

高分辨率微通道板制造技术

陈楠 乐务时 龙高群 姜盛军 缪坤治

(杭州千盟光电科技有限公司, 浙江 富阳 311400)

摘要 采用玻璃多纤维拉制(GMD)技术研制并批量生产了微小通道(孔径 $4\sim 5\ \mu\text{m}$)还原铅硅酸盐玻璃微通道板(MCP),空间分辨率达到 $95\ \text{lp/mm}$ 。优选皮-芯-实体边玻璃组合,解决了小通道实体边MCP制板过程中发生变形、破裂的难题;开发新的拉丝设备和技术以及细小直径单纤维的排棒、复式纤维的排屏工艺和相应的技术设备,保证单复丝拉制过程中纤维的尺寸误差不大于 0.5% ,解决了MCP增益的均匀性难题,实现了两步法拉丝制作孔径 $5\ \mu\text{m}$ 以下MCP的工艺方法。制作的MCP平均孔径 $5\ \mu\text{m}$,厚度为 $0.25\ \text{mm}$,增益大于 1×10^4 (900 V)。

关键词 微通道板;微小通道;多纤维拉制技术;玻璃;纤维

中图分类号 TN223.1

OCIS 220.4000 220.4610

文献标识码 A

Manufacture Technology of Microchannel Plate with High Resolution

Chen Nan Le Wushi Long Gaoqun Jiang Shengjun Miao Kunzhi

(Hangzhou Chairman Optoelectronics of S & T Co. Ltd., Fuyang, Zhejiang 311400, China)

Abstract The reducing lead silicate glass microchannel plate (MCP) with $4\sim 5\ \mu\text{m}$ channel is produced by the glass multifiber draw (GMD) technology, and its resolution is $95\ \text{lp/mm}$. The crack and twist of MCP during production can be avoided by optimizing the glass group of the skin, core and solid border. The dimensional error of fiber is within 0.5% during fiber-drawing by developing new fiber-drawing machines and techniques, arranging slender-diameter mono-fiber and multi-fiber stick. By these ways, the problem of gaining uniformity of MCP is solved. MCPs with less than $5\ \mu\text{m}$ channels were made by the method of two-step stick-drawing. The channel diameter of MCP is $5\ \mu\text{m}$, thickness is 0.25mm , and gain is 1×10^4 (900 V) on average.

Key words microchannel plate; small channel; glass multifiber draw; glass; fiber

1 引言

微通道板(MCP)是二代、超二代和三代微光夜视仪的核心器件。现代高技术条件下的全天候战争对夜视仪的性能要求越来越高^[1],相应地对MCP的性能要求也不断提高,总趋势是高增益、低噪声、长寿命、高分辨率^[2]。MCP的分辨率取决于通道的孔径和通道中心距,即分辨率 $N_f=1000/1.73D$, D 为通道中心距;通道越小,通道中心距越小,分辨率越高。20世纪80年代,国际上MCP的孔径为 $10\ \mu\text{m}$,夜视仪的分辨率一般为 $40\sim 50\ \text{lp/mm}$;90年代为 $8\ \mu\text{m}$,极限分辨率为 $50\sim 55\ \text{lp/mm}$;20世纪末MCP的孔径达到 $6\ \mu\text{m}$,极限分辨率达到 $60\sim 70\ \text{lp/mm}$;21世纪初先进国家的MCP已经能够做到 $4\sim 5\ \mu\text{m}$,夜视仪的分辨率已超过 $100\ \text{lp/mm}$,美国Burle实验室已制出孔径 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 的MCP^[3]。通道微小化带来的一个严重问题是MCP在生产和使用过程中极易变形和破裂,原因是根据MCP的长径比为 $40\sim 60$ 的要求,板的厚度受到严格限制;以 $4\ \mu\text{m}$ 为例,板的厚度只有 $0.2\ \text{mm}$ 左右,如此薄的MCP机械强度很低。另外,夜视仪的光学镜头和荧光屏的分辨率一般为 $100\ \text{lp/mm}$ 左右, $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 的MCP的分辨率已接近夜视仪的极限,由于孔径减小,板的厚度变薄,制作MCP的技术难度急剧增加,成品率大幅度降低,MCP的成本也就更高。因此,追求更小孔径MCP已无现实意义,现阶段生产孔径 $5\ \mu\text{m}$ 的MCP已成为一个国家制板水平的重要指标。

