基于氢氧催化键合的石英光学真空 腔体低温封装工艺研究

祝东方 林文豫 王宗林 王旭迪^{*} (合肥工业大学机械工程学院合肥 230009)

Low-Temperature Packaging Process of Quartz Optical Vacuum Cavities with Hydroxide-Catalysis Bonding

ZHU Dongfang, LIN Wenyu, WANG Zonglin, WANG Xudi^{*} (School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract This paper presents a low-temperature process for fabricating compact optical quartz vacuum cavities based on hydroxide-catalysis bonding technology. This study conducted pre-experiments to investigate the effects of bonding solution, curing temperature, setting time on the bonding of quartz glass, and optimized a set of optimal bonding schemes for the current experimental conditions. The study showed that the bonding strength of Na₂SiO₃ solution at both concentrations was generally higher than that of NaOH; 1:6 Na₂SiO₃ solution bonding with accelerated curing at 80 °C was able to achieve a tensile strength of not less than 12 MPa and shortened the curing time to 1 day. The setting time of Na₂SiO₃ solution bonding is shorter than NaOH solution, probably only 30 s but sufficient for some applications. A quartz optical vacuum cavity was designed and successfully fabricated according to this scheme, showing that the overall leakage rate was better than 5.66×10^{-12} Pa·m³·s⁻¹ and good thermal stability after thermal cycling tests. This study provides a feasible solution for the fabrication of a compact quartz glass optical vacuum cavity with low cost, simple process and excellent performance.

Keywords Optical vacuum cavity, Hydroxide-catalysis bonding, Quartz glass

摘要 文章提出了一种基于氢氧催化键合技术制作小型光学石英真空腔体的低温封装工艺。通过预实验探讨了键合溶 液、固化温度、稳定时间等因素对石英玻璃键合的影响,优选出一套当前实验条件下的最佳键合方案。研究表明,两种实验 浓度下的 Na₂SiO₃ 溶液键合强度普遍高于 NaOH; 1:6 的 Na₂SiO₃ 溶液键合在 80℃ 下加速固化能够实现不低于 12 MPa 的抗拉 强度,并将固化时间缩短至 1 天; Na₂SiO₃ 溶液键合的稳定时间比 NaOH 溶液更短,大概只有 30 s 但这也足够完成某些应用的 对准操作。基于优化方案设计并制作出一种双面通光石英光学真空腔体,测试表明其整体漏率优于 5.66×10⁻¹² Pa·m³·s⁻¹并且 热稳定性良好。本研究可以为小型化的石英光学真空腔体的制造提供了一种低成本、工艺简单且性能优越的可行方案。

关键词 光学真空腔体 氢氧催化键合 石英玻璃中图分类号: TN205 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202305019

随着量子技术的发展,原子钟、重力干涉仪、原 子陀螺仪等量子仪表都对光学真空系统提出了小 型化、集成化和高精度的迫切需求^[1],其中以光学玻 璃腔替代多窗口金属腔是一个非常有前景的研究 方向^[2-3]。石英玻璃因出色的透射性能以及热、化学 和机械稳定性成为许多高性能光学组件的首选材 料^[4-5],尤其在原子气室以及磁光阱(Magneto-optical trap, MOT)等小型通光腔体的应用上具有很大前景^[6-7]。全石英光学真空腔不仅结构小、热膨胀系数低、氦气渗透率低,还可有效避免金属腔体磁场涡流等效应引起的系统误差^[8]。

