

引文格式:

王刚, 叶刚, 李奇哲, 等. 三维集成封装中光敏玻璃通孔制备工艺研究[J]. 集成技术, 2023, ? (?): ?-?.

Wang G, Ye G, Li QZ, et al. Study on the preparation process of photosensitive glass through-hole in three-dimensional integrated package[J]. Journal of Integration Technology, 2023, ?(?): ?-?.

三维集成封装中光敏玻璃通孔制备工艺研究

王刚, 叶刚, 李奇哲, 周超杰, 夏晨辉

(中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏 无锡 214035)

摘要: 玻璃通孔转接板是一种典型的垂直传输结构, 广泛的应用于三维集成封装电路中。根据射频信号对小直径、窄节距垂直通孔的使用需求, 基于光敏玻璃衬底, 采用紫外光曝光、热处理以及湿法刻蚀方法, 获得了深宽比为 8:1, 最小直径为 25.68 μm 的玻璃通孔。通过光敏玻璃通孔制备过程中曝光量对通孔制备工艺影响的研究, 得到曝光过程中光敏玻璃的改性机理。实验结果表明, 随着曝光量增加, 通孔孔径增大, 光敏玻璃改性过程是由表及里, 由正面至背面逐渐改性的过程。这为玻璃通孔转接板的制备提供关键工艺支撑。

关键词: 玻璃通孔; 三维集成; 光敏玻璃; 曝光; 深宽比

中图分类号: TN305.99;

文献标志码: A

文章编号:

E-mail: 王刚 wanggang_cetc@126.com; 夏晨辉 (通信作者) smartxvip@163.com

doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230406001

Study on the preparation process of photosensitive glass through-hole in three-dimensional integrated package

WANG Gang, YE Gang, LI Qizhe, ZHOU Chaojie, XIA Chenhui

(The 58th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, WuXi, Jiangsu 214035, China)

Abstract: Glass through-hole adapter plate is a typical vertical transmission structure widely used in three-dimensional integrated package circuits. Based on the demand of RF signals for the use of small-diameter, narrow-pitch vertical vias, glass vias with a depth-to-width ratio of 8:1 and a minimum diameter of 25.68 μm were obtained based on a photosensitive glass substrate using UV exposure, heat treatment, and wet etching methods. The mechanism of modification of photosensitive glass during the exposure process was obtained by studying the effect of exposure amount on the through-hole preparation process of photosensitive glass through-hole preparation. The experimental results show that with the increase of exposure, the through-hole aperture increases, and the photosensitive glass modification process is a gradual modification process from the front to the back side from the surface to the inside. This provides key process support for the preparation of glass through-hole adapter plates.

Keywords: glass through-via; three-dimensional integration; photosensitive glass; exposure; aspect ratio

1 引言

随着半导体封装技术的发展, 基于转接板技术, 实现了封装技术由平面 2D 维度向垂直 2.5D/3D 维度拓展, 大幅提高系统的集成度, 显著提升空间利用率, 缩短互连长度, 降低功耗, 可广泛应用于光通信、射频、微波、微机电系统、微流体器件和三维集成领域^[1-5]。按封装材料的不同, 转接板可分为三大类, 分别为有机转接板、硅转接板和玻璃转接板。有机转接板热稳定性差、与硅芯片的热膨胀系数 (Coefficient of thermal expansion, CTE) 匹配差以及高密度输入/输出 (Input/Output, I/O) 加工难度大, 制约了有机转接板高密度集成封装方向的应用^[6]。硅转接板得益于与硅芯片的 CTE 匹配好、优异的导热性能、与现有集成电路工艺及设备兼容性好以及极高的 I/O 端口密度, 已得到广泛应用^[7]。但由于硅属于半导体材料, 具有导电性, 在高频情况下, 容易导致漏电以及传输信号的串扰和耦合, 严重制约了硅转接板的应用。而玻璃转接板基于玻璃材料的特性, 电阻率高, 绝缘性能佳, 对信号隔离好^[8], 减小信号之间的串扰, 对高频信号的传输有着硅转接板不能比拟的优势^[9]。

制备玻璃转接板的关键在于实现高质量、高深宽比玻璃通孔的制备, 目前常见的制备方法主要有光敏玻璃^[10]、干法刻蚀^[11]、激光烧蚀^[12]、激光诱导刻蚀^[13]等等。传统的干法刻蚀及激光烧蚀存在一定的局限性, 例如侧壁粗糙, 边缘崩边等现象, 为后续的工艺带来困难, 并存在一定的可靠性风险。基于光敏玻璃的玻璃通孔制备方法具有整面加工, 刻蚀选择比高, 在实际应用中具有一定的优势。本文基于光敏玻璃材料, 研究了不同曝光量对玻璃通孔制备的影响, 实现了高密度、高深宽比的玻璃通孔制备。