本文针对制作小通道MCP的关键技术,如玻璃材料、高精度小直径纤维的拉制和排棒、排屏工艺进行大量实验,优选出一套皮-芯-包边玻璃材料组合,找出一整套精确控制单、复丝尺寸的排板技术,制作相应的排棒、排屏的机械工装夹具,以及相关的切片、滚圆、倒边、研抛、酸蚀、高温还原和镀电极工艺,制成性能满足

收稿日期: 2009-05-25; 收到修改稿日期: 2009-07-14

作者简介: 陈楠(1979-),男,主要从事高性能微通道板开发及制造技术等方面的研究。E-mail: ledream@163.com

制管要求的小孔径 MCP。

2 关键技术

2.1 玻璃材料的选择

目前,世界各国制作 MCP 选用的基本材料仍然是玻璃,使用的仍然是“实心法”工艺玻璃多纤维拉制技术,即皮料玻璃管用于形成 MCP 的微通道阵列;芯料玻璃用于制板过程中与皮玻璃管匹配,拉制实芯的单、复丝纤维;实体边玻璃用来保护空心的皮玻璃阵列,以便制板处理和安全使用。皮料玻璃经还原后必须具备合适的体电阻、较高的增益和低噪声;芯料玻璃必须具备高的软化点和良好的酸溶性,便于形成形状规则均匀的通道;包边玻璃必须具备良好的物化性能和机械强度以更好地保护有效区^[4,5]。对于制作高分辨率微小通道微通道板来说,更强调的是这些材料之间的物理化学性能相辅相容、相互匹配性能以及低相互渗透性。

这种方法的关键是边丝材料采用一种材料,经过拉丝排板和热熔压后包边成为一个结构整体,这种结构增强了微通道板的强度,使得制作薄的高分辨率微通道板得以实现。

2.2 高精度单/复丝的拉丝控制技术

为了保证 MCP 孔径高度的均匀一致性,以保证 MCP 增益的均匀性^[5],要求制作 MCP 的单纤维的尺寸精度控制在 $\pm 0.2\%$ 范围之内,复式纤维控制在 $\pm 0.3\%$ 范围以内,因此研制了一套高精度的拉丝机组,炉温和丝径控制精度分别达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,并实现下料速度、拉丝速度、炉温控制和丝径测量的闭环控制,从而使单纤维的误差在 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 范围之内,复式纤维的控制精度在 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。

2.3 排棒、排屏工艺和装置

由于制板工艺实行两步拉丝,即一次单丝,一次复丝,制作 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的 MCP,单丝直径在 $0.3\sim 0.35\text{ mm}$ 之间,要将如此细的 $8000\sim 10000$ 根单纤维排列成正六边形的单纤维棒束,其中每根纤维不能有错位,六角形顶点的纤维位置必须精确,正六角形棒束结构应紧密,3个对边尺寸要完全一致,才能拉出尺寸精确、结构正确的复式纤维。复式纤维的对边尺寸在 $0.5\sim 0.6\text{ mm}$ 之间,要精确排屏也不容易。我们专门研制了一套操作简便,易于保证质量的排棒排屏装置和相应的操作工艺,达到了制作高质量小孔径 MCP 的要求。

3 实 验

选用表 1 组成的玻璃组合材料,采用传统的“实芯法”玻璃多纤维拉制技术制造孔径为 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的 MCP。其中, T_g 为转变温度, T_f 为软化温度, α 为膨胀系数。制造工艺可以归纳为(皮、芯和边丝料)玻璃选配-单丝拉制-排棒-复丝拉制-排屏-热压成型-冷加工-化学腐蚀-氢还原-镀膜-检验-电性能测试-包装。