玻璃腔体的热稳定性、光学和真空性能往往与

其键合方法有关。Ivory 等¹⁹ 设计了一种产生超冷 87 Rb 和 39 K 原子气体的双室原子芯片装置,其 MOT 光腔采用光学接触键合 Pyrex 玻璃制成, 但光 学接触对玻璃材料表面要求极高,需要高精度的机 械对齐且键合强度较差; Brakhan 等^[10] 报道了一种 环氧胶粘合的超低双折射十二边形超高真空(Ultra-High-Vacuum, UHV)玻璃腔的性能, 虽然环氧胶粘 合对表面处理的要求不那么严格,但光诱导损伤、 脱气和对准的平均精度限制了其在超高真空下的 应用: Butts 等^[8] 采用石英框架熔接制成光腔用于短 询问时间光脉冲原子干涉测量,但高温熔接方式可 能损伤腔体光学表面且存在严重的对准和几何精 度问题; Mcgilligan 等^[11]采用阳极键合硅框架与玻 璃制成光栅磁光阱(A grating magneto-optical trap, GMOT) 腔来实现原子测量装置的小型化, 该键合方 法不仅对材料表面有严格要求还需要高温高电压 设备辅助,同时硅框架也限制了其侧面通光的可能。 氢氧催化键合 (Hydroxide-catalysis bonding, HCB) 技 术尽管在某些方面被这些技术所超越,但其强度、 放气率、热稳定性能提供良好的折衷性能,同时具 备高精度与及低成本的工艺优势^[12]。其在重力探测

器 B(Gravity Probe B, GP-B)太空望远镜、引力波探 测器、LISA 探路者光学工作台、光纤压力传感器以 及硅-蓝宝石法伯腔等^[13-17]光学设备键合方向也有 广泛应用。

本文以氢氧催化键合技术为基础,通过对石英 玻璃的氢氧催化键合的工艺参数进行系统性的研 究获得最佳工艺流程,并以此为基础设计和封装制 作出一种小型双面通光石英真空腔体结构,并验证 了腔体的密封性能和热稳定性。

1 实验

1.1 实验原理

氢氧催化键合是一种基于氢氧化物催化的水 化和脱水反应实现材料表面连接的键合技术^[18]。催 化剂将脱水过程的活化能 *E*_a降低到小于几个 *k*_B*T* (其中 *k*_B 是玻尔兹曼常数,*T* 是开尔文温度),使得水 化和脱水过程能够在室温下轻松发生,也是其能在 室温下形成键合的根本原因^[19]。以熔融石英为例, 其主体由硅氧烷桥 (Si-O-Si) 网络组成,键合本身是 通过水化蚀刻、聚合和脱水实现的,键合原理如 图1所示。



图1 石英玻璃的氢氧催化键合原理。(a)-(b)水化蚀刻过程,(c)解离过程,(d)-(e)聚合脱水过程

Fig. 1 Principle of hydroxide-catalysis bonding of quartz glass. (a) - (b) hydration etching process, (c) dissociation process, (d) - (e) polymerization dehydration process

水化蚀刻过程如图 1(a) 和 (b) 所示, 亲水表面 吸引 OH 离子填充 SiO₂表面上的开放键形成 Si-OH 基团, 然后额外的 OH 会蚀刻表面削弱表面层 和主体的原子之间的联系, 以Si(OH)₅络合物的形式 释放^[12,16],该过程反应方程如式(1)。

$$SiO_{2(s)} + OH_{(a_0)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow Si(OH)_{5(a_0)}$$
 (1)

如图 1(c) 所示, 蚀刻过程溶液中的 OH 不断消耗, 直到 pH 达 11, Si (OH)₅不再稳定解离成 Si(OH)₄

和OH,反应方程如式(2)。

 $Si(OH)^{-}_{5(aq)} \rightarrow Si(OH)_{4(aq)} + OH^{-}_{(aq)}$ (2)

当溶液中硅酸盐分子浓度达到 1% 左右,聚合 开始,如图 1(d)所示,溶液中的硅酸盐和表面的 Si-OH 结合在一起形成硅氧烷链,同时释放水,反应方 程如式(3)。

 $2Si(OH)_{4(aq)} \rightarrow (HO)_3 SiOSi(OH)_{3(s)} + H_2O_{(l)} \qquad (3)$

聚合产生的水从键合界面蒸发、迁移和扩散, 需要几周才能完全脱水,最终在两个表面之间建立 坚硬、致密的硅酸盐网络连接^[19],如图 1(e)所示。

键合的一般过程可以分为溶液配制、表面处理、 预键合及固化几个阶段。但化学试剂的使用为键 合过程增加了相当大的复杂性,因此在利用氢氧催 化键合 UHV 兼容的光学石英腔体之前必须重新系 统评估键合液浓度和类型、清洗活化工艺、固化方 式、稳定时间等因素对键合的影响,优选出适合腔 体键合封装的工艺参数。