2 玻璃通孔制备工艺

TGV 转接板作为一种新型的集成组装技术, 能够实现高密度、高可靠的三维集成封装制造, 从而提高电子系统的性能和可靠性, 具有广阔的应用前景。多年以来, 玻璃微孔的制备制约着 TGV 转接板的发展, 如何制备出高深宽比、窄节距、高垂直度、高侧壁粗糙度、低成本的玻璃微孔一直是科研人员关注的话题。

2.1 玻璃通孔成型技术

玻璃通孔加工成型的方法主要有喷砂法、光敏玻璃法、聚焦放电法、等离子刻蚀法、激光烧蚀法、电化学法、激光诱导刻蚀法等^[14]。喷砂法制作的玻璃通孔孔径较大, 且一致性较差, 目前已逐渐淡出三维集成封装的应用范畴。聚焦放电法利用放电现象在玻璃表面形成微孔, 然后通过化学腐蚀扩大孔径制作出高质量的通孔, 但其加工过程复杂、生产周期长、成本高以及容易造成偏心性等缺点限制了其在微纳集成封装中的生产应用。等离子刻蚀法利用气体中的等离子体对玻璃表面进行加工, 从而形成微孔, 但其制备速度慢、制备过程难控制、玻璃表面损伤大以及设备较大缺点限制了其在集成封装中的广泛应用。激光烧蚀法利用激光的热效应将玻璃材料烧蚀掉, 可以制备出垂直度高的玻璃通孔, 但其具有制备速度慢、效果难控制、烧蚀产生碎屑、设备成本高、对材料要求高等缺点。电化学法利用电化学反应, 在电解溶液中去玻璃表面的材料, 从而形成通孔, 该方法制备时间长、电极易腐蚀、温度难控制、对电解液选择和配置高、通孔尺寸和形貌难控制。激光诱导刻蚀法利用激光在玻璃表面及内部改性, 在高温下利用湿法刻蚀或气氛下直接刻蚀玻璃形成通孔, 该方法制备的玻璃通孔质量较高, 但其具有激光诱导速度慢、制备过程复杂、激光诱导孔径受激光范围限制、表面易损伤及对材料要求高等缺点。光敏玻璃法利用光敏玻璃曝光改性的机理, 在酸蚀液中的刻蚀比不同, 制作出高质量的玻璃通孔, 该方法制作的玻璃通孔具有效率高、尺寸精度高、表面光滑度高以及可制备复杂结构等特点。表 1 将从玻璃通孔的加工品质、生产效率、生产成本等几个方面进行详细对比。

表 1 不同玻璃通孔制备方法对比

玻璃通孔制备方法	加工品质	生产效率	生产成本
----------	------	------	------

喷砂法	孔径大、节距大、表面质量较差	中；双面喷砂	高；需用到掩膜板、研磨
聚焦放电法	密度高、深宽比高、垂直度差	低；单孔制作	中；设备维护成本
等离子刻蚀法	侧壁粗糙度低、损伤小	中；工艺复杂，刻蚀速率低	高；需用到掩膜板、光刻胶
激光烧蚀法	粗糙度大、存在侧裂纹	低；单孔作业	中；激光设备维护成本
电化学法	孔径大、节距大、垂直度差	中；单孔成型快	低；设备简单
激光诱导刻蚀法	密度高、深宽比高、无损伤、垂直度差	中；单孔成型快	高；设备维护成本
光敏玻璃法	密度高、深宽比高、侧壁粗糙度好、垂直度好	高；工艺简单，整片作业	中；需用到掩膜板

2.2 光敏玻璃通孔制备工艺

根据光敏玻璃材料特性，设计了一种通过紫外曝光、热处理、湿法刻蚀等方法实现玻璃通孔加工的工艺流程。实验前需要先将玻璃进行预处理，将玻璃先后放入异丙醇和丙酮中分别超声清洗 10min，取出后使用氮气吹干，除去玻璃表面杂质。玻璃通孔制备工艺流程如图 1 所示。紫外光曝光时间分别为 4min、8min、12min、16min，掩模板单个透光区域为圆形，直径设计值为 30 μm ，热处理温度曲线如图 2 所示，由室温升至 500 $^{\circ}\text{C}$ 后，保温 1 小时，再升至 560 $^{\circ}\text{C}$ 保温 1 小时后，自然降温至室温。最后采用湿法刻蚀方法，将玻璃浸泡在质量分数为 10%的 HF 酸溶液中，并加超声，浸泡 20min，完成玻璃通孔的制备。

光敏玻璃材料选用肖特 Foturan II 型光敏玻璃，实验材料为边长 2inch(5.08mm)，厚度 500 μm 的正方向玻璃。实验所用曝光设备为德国 SUSS 紫外曝光机 MA6，紫外光源波长为 320nm，紫外光源强度为 7.02mW/cm²；实验所用热处理设备为德国 Nabertherm 马弗炉。

