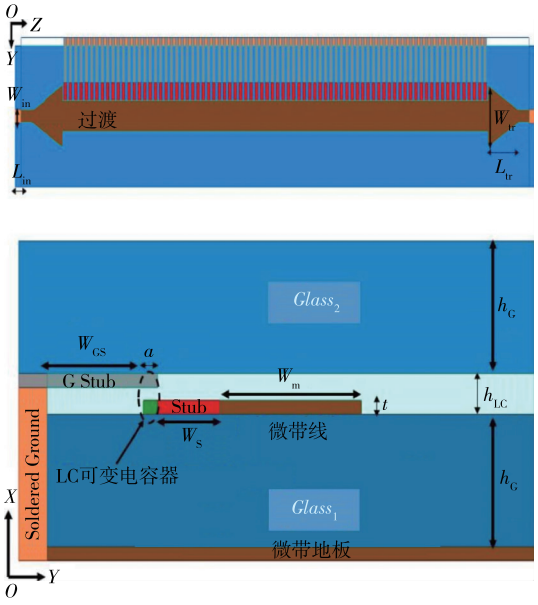
2.3 移相器

移相器可实现对射频信号的相位调制以控制波速指向，是决定相控阵系统性能的关键元件。液晶移相器具有连续可调性、高线性度、低耗散因数等优点，通常应用于 10 GHz 以上频段。玻璃基板在具备低损耗、低粗糙度、高稳定性等优点的基础之上，还具有优异的封装特性，可应用于液晶移相器中。

Wang 等[36]提出了一种基于微带线的玻璃液晶移相器，如图 7(a)所示，可实现 10～67 GHz 范围的连续可调谐，它采用带有缺陷结构的接地平面，造成了传输线的慢波效应，因此，传输线既结构紧凑又可保持电长度。当移相器填充 5 μm 厚度的 GT7-29001 液晶材料时，其品质因数达到 55°/dB，紧凑度和反应时间分别为 201°/λ_0 和 210 ms。Panahi 等[37]提出了一种 6 GHz 以下的高品质因数液晶移相器，如图 7(b)所示，也通过主微带线的相位常数变化来实现，并且两侧由玻璃基板进行封装。实验测得该移相器在 4 GHz 时的最大插损和最大相移分别为 4.35 dB 和 461°。由上述研究可知，玻璃基液晶移相器损耗低、相移大，有望在 5G/6G 中广泛应用。然而，仍然需要进一步解决玻璃基板和金属材料界面兼容性以及玻璃基板密封性问题。



(a) 基于液晶和缺陷接地面的连续可调谐移相器[36]

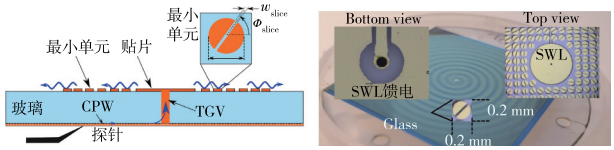


(b) 6 GHz以下高品质因数液晶移相器[37]