1.2 材料与设备

实验选用 JGS1 远紫外光学石英玻璃,其在 170 nm~2100 nm 波段透射率>90%,可代替 Suprasil 1&2 和 Corning 7980。图 2显示了石英样品的尺寸要求 与键合组件示意图,键合表面抛光至全局平整度 $\lambda/10$ 左右使键合表面的面形匹配^[20]。





Fig. 2 Quartz sample: (a) shape and dimension, (b) bonding assembly

键合溶液选择 0.1 mol/L 的 NaOH标准溶液 (CAS:1310-73-2, Aladdin)和 Na₂SiO₃溶液 (338443-Sigma-Aldrich, NaOH~14%, SiO₂~27%),使用时根据 实际需要与去离子水按比例稀释。键合前溶液必 须经过离心处理和 0.22 µm 孔径医用过滤器进行过 滤以最大程度上去除溶液中的大颗粒,键合时通过 微量移液器取用。 良好的表面清洁对于促进高密度的 Si-OH 基 团反应生成 Si-O-Si 网络至关重要。实验全过程将 在洁净室中进行,采用 LIGO 的硅酸盐键合程序的 标准清洗方法^[21],经过去离子水、氧化铈糊擦拭、 NaHCO3 擦洗、乙醇擦拭等操作可以获得良好的表 面亲水性。清洗好的样品将 100 级洁净工作台中进 行键合,以避免在键合界面中包含空气悬浮颗粒; 加速固化在带鼓风的恒温干燥箱中进行;键合组件 用环氧胶粘合制成拉拔强度测试样件,通过拉力测 试仪进行测试。

1.3 石英样品键合实验

1.3.1 不同溶液的键合实验

氢氧根离子供体化合物的选择和其化学浓度 在一定程度上会影响成键的动力学和最终性质。 为了研究键合溶液种类与浓度对键合强度的影响, 采用了4组键合溶液: NaOH 溶液 (0.1 mol/L 和 0.05 mol/L)、Na₂SiO₃ 溶液 (与去离子水按 1:3 和 1:6 稀 释)进行键合。预键合的样品需要静置 24 h, 然后 转移至烘箱中 80℃ 恒温 24 h。固化后的键合样品 如图 3 所示, 通过拉力测试仪对各组样品的键合强 度进行表征。



图3 不同溶液键合样品。(a) NaOH 键合,(b) Na₂SiO₃ 键合 Fig. 3 Samples bonded with different solutions. (a) NaOH bonding, (b) Na₂SiO₃ bonding

1.3.2 低温烘烤固化实验

相关研究表明,室温下的氢氧催化键合实现完 全固化往往要放置 4 周以上,这对于实际的键合应 用来说时间成本太高^[20]。有研究表明通过烘烤、微 波加热及低压处理等方式可以加快键合界面水的 去除进而缩短固化时间,但这些方法的实际作用还 缺乏系统性的研究和可靠结论。本实验为研究低 烘烤温度对加速固化以及键合强度的影响,对 0.1 mol/L NaOH 和 1:6 Na₂SiO₃ 溶液键合的样品在室温 预键合 24 h 后,再分别在 60℃、80℃、100℃ 和 120℃ 下恒温固化 24 h 并通过拉力测试仪测得各组样品 的键合强度。

1.3.3 稳定时间测定实验

稳定时间是指样品在对准过程中从可以相互 移动到形成稳定的刚性连接的时间间隔。它是精 密组件对准的黄金时间,在这一时间点后,如果不 对样品表面造成某种程度的损害就很难打破结合。 因此,有必要评估键合工艺的稳定时间以确保光学 腔体的成功封装。为探究溶液种类和浓度对稳定 时间的影响,在室温下研究了 NaOH 溶液 (0.1 mol/L 和 0.05 mol/L)、Na₂SiO₃ 溶液 (与去离子水 1:3 和 1:6 稀释) 对稳定时间的影响。在施加键合溶液后, 记录两个石英样品在轻压对准过程中界面从可移 动到无法移动的时间以此作为稳定时间。此处"无 法移动"的一般标准为用镊子轻推键合对的上基板, 无法使其相对于下基板在水平面上发生位移。