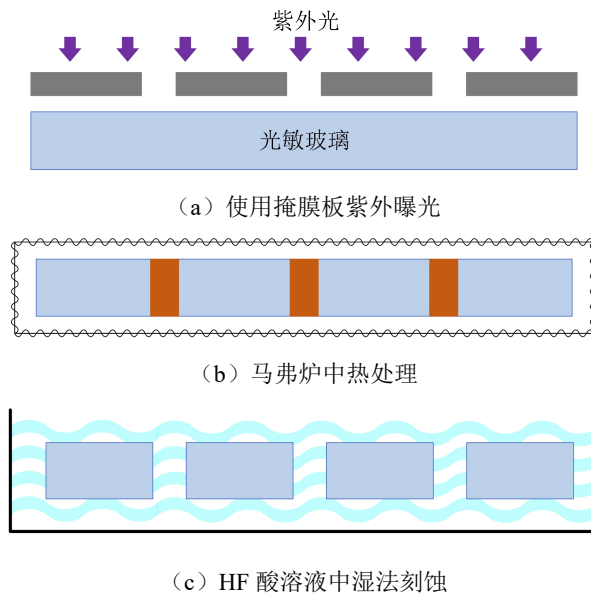


图 1 光敏玻璃通孔制备工艺流程图

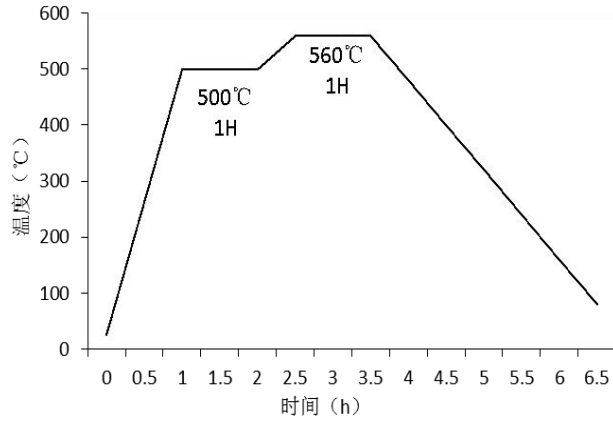
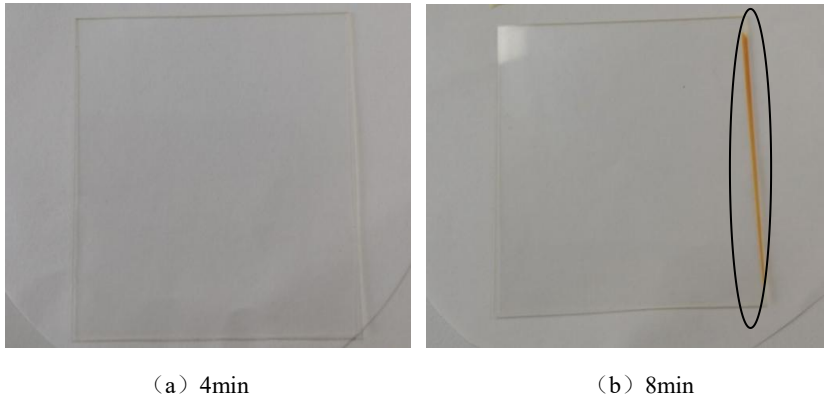