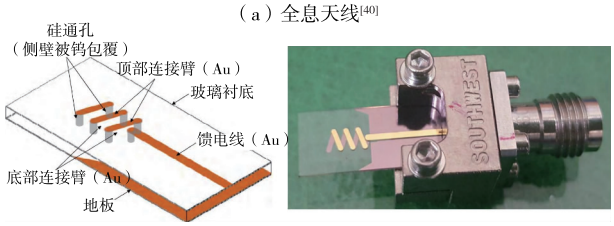
图 7 玻璃基板在液晶移相器中的应用实例

2.4 天线

玻璃由于其低损耗、低表面粗糙度和高透明度等特性，正发展成为一种有前途的毫米波天线基板材料[38-39]。Galler 等[40]提出了一种基于 TGV 的 150 GHz 以上的全息天线，如图 8(a)所示，表面波发射器放置在玻璃基板顶端，通过 TGV 进行电气互联，其最大增益为 24.7 dBi，旁瓣电平为 15 dB。Naqvi 等[41]提出了一种基于 TGV 的 V 波段螺旋形末端发射天线，如图 8(b)所示，采用微带线馈电，主要包括玻璃基板上 7 个由钨包覆硅材料填充的 TGV 和 6 个金连接臂。结果表明，该天线的工作带宽为 50.3～65 GHz，并当中心频率为 58 GHz 时，峰值增益为 6.3 dBi，效率为 62%。Fang 等[42]展示了一种基于玻璃封装材料和 TGV 的 K 波段滤波封装天线，其辐射贴片由一个贴片天线和一个反射系数互补的带通滤波器组成。带通滤波器包括三对 $\lambda_g/4$ 槽和两对 $\lambda_g/2$ U 形缝隙，并通过引入四个辐射零值提高阻带内的抑制水平。实验测得该天线的带宽达到 7 GHz，阻带抑制水平大于 16.5 dB，增益和辐射效率分别达到 6.5 dBi 和 89%。上述研究表明，玻璃基天线具有低损耗、大带宽、高增益、高辐射效率等优点，然而金属材料与玻璃基板的粘附性以及玻璃基板与金属材料不匹配的热膨胀系数引起的翘曲变形均可能影响天线的射频性能。



(a) 全息天线[40]



(b) 螺旋形末端发射天线[41]

图 8 基于 TGV 的天线

3　结论与展望

玻璃由于其优异的高频电学性能、高透明度、热膨胀系数可调等优点，有望在未来无线通信系统中得到广泛应用。本文系统概述了玻璃在先进射频封装（玻璃中介层和三维堆叠）和无源射频元件（传输线、互联线、滤波器、移相器、天线）中的最新研究进展，从结构集成度、工艺实现性、射频性能等角度剖析了不同先进封装结构和无源射频元件。尽管研究结果证明了玻璃基射频系统具有低损耗、高紧凑度、高辐射效率等优点，但玻璃开孔工艺难度大、导热系数较低、金属导线与玻璃基板粘附性较差、玻璃基板与金属材料热膨胀系数不匹配等问题仍待进一步解决。未来玻璃基射频系统的研究主要包括：

（1）玻璃与金属材料界面结合力增强技术

由于玻璃基板表面光滑，与常用金属材料（Cu 等）的界面粘附性较差，容易导致玻璃基板表面金属导线和玻璃通孔填充界面分层、脱落，从而影响射频性能，因此，需要进一步提升玻璃与金属材料界面结合力。未来研究将聚焦于玻璃表面活化技术、高可靠玻璃通孔填充技术、新型玻璃基板表面金属导线成型技术等方面，以进一步提升玻璃基射频系统的可靠性。

（2）玻璃基板光电共封装技术

光电共封装技术是利用先进封装技术将光模块和电芯片共同封装在同一个封装体中。玻璃基板具有高透明度、低损耗、高稳定性等特性，非常适合用作光电共装的基板。当玻璃作为基板时，不仅可以通过 TGV 实现电信号传输，也可作为光波导在基板内传递光信号。因此，基于玻璃基板的光电共封装技术可以进一步缩短光模块和电芯片的互联距离，减少寄生电容，降低传输损耗，进而在未来射频系统中具有广阔的应用前景。未来在该封装技术领域的研究将进一步聚焦如何充分发挥玻璃基板低射频损耗的优势。

（3）玻璃基 SOP 集成技术

SOP 是基于系统的封装，通过一个母板将 SiP、元器件、连接件、散热装置等部件集成，以形成具有系统功能的板级微系统，是 SiP 以上层级的集成。系统母板是提升 SOP 集成密度的关键，玻璃基板可在内部嵌入射频、数字、光芯片等进行信号传输，同时也可嵌入阻容、滤波等无源器件，进而大幅缩小系统体积重量。因此，玻璃基 SOP 集成将在未来毫米波和太赫兹频段下的无线通信系统中发挥革命性作用。为推动该技术走向实际应用，未来研究将聚焦于高密度跨尺度异构集成与互联工艺、系统可靠性设计与验证等方面。

（4）玻璃基射频系统高效散热技术

玻璃基板具有优异的高频电学性能和高透明度等优点，但其导热系数较低。因此，当玻璃基板作为射频系统先进封装和无源射频元件的载板材料时，需要充分考虑芯片、封装、系统的散热问题。未来研究将聚焦于玻璃基射频系统散热方案设计和新型散热材料开发等方面。金刚石是已知热导率最高的材料，有望作为玻璃基射频系统的散热材料。

参考文献：

[1] Chaloun T, Brandl S, Ambrosius N, et al. RF glass technology is going mainstream: Review and future applications[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(2): 783-799.