2 键合实验结果及分析

2.1 键合溶液种类与浓度对键合强度的影响

如图 4 所示, 在键合强度测试过程中待测样件 (a) 存在两种断开形式: (b) 从键合界面断开和 (c) 从 环氧胶断开。(c) 中石英-石英键合界面完好, 表明 其键合强度大于环氧胶粘结强度, 这种情况多发生 在 Na₂SiO₃ 溶液键合的样品中。



- 图4 拉拔强度测试的两种断开形式。(a) 待测样品,(b) 从键 合界面断开,(c) 从环氧胶处断开
- Fig. 4 Two types of breaking for tensile strength testing.(a) Sample to be tested, (b) breaking from the bonding interface, (c) breaking from the epoxy adhesive

不同溶液的键合强度实验结果如图 5 示,图中 HCB 代表 NaOH, SIB 代表 Na₂SiO₃。从键合溶液类 型上看, Na₂SiO₃溶液的键合强度普遍高于 NaOH。 其主要原因是溶液本身包含的硅酸盐填充成分在 一定程度上能弥补材料表面的缺陷、提高键合界面 的硅酸盐网络密度,并且表面质量越差表现越 明显。



Fig. 5 Bonding strength relationships for different types and concentrations of bonding solutions

从键合溶液的浓度来看,两类键合溶液中呈现 出不同趋势: NaOH 溶液浓度的降低导致其平均键 合强度从 8 MPa 到 5 MPa 的显著下降,而 Na₂SiO₃ 溶液的浓度变化对键合强度的影响并不明显。这 种差异可能与键合界面硅酸盐网络的来源及密度 有关,较高浓度的 NaOH 溶液可以在键合界面蚀刻 出更多的硅酸盐分子,而 Na₂SiO₃ 溶液本身的硅酸 盐成分导致浓度变化对键合界面硅酸盐网络密度 的影响并不显著。观察从键合界面断开这组 1:3 Na₂SiO₃ 溶液键合的样品,其表面发生了不可修复的 破裂,这可能与石英玻璃本身的缺陷以及玻璃表面 层被蚀刻削弱有关。

2.2 烘烤温度对加速固化的影响

低温烘烤固化实验结果如图 6 所示,图中 HCB 代表 0.1 mol/L NaOH 溶液键合,SIB 代表 1:6 Na₂SiO₃ 溶液键合。结果表明,相同固化温度下的 Na₂SiO₃ 的键合强度始终高于 NaOH 溶液,与浓度 无关。在 60℃ 固化时两类溶液键合均表现出相对 低的强度,此时可能未完全固化;80℃ 及以上时,0.1 mol/L NaOH 能够实现 8 MPa 左右的键合强度,1:6 Na₂SiO₃ 键合强度普遍超过了环氧胶的粘结强度,即 不低于 12 MPa,初步认定为完全固化状态;但 NaOH 键合在 100℃ 和 120℃ 下固化的平均键合强 度略低于 80℃,但其误差还在同一范围内,这可能 与测试样本的键合质量不同或强度测试存在误差

从键合石英光学腔体的角度上考虑,80℃是一



图6 不同固化温度下两种键合溶液的键合强度关系 Fig. 6 Bonding strength relationship of two bonding solutions at different curing temperatures

个优选固化温度,在达到理想的键合强度情况下能 够将固化时间从室温下的4周减少到24h甚至更 短,而且其键合强度相比于室温固化在一定程度略 有提高。

2.3 稳定时间与键合溶液的关系

稳定时间测定实验结果如图 7 所示, Na₂SiO₃ 键 合的稳定时间要远小于 NaOH。因为 Na₂SiO₃ 溶液 本身含有的硅酸盐分子可以快速锚定在表面聚合 成键达到初步稳定, 而 NaOH 溶液需要更多时间来 蚀刻石英表面释放出硅酸盐分子, 只有当硅酸盐浓 度达到一定程度键合界面才能聚合, 这种差异在宏 观上表现为稳定时间的较大差距。





Fig. 7 Setting time statistics for different bonding solutions

另一个显著表现为:浓度对两类键合溶液的稳定时间影响也不同。较高浓度的 NaOH 溶液显示出更长的稳定时间,根据氢氧催化键合的基本原理可知,这是因为更高浓度的 OH 水化蚀刻石英表面的过程将会更长。但较高浓度的 Na₂SiO₃ 溶液稳定