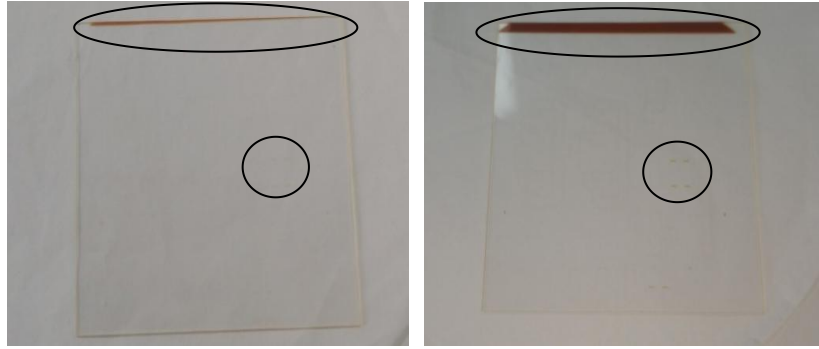
图2 光敏玻璃热处理温度曲线

3 光敏玻璃通孔制备过程

3.1 曝光改性

德国肖特生产的光敏玻璃为锂铝硅酸盐光敏玻璃，除主要成分外，还掺杂了一定的 Ag^+ 、 Ce^{3+} 和 Sb^{3+} ，分别以 AgO 、 CeO_2 和 Sb_2O_3 的状态存在于玻璃中，其中 CeO_2 为光敏剂，主要成分 Ce^{3+} 吸收光谱峰值在 315nm 附近，曝光时，经 320nm 紫外光照射发生光化学反应，吸收光子能量，释放一个自由电子，变成 Ce^{4+} ，释放的自由电子处在 Ce^{4+} 周围，形成电子离子对，在室温下无法移动； AgO 为成核剂，热处理时，温度升至 500°C 并保温，曝光产生的自由电子释放出来，与 Ag^+ 结合 Ag 原子， Ag 原子不断聚集形成微小的单质 Ag 晶体，继续升温到 560°C，玻璃中的硅酸盐以微小的单质 Ag 晶体为核心，逐渐生长出 Li_2SiO_3 晶体，当形成足够多的相当大的晶体，玻璃就会呈现半透明的状态^[15]。生成的 Li_2SiO_3 晶体在 HF 溶液中的溶解速度为玻璃在 HF 溶液中溶解速度的 20-30 倍，当经过紫外曝光并热处理后的光敏玻璃浸泡在 HF 溶液中，曝光区域易于被刻蚀，从而形成特定的结构^[16]。如图 3 中 (a)、(b)、(c)、(d) 所示，分别为曝光 4min、8min、12min、16min 并热处理后外观照片。可见随着 320nm 紫外光曝光量的增加，边缘泛曝光区域变为灰黑色，变色程度逐渐加深，掩膜图案逐渐明显。





(c) 12min

(d) 16min

图3 不同曝光时间并热处理后外观照片

使用 X 射线衍射仪对实验中的光敏玻璃片进行成分分析，分别对原始来料、曝光之后以及曝光热处理后的玻璃材料进行 XRD 分析。结果如图 4 所示，对照粉末衍射卡（PDF#30-0766），光敏玻璃曝光热处理之后结出 Li_2SiO_3 晶体。使用紫外曝光后的玻璃样片，由于脉冲能量较低，不能达到光致损伤阈值，所以玻璃结构没有明显变化。

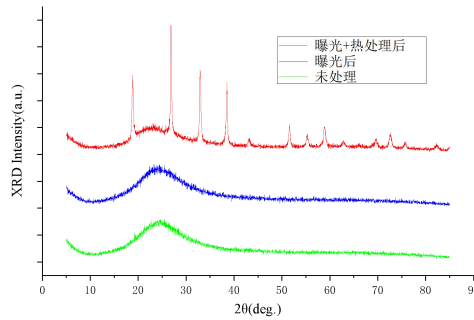
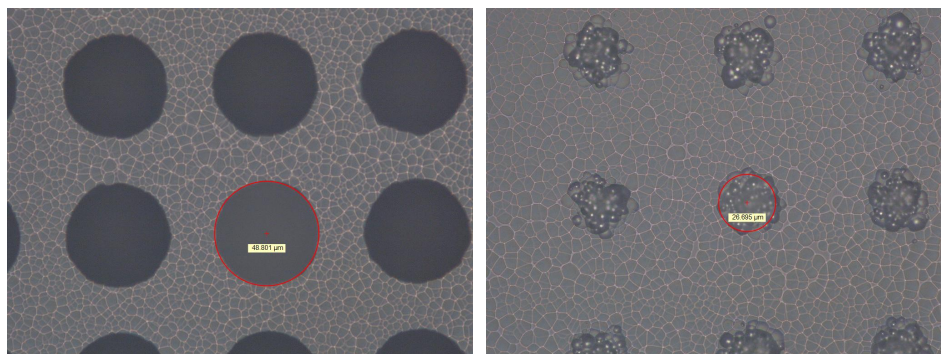


图4 光敏玻璃 XRD 结果

3.2 HF 酸刻蚀

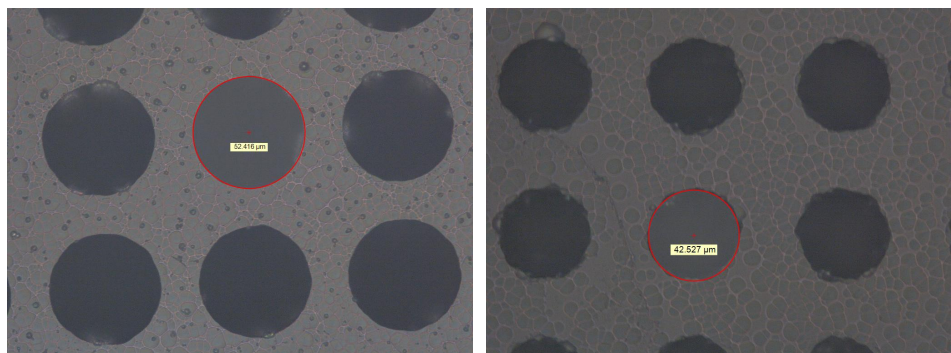
图 5~8 分别为光学显微镜下不同曝光时间样品热处理后在 HF 酸溶液中浸泡 20min 后的外观图，曝光时间分别为 4min、8min、12min 和 16min。曝光时间为 4min 时，如图 5 所示，样品正面刻蚀孔呈圆形，与掩膜图案一致，背面仅有轻微的刻蚀痕迹。经分析，紫外光曝光时，光源由上而下经掩模板照射在玻璃表面，玻璃表面最先吸收紫外光中光子能量，由表及里，由正面到背面，光子能量不断被层层吸收，紫外光在穿过玻璃过程中，能量逐渐降低；当曝光时间较短时，玻璃可吸收的紫外光总能量较低，能量会被玻璃正面部分优先吸收，背面部分能够吸收到的能量很少，导致刻蚀后样品正面刻蚀明显，背面刻蚀轻微。