[2] Müller J, Kaltwasser M, Bartsch H, et al. Glass and Glass/LTCC interposers as heterogenous integration platform[C]// 2024 Pan Pacific Strategic Electronics Symposium (Pan Pacific), 2024: 1-7.

[3] 黄　建. 三维集成微波组件技术:进展与展望[J]. 电讯技术, 2023, 63(1): 137-144.
Huang Jian. Technologies of three-dimensional integrated microwave module: Advances and prospects [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(1): 137-144.

[4] Low K K W, Kanar T, Zihir S, et al. A 17.7-20.2-GHz 1 024-element K-band SATCOM phased-array receiver with 8.1-dB/KG/T, ± 70° beam scanning, and high transmit isolation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(3): 1769-1778.

[5] Kam D G, Liu D, Natarajan A, et al. LTCC packages with embedded phased-array antennas for 60 GHz communications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(3): 142-144.

[6] Watanabe A O, Ali M, Sayeed S Y B, et al. A review of 5G front-end systems package integration[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 11(1): 118-133.

[7] 郭育华，王强文，刘建军，等. 玻璃通孔的高频传输性能[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(1): 87-92.
Guo Yuhua, Wang Qiangwen, Liu Jianjun, et al. High frequency transmission performance of Through Glass Via[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(1): 87-92.

[8] Zhao J, Chen Z, Qin F, et al. Development of high performance 2.5D packaging using glass interposer with Through Glass Vias [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34(25): 1790.

[9] Cai L, Wu J, Lamberson L, et al. Glass for 5G applications [J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(8): 082901.

[10] Tummala R, Deprospo B, Dwarakanath S, et al. Glass panel packaging, as the most leading-edge packaging: Technologies and applications [C]// 2020 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), 2020: 1-5.

[11] 方志丹，于中尧，武晓萌，等. FCBGA基板关键技术综述及展望[J]. 电子与封装，2023，23(3)：29-37.
Fang Zhidan, Yu Zhongyao, Wu Xiaomeng, et al. Overview and prospect of key technologies of FCBGA substrate [J]. Electronics & Packaging, 2023, 23(3): 29-37.

[12] Watanabe A O, Lin T H, Ali M, et al. Ultrathin antenna-integrated glass-based millimeter-wave package with Through-Glass Vias[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(12): 5082-5092.

[13] Zhong Y, Bao S, He Y, et al. Heterogeneous integration of diamond-on-chip-on-glass interposer for efficient thermal management[J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(3): 448-451.

[14] Watanabe A O, Ali M, Zhang R, et al. Glass-based IC-embedded antenna-integrated packages for 28-GHz high-speed data communications[C]// 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2020: 89-94.

[15] 曾 策，廖承举，卢 茜，等. 射频系统级封装互连技术研究进展[J]. 导航与控制，2022，21(Z1)：46-57，91.
Zeng Ce, Liao Chengju, Lu Qian, et al. Research progress on interconnect technologies for RF-SiP [J]. Navigation and Control, 2022, 21(Z1): 46-57, 91.

[16] Jia X, Li X, Moon K, et al. Antenna-integrated, die-embedded glass package for 6G wireless applications[C]// 2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2022: 377-383.

[17] Yu T, Zhang X, Chen L, et al. Development of embedded glass wafer fan-out package with 2D antenna arrays for 77 GHz millimeter-wave chip [C]// 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2020: 31-36.

[18] Galler T, Chaloun T, Mayer W, et al. Glass package for radar MMICs above 150 GHz [J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 2(1): 97-107.

[19] Li X, Jia X, Kim J W, et al. Die-embedded glass interposer with minimum warpage for 5G/6G applications[C]// 2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2023: 2247-2254.

[20] Ravichandran S, Kathaperumal M, Swaminathan M, et al. Large-body-sized glass-based active interposer for high-performance computing [C]// 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2020: 879-884.