时间并未有明显提高,二者稳定时间都在30s左右, 这可能其溶液本身含有大量硅酸盐成分有关。

3 石英光学真空腔的设计与封装测试

3.1 腔体的结构设计

如图 8 中所示,设计了一种双面通光的光学石 英腔体结构,石英玻璃上下表面作为光学窗口可以 实现同时入射多束激光,中间层为一个石英框架, 腔体上基板开设小孔并连接玻璃管实现抽气。腔 体材料均为 JGS1 光学石英玻璃,与前述实验的材 料相同,各组件需要通过氢氧催化键合连接,因而 每个键合端面都抛光至 λ/10 全局表面平整度以保 证成功键合。





组件实物如图 9 所示,上下基板的尺寸为 40 mm×40 mm×3.5 mm,石英框四周厚度为 3.5 mm 高 度为 10 mm,围成的内腔实际尺寸 33 mm×33 mm× 10 mm,上基板的边角位置开通一个直径 3 mm 抽气



- 图9 腔体组件。(a) 上基板,(b) 石英框,(c) 下基板,(d) 石 英管
- Fig. 9 The cavity assembly: (a) upper substrate, (b) quartz frame, (c) bottom substrate, (d) quartz tube

孔并连接到一个外径 10 mm 内径 5 mm 长度 75 mm 的石英管上。

3.2 腔体键合工艺参数

基于前期实验可以初步确定石英光学真空腔体的键合工艺。采用去离子水清洗、氧化铈糊擦拭、NaHCO₃ 糊清洗、无水乙醇擦拭和浸泡的清洗活化方案,在不损伤界面光学性能的前提下实现键合表面的清洁和亲水性要求;选用1:6 稀释的 Na₂SiO₃ 溶液可以获得 30 s 左右稳定时间,这对于石英腔体组件的键合对准操作来说是足够的;80℃恒温24 h 处理可将固化时间缩短至1天并能保证不低于12 MPa 的键合强度,优于一般光学接触2 MPa 以内的结合强度以及 MEMS 器件 4~5 MPa 的强度要求。

3.3 腔体的键合封装

基于氢氧催化键合技术的基本流程和确定的 工艺参数,针对上述的光学石英腔体设计方案制定 了图 10 所示的键合工艺流程。





在键合前需要对所有石英组件清洗活化,注意 氧化铈糊擦拭步骤是仅在实际键合区域附近进行 以避免损伤通光区域。为进一步提高键合界面亲 水性,可以在键合前半小时将其浸入无水甲醇溶液 中一段时间并用 N₂ 吹干。1:6 稀释的 Na₂SiO₃ 键合 溶液经过离心处理和 0.22 μm 孔径医用过滤器过滤 后备用。

考虑到腔体结构的复杂性, 微量移液器施加键 合溶液的方案存在两个问题: (1)溶液施加的时间先 后会造成不同步的蚀刻和固化; (2)无法在稳定时间 内完成对准操作。二者都会影响腔体键合的均匀 性和成功率, 因此改用浸涂方式可以更好地实现键 合液均匀涂布。键合全过程在洁净工作台中进行, 具体步骤如下: (a) 溶液匀涂: 将石英框单面浸润在盛有键合溶 液的玻璃皿中并用无尘布擦除四周多余溶液;

(b) 对准预键合: 将匀涂后的石英框在 30 s 内 快速对准并轻压在预置于亚克力辅助对准装置的 上基板上,形成预键合;

(c) 端面再清洗: 预键合的组件静置至少1h, 然后用无水乙醇重新擦拭石英框未键合端面并用 N₂ 吹干;

(d) 溶液匀涂: 重复操作 (a) 将石英框另一面均 匀涂布键合溶液;

(e) 对准预键合: 重复操作 (b) 将下基板与石英 框预键合,;

(f) 静置稳定: 预键合的光学腔主体在室温下静置 1 h 以上保证整体具有一定可操作强度;

(g) 烘烤加速固化: 在上基板中心处压置一个玻 璃方块 (不遮盖抽气孔) 保持一天以上, 再将其置于 烘箱中 80℃ 恒温烘烤 24 h 实现光学腔主体完全 固化;