(a) 正面

(b) 背面

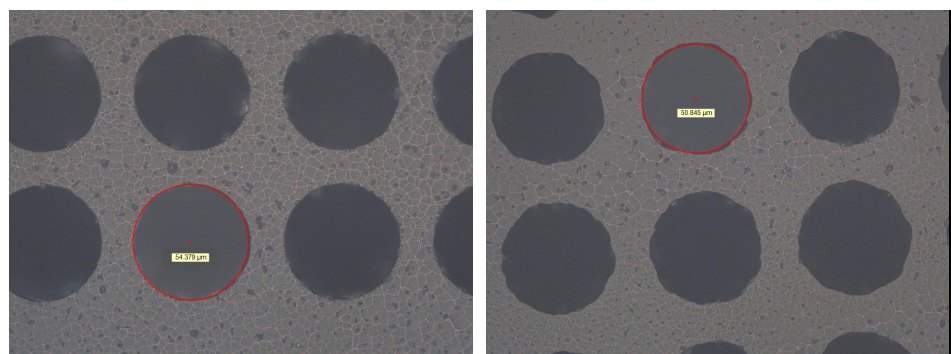
图5 紫外曝光 4min 样品刻蚀后外观照片



(a) 正面

(b) 背面

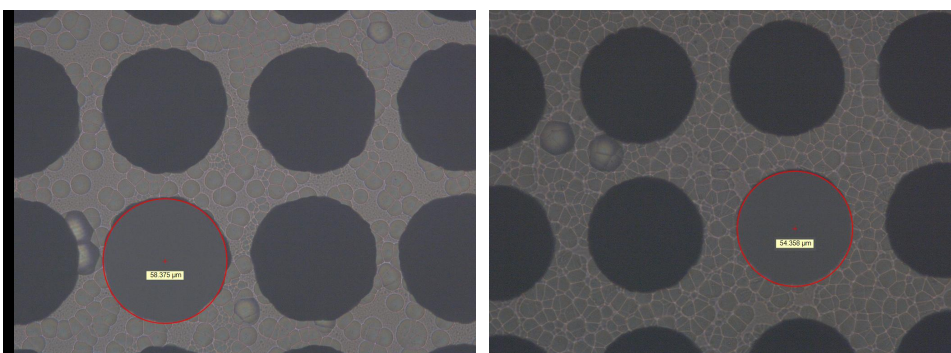
图 6 紫外曝光 8min 样品刻蚀后外观照片



(a) 正面

(b) 背面

图 7 紫外曝光 12min 样品刻蚀后外观照片

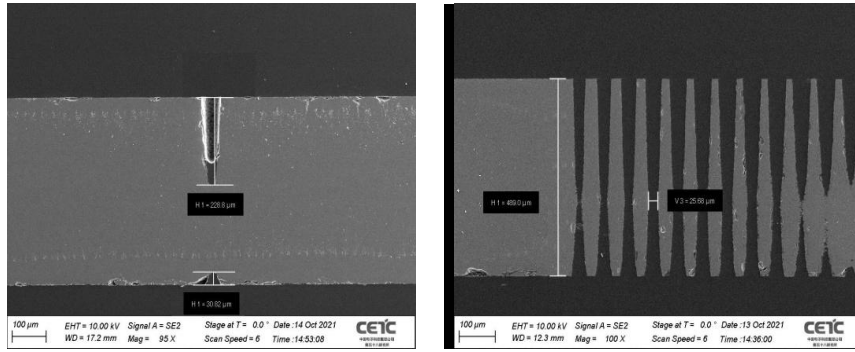


(a) 正面

(b) 背面

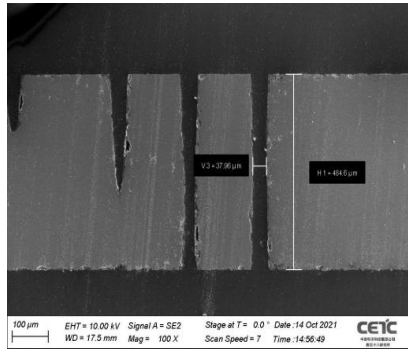
图 8 紫外曝光 16min 样品刻蚀后外观照片

曝光时间增加为 8min 时，如图 6 及图 9 (a) 所示，图 6 中正面与背面都呈现出明显的刻蚀孔，正面刻蚀孔的尺寸大于背面刻蚀孔尺寸，图 9 (a) 为曝光时间 8min 刻蚀后的 SEM 截面图，由截面图可知，正面刻蚀孔深度约为 $228.8\mu\text{m}$ ，背面刻蚀孔深度约为 $30.82\mu\text{m}$ ，正面刻蚀孔深度大于背面刻蚀孔深度。实验表明，随着曝光时间增加，玻璃可吸收的紫外光总能量增加，玻璃内部由正面至背面逐步改性，改性程度逐渐降低，造成刻蚀时样品正面的刻蚀速率远大于样品背面的刻蚀速率。