[21] Yang L, Wang K, Wang B, et al. 3-D glass integrated stacked patch antenna array for silicon active package system [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2024, 18(4): 239-247.

[22] Fang Z, Zhang J, Gao L, et al. Absorptive filtering packaging antenna design based on Through-Glass Vias[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2023, 13(11): 1817-1824.

[23] Su Y, Yu D, Ruan W, et al. Development of compact millimeter-wave antenna by stacking of five glass wafers with Through Glass Vias [J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(6): 934-937.

[24] ur Rehman M, Ravichandran S, Erdogan S, et al. W-band and D-band transmission lines on glass based substrates for sub-THz modules [C]// 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2020: 660-665.

[25] Yu T, Xue K, Li K, et al. Characteristics of 10～110 GHz transmission lines on fused silica substrate for millimeter-wave modules[C]// 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2021: 1-5.

[26] Cai J, Zhang M, Yu C, et al. An air-filled double-sided gap waveguide based on glass packaging for mm-W applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024, 34(3): 275-278.

[27] ur Rehman M, Watanabe A, Ravichandran S, et al. Substrate integrated waveguides in glass interposers for mm wave applications [C]// 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2021: 339-341.

[28] ur Rehman M, Kumar L N V, Erdogan S, et al. Air filled SIWs using laminate dielectrics on glass substrate for D-band applications [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(1): 98-105.

[29] Shah U, Liljeholm J, Campion J, et al. Low-loss, high-linearity RF interposers enabled by Through Glass Vias[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(11): 960-962.

[30] Galler T, Chaloun T, Kröhnert K, et al. Hermetically sealed glass package for highly integrated MMICs[C]// 2019 49th European Microwave Conference (EuMC), 2019: 292-295.

[31] Galler T, Chaloun T, Mayer W, et al. MMIC-to-dielectric waveguide transitions for glass packages above 150 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(7): 2807-2817.

[32] Psychogiou D, Ashley A. Glass-based bandpass filters for new radio (NR) K-/Ka-band communications [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(5): 887-889.

[33] Galler T, Schulz-Ruhtenberg M, Chaloun T, et al. Mechanically flexible dielectric waveguides and bandstop

filters in glass technology at G-band [C]// 2022 52nd European Microwave Conference (EuMC), 2022: 294-297.

[34] Bartlett C, Malavé A, Letz M, et al. Structured-glass waveguide technology for high-performance millimetre-wave components and systems[J]. IEEE Journal of microwaves, 2022, 2(2): 307-315.

[35] Ma H, Hu Z, Yu D. A low-loss bandpass filter with stacked double-layer structure using glass-based integrated passive device technology[J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(7): 1216-1219.

[36] Wang D, Polat E, Tesmer H, et al. Highly miniaturized continuously tunable phase shifter based on liquid crystal and defected ground structures [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(6): 519-522.

[37] Panahi M A, Yeung L, Hedayati M, et al. Sub-6 GHz high FOM liquid crystal phase shifter for phased array antenna [J]. IEEE Journal of Microwaves, 2022, 2(2): 316-325.

[38] Erdogan S, Moon K S J, Kathaperumal M, et al. D-band integrated and miniaturized quasi Yagi antenna array in glass interposer[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023, 13(3): 270-279.

[39] Xu J, Lin S, Huang Y, et al. Design of patch antenna array with cavity structure on quartz glass for radar applications [C]// 2022 IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 2022: 208-211.

[40] Galler T, Frey T, Waldschmidt C, et al. High-gain millimeter-wave holographic antenna in package using glass technology[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(12): 2067-2071.

[41] Naqvi A H, Park J H, Baek C W, et al. V-band end-fire radiating planar micromachined helical antenna using Through-Glass Silicon Via (TGSV) technology[J]. IEEE Access, 2019, 7: 87907-87915.

[42] Fang Z, Zhang J, Gao L, et al. Ka-band broadband filtering packaging antenna based on Through-Glass Vias (TGVs) [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(6): 916-926.

作者简介：

吴　磊(1995—)，男，四川省南充市人，博士，工程师，主要研究方向为射频系统先进封装以及增材制造。