(h)转接抽气管:重新清洗玻璃管端面和腔体抽 气口附近,重复上述工艺完成石英管与腔室主体的 连接。

键合的石英腔主体如图 11 所示,其中图 (a) 为 初步键合未经烘烤固化的腔体,已具备一定手持操 作强度并且界面表现出氢氧催化键合的薄且高度 透明的典型特征;图 (b) 为烘烤固化后的腔体,键合 界面仍保持透明状态但键合边沿红色箭头指向有 白色颗粒残留。有研究表明,除了已知的硅酸聚合 物的形成外,大气中 CO₂ 的相互作用可能涉及硅酸 盐粘结材料的固化并形成 NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 等化 合物 (白色),但这些物质通常不被认为对键合强度 有贡献^[23]。这个过程被称为碳化,反应方程式如式 (4) 所示。

Na₂SiO₃ + CO₂ + H₂O = H₂SiO₃ ↓ +Na₂CO₃ (4) 石英管与玻璃腔体的一般封接方法为高温熔



- 图11 石英腔主体。(a) 初步固化腔体, (b) 完全固化腔体
- Fig. 11 Quartz cavity body: (a) initial curing cavity, (b) fully cured cavity

接,但纯石英玻璃管极高的软化温度以及短时间高 难度的熔接对准是一个重大挑战,而且熔接高温对 光学腔体的光学性能或涂层也会有极大影响。因 而,步骤 h 中依然采用氢氧催化键合实现石英管与 主腔体连接,该键合的关键在于如何在稳定时间内 快速准确地完成石英管与气孔的对准。键合后的 带抽气管的光学石英腔体如图 12 所示。



图12 键合的带抽气管的光学石英腔体 Fig. 12 Bonded optical quartz cavity with pumping tube

3.4 腔体的密封性测试

对于 UHV 腔体而言,其真空密封性能关乎系 统的极限真空与真空维持。本实验对光学石英腔 体组件进行了漏率检测。氦质谱检漏仪 (PHOENIX Magno, Leybold)测试结果显示整体漏率优于 5.66×10⁻¹² Pa·m³·s⁻¹,表明键合的光学腔体真空密封 性能相当良好,可以满足某些 UHV 下的使用要求, 如重力干涉仪、陀螺仪、原子钟等小型量子仪器。 石英光学腔体一般需要烘烤才能达到理想真空度, 这个温度一般在 200℃ 以下,为验证腔体的热稳定 性,腔体以~2℃/min 烘烤至 200℃,保持 30 min 后自 然冷却到室温。热循环测试后整体漏率优于 6.67×10⁻¹² Pa·m³·s⁻¹,与未烘烤前的漏率相当,可以 推断在 200℃ 以下腔体的热稳定性良好。但在实际 使用过程中仍要避免较高温度的烘烤,防止高温处 理放大键合缺陷引起泄漏。

4 结论

本文从氢氧催化键合技术的原理和应用出发 提出了其在键合光学石英真空腔体上的可行性。 同时,通过实验系统研究了键合溶液的类型与浓度、 固化温度以及稳定时间等对石英玻璃氢氧催化键 合的影响,并从中优选出一套当前实验条件下最佳 的键合实验方案。在局部洁净环境达百级的实验 环境下,采用 LIGO 的硅酸盐键合程序的标准清洗 方法,选用 1:6 稀释的 Na₂SiO₃溶液替代 NaOH 溶 液在室温下完成石英玻璃的预键合,再经过 80℃ 烘 烤 24 h 完成最终固化。该方案能够提供 30 s 左右 稳定对准时间以及优于 12 MPa 的键合强度,将固 化时间从 4 周以上缩短至 1 天,能够满足实际应用 中封装光学腔体的精度和强度要求。

基于上述优化方案设计出一种小型双面通光 的石英真空腔结构,制定了一套腔体组件键合的工 艺流程并封装制作出一种 UHV 兼容的石英光学真 空腔。氦检测试表明,其整体漏率优于 5.66×10⁻¹² Pa·m³·s⁻¹且在 200℃ 内具有良好的热稳定性能。这 种工艺简单且低成本的低温键合工艺对于小型化、 高质量的玻璃光学真空腔体的制造具有重要参考 意义。