(a) 8min

(b) 12min



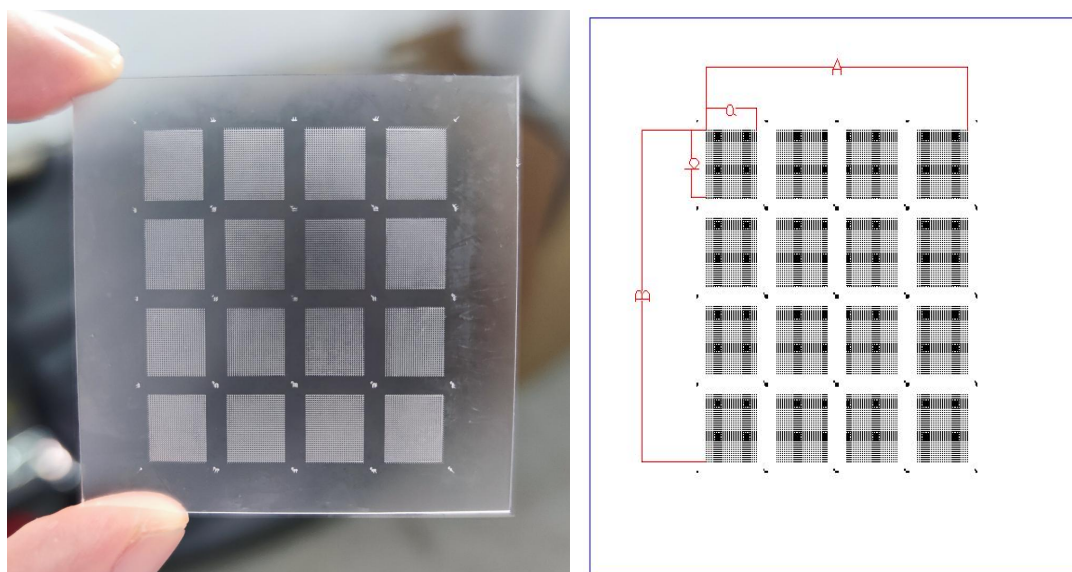
(c) 16min

图 9 不同曝光时间样品 HF 刻蚀后 SEM 截面图

当曝光时间继续增加，如图 9 (b)、(c) 所示，曝光时间分别为 12min、16min 刻蚀后的 SEM 截面图，通孔已刻蚀穿，曝光 12min 样品的厚度为 489 μm ，通孔最窄位置尺寸约为 25.68 μm ，最窄处位置处于中偏下部位，曝光 16min 样品的厚度为 484.6 μm ，通孔最窄位置尺寸约为 37.96 μm ，最窄处位置处于中间部位。结果表明，随着曝光时间继续增加，曝光区域玻璃改性程度增强，满足了玻璃通孔制备需求；由通孔最窄处位置所处部位可知，曝光时间为 12min 时，玻璃内部由正面至背面的改性程度仍为降低的趋势，曝光时间达到 16min 时，玻璃正背面改性程度基本均匀。

3.3 光敏玻璃通孔位置度分析

由于光敏玻璃通孔制作过程中，会用到 500 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温处理工艺。当材料受热时，热膨胀系数的变化将导致材料的长度、厚度等尺寸维度发生变化，这可能会导致材料产生变形。对于 TGV 转接板而言，玻璃通孔的位置变化会直接影集成系统的性能，对于数字电路来说，会影响信号完整性；在射频电路中，会影响传输损耗。图 10 为光敏玻璃微通孔成型之后，偏移量的测量结果。



(a) 玻璃通孔样片 (b) 测量点示意图

图 10 光敏玻璃通孔偏移量测量

使用高精度三坐标测量仪对所制造的光敏玻璃通孔样件的局部偏移和全局偏移进行测量,对测试结果分析得到,玻璃通孔刻蚀完成后的涨缩系数约为 1.0012,这表明光敏玻璃法制备的 TGV 通孔,位置度存在一定的变化。对于常规 3mm×3mm 的 TGV 转接板,边缘 TGV 孔的最大偏移量约为 1.8μm,这对于三维集成封装来说,在工艺所允许的范围之内。

表 2 光敏玻璃通孔偏移量测量结果

样品编号	位置	设计值 (mm)	测量值 (mm)	偏移量 (mm)	涨缩系数
1#	a	6.50	6.507513	0.007513	1.0012
	b	7.75	7.759056	0.009056	1.0012
	A	33.98	34.02272	0.04272	1.0013
	B	38.23	38.28124	0.05124	1.0013
2#	a	6.50	6.507852	0.007852	1.0012
	b	7.75	7.759099	0.009099	1.0012
	A	33.98	34.02405	0.04405	1.0013
	B	38.23	38.27478	0.04478	1.0012