参考文献

- [1] Li X K, Cai Y Z, Zheng J P, et al. Research progress on the alkali metal atomic vapor cell[J]. Navigation and Control, 2020, 19(1): 125-132 (李新坤, 蔡玉珍, 郑建朋, 等. 碱金属原子气室研究进展[J]. 导航与控制, 2020, 19(1): 125-132(in chinese))
- Pahwa K. Magneto optical trapping of potassium-39 in a ring cavity[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2014
- [3] He R, Cui J M, Li R R, et al. An ion trap apparatus with high optical access in multiple directions[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(7): 073201
- [4] 王玉芬 刘连城. 石英玻璃[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [5] Kotz F, Quick A S, Risch P, et al. Two-photon polymerization of nanocomposites for the fabrication of transparent fused silica glass microstructures[J]. Advanced Materials, 2021, 33(9): 2006341
- Butts D L, Kinast J M, Timmons B P, et al. Light pulse atom interferometry at short interrogation times[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(3): 416-421
- [7] Imhof E, Stuhl B K, Kasch B, et al. Two-dimensional grating magneto-optical trap[J]. Physical Review A, 2017, 96(3): 033636
- [8] Butts D L G. Light pulse atom interferometry at short interrogation times for inertial navigation[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2012

- [9] Ivory M K, Ziltz A R, Fancher C T, et al. Atom chip apparatus for experiments with ultracold rubidium and potassium gases[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(4): 043102
- [10] Brakhane S, Alt W, Meschede D, et al. Note: ultra-low birefringence dodecagonal vacuum glass cell[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(12): 126108
- [11] Mcgilligan J P, Moore K R, Dellis A, et al. Laser cooling in a chip-scale platform[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(5): 054001
- [12] Gwo D H. Hydroxide-catalyzed bonding: US6548176[P]. 2003
- [13] Gwo D H. Two unique aspects of gravity probe-B startracking space telescope: (1) focal-plane roof-edge diffraction and (2) fused-quartz bonding for 2.5-Kelvin applications[C]//Proceedings of SPIE 3356, Space Telescopes and Instruments V, Kona: SPIE, 1998: 892-903
- [14] Robertson D I, Fitzsimons E D, Killow C J, et al. Construction and testing of the optical bench for LISA pathfinder[J]. Classical and Quantum Gravity, 2013, 30(8): 085006
- [15] Suzuki T, Tomaru T, Sato N, et al. Application of sapphire bonding for interferometric gravitational wave detector with cryogenic mirrors[J]. International Journal of Modern Physics A, 2005, 20(29): 7060–7062
- [16] Liu Y Y, Jing Z G, Li R, et al. Miniature fiber-optic tip pressure sensor assembled by hydroxide catalysis bonding technology[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 948–958
- [17] Ye Y X, Sun Y L, He L L, et al. Investigation on the ther-

mal property of a hydroxide catalysis bonded cryogenic cavity[J]. Classical and Quantum Gravity, 2021, 38(19): 195005

- [18] Li P, Zhang J K, Li J, et al. Low temperature bonding of quartz glass for vacuum chamber made of glass[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(3): 230-234 (李攀,张晋宽,李俊,等. 石英玻璃真空 腔的低温键合技术研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(3): 230-234(in chinese))
- [19] Gwo D H. Ultraprecision bonding for cryogenic fused-silica optics[C]//Proceedings of SPIE 3435, Cryogenic Optical Systems and Instruments VIII, San Diego: SPIE, 1998: 136-142
- [20] Elliffe E J, Bogenstahl J, Deshpande A, et al. Hydroxidecatalysis bonding for stable optical systems for space[J].
 Classical and Quantum Gravity, 2005, 22(10): S257–S267
- [21] Armandula H, van Veggel M. Silicate bonding procedure (hydroxide-catalysis bonding)[R]. Pasadena: LIGO Laboratory, 2010
- [22] Conzone S D, Davis M J. Low-temperature joining of Zerodur and SiO₂ for optical device manufacture[C]//Proceedings of SPIE 4452, Inorganic Optical Materials III, San Diego: SPIE, 2001: 107-114
- [23] Mackenzie K J D, Brown I W M, Ranchod P. Silicate bonding of inorganic materials: part II reactions at high temperatures[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(3): 769–775