3.4 光敏玻璃通孔成型机理

经过以上研究过程,整理实验过程数据,得到样品正反面通孔直径尺寸以及正反两面通孔直径尺寸差值与曝光时间的关系。结合图 11 所示结果,曝光时间由 4min 增加至 12min 的过程中,曝光区域逐步改性完成,刻蚀孔开口尺寸快速增加,进一步表明,光敏玻璃通过紫外光曝光改性的过程是由表及里,由正面到背面,逐步改性的一个过程;曝光时间继续增加,由 12min 增加至 16min,正反两面通孔直径尺寸继续稳步增大,正反两面通孔直径尺寸差趋于稳定,说明光敏玻璃曝光区域完全改性后,继续曝光,玻璃内部改性区域向四周围扩散,由正面至背面的扩散的范围逐渐变小,正反两面的改性区域面积之差趋于稳定。

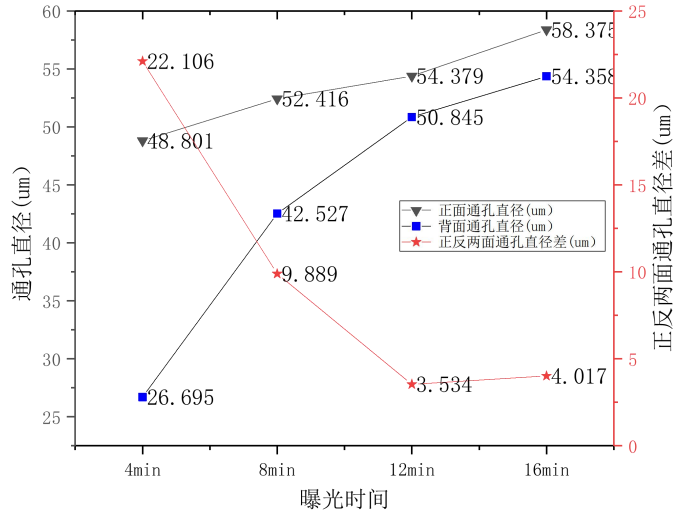


图 11 正反面通孔直径尺寸及其差值与曝光时间的关系

表 3 与以往相关工作的比较

文献	工艺	通孔直径	厚度	深宽比
文献[10]	光敏玻璃法	70μm	490μm	7:1
文献[11]	等离子刻蚀法	33.7μm	65.5μm	1.9:1
文献[12]	激光烧蚀法	210μm	500μm	2.4:1
文献[17]	湿法腐蚀	484.25μm	96.92μm	0.2:1
文献[18]	激光诱导刻蚀法	25μm	490μm	19:1
本文	光敏玻璃法	25.69μm	489μm	19:1

与以往工作的对比结果如表 3 所示，本文所采用的光敏玻璃法制备的 TGV 通孔，对比文献 [10]采用该方法所制备的 TGV 通孔，深宽比指标大幅提升。相较于等离子刻蚀^[11]、激光烧蚀^[12]、湿法腐蚀^[17]等方法，在通孔直径和深宽比指标上均具有明显优势，并且达到了与激光诱导刻蚀法^[18]制备 TGV 通孔技术指标上同等效果。本文所制备的 TGV 通孔具有小直径、高深宽比、窄节距、低成本等优势，满足三维集成封装中垂直互连转接板的使用需求。

4 结论

本文基于光敏玻璃对通孔制备工艺进行研究，采用紫外光曝光、热处理以及湿法刻蚀方法，获得了深宽比为 8:1 的玻璃通孔，研究了曝光量对通孔制备工艺的影响，探讨了曝光过程中光敏玻璃的改性机理。研究发现，厚度为 500μm 的光敏玻璃，曝光量为 5J/cm³ 时，即可满足玻璃通孔的制备需求；光敏玻璃紫外光曝光改性的过程是由表及里，由正面到背面，逐步改性的一个过程；光敏玻璃曝光区域完全改性后，继续曝光，玻璃内部改性区域会向四周围扩散。本研究结果为基于光敏玻璃的通孔制备技术开发和应用提供了实验依据。

参考文献：

- [1] 赵正平. 微系统三维集成技术的新发展[J]. 微纳电子技术, 2017, 54 (1) :4-13.
Zhengping Zhao. New Progress of the Micro System Three-Dimensional Integration Technology [J]. Micronanoelectronic Technology, 2017,54(1):4-13.
- [2] 黄昉, 朱健, 石归雄.应用于微波/毫米波领域的集成无源器件硅基转接板技术[J].电子工业专用设备,

2017:20-23.

Wen Huang,Jian Zhu,Guixiong Shi. Silicon Interposer Combined with Integrated Passive Devices for Micro/Millimeter Wave Application[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2017:20-23.

[3] 李男男, 刑朝洋. 惯性微系统封装集成技术研究进展[J]. 导航与控制, 2018, 17 (6) : 28-34.

Nannan Li,Chaoyang Xing. Development of Inertial Micro-system Packaging and Integration Technology[J]. Navigation and Control, 2018,17(6):28-34.

[4]刘朝阳, 刘海燕, 于大全, 等. 硅通孔(TSV)转接板微组装技术研究进展[J]. 电子与封装, 2015, 15 (8): 1-8.

Xiaoyang Liu,Haiyan,Liu, Daquan Yu. Development of Micropackage Technology for Through Silicon Via(TSV) Interposer[J]. Electronics & Packaging,2015,15(8):1-8.

[5]Velez P, Munoz-enano J, Grenier K, et al. Splitring resonator(SRR) based microwave fluidic sensors for elec-trolyte concentration measurements[J].IEEE Sensors Jour-nal,2018,19(7):2562-2569.

[6]钟毅,江小帆,喻甜,等. 芯片三维互连技术及异质集成研究进展[J]. 电子与封装,2023,23 (3) : 030102.

Yi Zhong,Xiaofan Jiang,Tian Yu. Advances in Three-Dimension Interconnection Technology and Heterogeneous Integration of Chips[J]. Electronics & Packaging, 2023,23(3):030102.

[7]汤姝莉,赵国良,薛亚慧,袁海,杨宇军. 基于TSV倒装焊与芯片叠层的高密度组装及封装技术[J]. 电子与封装,2022,v.22;No.232(08):5-10.

Shuli Tang,Guoliang Zhao,Yahui Xue,Hai Yuan,Yujun Yang. High Density Assembly and Packaging Technology Based on Flip-Chip on TSV and Chip Stacking[J]. Electronics & Packaging, 2022,v.22;No.232(08):5-10.

[8]郭燕慧, 张国华, 王剑峰. 基于TGV的射频无源器件的三维集成[J]. 电子设计工程, 2019,18 (27) : 97-101.

Yanhui Guo,Guohua Zhang,Jianfeng Wang. 3D integration of RF passive components based on TGV[J]. Electronic Design Engineering,2019,18(27):97-101.

[9]Li Wenyin, Wu Xuezhong, Xiao Dingbang, et al.Characterization of signal transfer performance of a through glass via(TGV) substrate with silicon vertical feedthroughs[J]. Microelectronic Engineering 165(2016) 52-56.

[10]林来存, 王启东, 邱德龙, 等. 基于光敏玻璃的垂直互连通孔仿真与电镀工艺研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(1):52-57.

Lin Laicun, Wang Qidong, Qiu delong, et al. Formation and Metallization Process Study on High Aspect Ratio Through-Glass-Via(TGV)Within Photosensitive Glass[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(1): 52-57.

[11]张名川, 靖向萌, 王京, 等. 应用于TGV的ICP玻璃刻蚀工艺研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(11):1222-1227.

Zhang Mingchuan, Jing Xiangmeng, Wang Jing, et al. Formation of Through-Glass Via by Inductively Coupled Plasma Etching[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(11): 1222-1227.

[12]王文涛, 梁庭, 雷程, 等. 355nm全固态紫外激光加工玻璃通孔工艺[J]. 微纳电子技术, 2020,57(1): 59-65.

Wang Wentao, Liang Ting, Lei Cheng, et al. Glass Through Holes by 355 nm All-Solid-State Ultraviolet Laser Processing[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(1): 59-65.

[13]R. Ostholt, N. Ambrosius and R. A. Krüger, "High speed through glass via manufacturing technology for interposer," Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC), Helsinki, Finland, 2014, pp. 1-3.

[14]陈力, 杨晓锋, 于大全. 玻璃通孔技术研究进展[J]. 电子与封装, 2021,21 (4) : 040101.

CHEN Li, YANG Xiaofeng, YU Daquan. Development of Through Glass Via Technology[J]. Electronics & Packaging, 2021, 21(4): 040101.

[15]郭泳. 光敏玻璃紫外脉冲激光微加工理论与技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

Wu Yong. Research on the theory and technology of UV pulsed laser micromachining of photosensitive glass[D].

Tianjin: Tianjin University, 2009.

[16]张浩, 朱永昌, 崔竹, 等. 锂铝硅系光敏微晶玻璃的研究进展和应用[J]. 材料导报, 2018, 32(32): 80-84.

ZHANG Hao, ZHU Yongchang, CUI Zhu, et al. Research Progress and Applications of Photosensitive Glass-Ceramics of Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ System[J]. Materials Review, 2018, 32(32): 80-84.

[17]张锦文, 杨化冰, 蒋巍, 等. Pyrex7740玻璃通孔湿法腐蚀技术研究[J]. 功能材料与器件学报, 2011, 17(6): 596-599.

Zhang Jinwen, Yang Huabing, Jiang Wei, et al. Fabrication of Via-hole on Pyrex7740 Glass Wafer by HF Wet-etching Technique[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2011, 17(6): 596-599.

[18]Fang Z, Gao L, Chen H, et al. 3D Interdigital Electrodes Dielectric Capacitor Array for Energy Storage Based on Through Glass Vias[J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(8): 2101530.