表 1 微小通道微通道板玻璃组成及材料性能

Table 1 Composition and properties of glass for MCP with small channels

| Glass | Chemical composition | Mass fraction /% | $T_g / ^{\circ}\text{C}$ | $T_f / ^{\circ}\text{C}$ | $\alpha / 10^{-7}$ |
|--------------|--|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Clad glass | ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) | 47 | 495 | 595 | 85 |
| | ($\text{PbO} + \text{Bi}_2\text{O}_3$) | 35 | | | |
| | ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) | 10 | | | |
| | ($\text{CaO} + \text{BaO}$) | 8 | | | |
| Core glass | SiO_2 | 25 | 635 | 685 | 95 |
| | B_2O_3 | 16 | | | |
| | La_2O_3 | 15 | | | |
| | ($\text{CaO} + \text{BaO}$) | 44 | | | |
| Solid border | ($\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$) | 73 | 560 | 658 | 96 |
| | ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) | 15 | | | |
| | ($\text{CaO} + \text{BaO}$) | 12 | | | |

1) 单丝拉制: 皮料管/芯料棒匹配,间隙为 $0.2\sim 0.3\text{ mm}$,拉成单丝后,开口面积比约 $62\%\sim 65\%$ 。单丝拉制速度控制在 $15\sim 20\text{ m/min}$ 范围,直径为 $0.3509\text{ mm} \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$,长度为 450 mm ;单丝组成的正六边形棒每边有单丝 54 根,全棒束内共有 8587 根单丝,对边尺寸为 32.56 mm 。

2) 复丝拉制: 将有 8587 根直径为 0.3509 mm 的单丝排成的对边尺寸为 32.56 mm 的正六角形棒束拉制成对边尺寸为 $0.60 \text{ mm} \pm 1 \mu\text{m}$ 的正六角形的复丝纤维。拉丝炉为全封闭, 温度控制精度在 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 为了保证尺寸和结构的精确性, 炉温应尽量低, 但又不至于拉断, 我们利用张力计控制。

3) 包实体边纤维的拉制: 将包边玻璃制成正六角形棒直接拉成对边尺寸与芯-皮玻璃复丝相同, 即 $(0.60 \pm 0.001) \text{ mm}$ 。

4) 排屏: 将皮芯组合复式纤维和包边玻璃纤维截成长 70 mm 的小段, 然后按照一定的方法将其正确排列在特定的排屏模具中, 模具的对边尺寸为 30.2 mm, 排完后转入正六角形的不锈钢热压模具中进行压屏。

5) 冷加工及酸溶: MCP 坯板用双面磨抛机进行细磨和抛光, 用酸碱进行溶芯处理, 用去离子水漂洗后用无水乙醇脱水后真空干燥。

6) 还原处理: 还原温度为 $(430 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$, 还原时间 4~6 h, 严格控制温度和氢气流量, 还原炉控温精度在 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 还原完毕真空降温冷却, 体电阻控制在 $100 \sim 200 \text{ M}\Omega$ 。

7) 镀膜: 还原后的 MCP 板在真空镀膜机中进行双面镀膜, 入射面电极渗入深度 $0.5d$ (d 为通道直径), 出射面电极渗入深度约 $2.1d$, MCP 面电阻控制在 $80 \sim 100 \text{ }\Omega$ 。

8) 微通道板性能检测: 微通道板的厚度、外径和有效区直径由数字千分尺测量, 通道孔径及孔间距在浙江大学分析测试中心测得。微观组织结构由光学显微镜 (DM300C) 和扫描显微镜 (浙江大学分析测试中心) 测得, 电性能数据由微通道板综合电性能动态测试仪 (自制) 测得。

4 结果和讨论

选取两片有代表性的 MCP 进行测试分析。表 2 表明制造 MCP 的几何尺寸完全在控制范围内, 而且尺寸非常集中、均匀; 图 1 为数码相机拍摄的实体边小通道 MCP 实物外观形貌, 可见 MCP 的同心度很好。

表 2 小孔径 ($5 \mu\text{m}$) MCP 主要几何参数

Table 2 Main geometric parameters of MCP with small channels ($5 \mu\text{m}$)

| No. | Diameter /mm | Useful diameter /mm | Diameter channel / μm | Pitch / μm | Resolution / (lp/mm) | Thickness /mm |
|--------------|-----------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| M2550244-21 | 24.81 | 19.23 | 5.02 | 6.08 | 95.1 | 0.253 |
| M2550244-22 | 24.79 | 19.26 | 5.01 | 6.07 | 95.2 | 0.252 |
| Standard MCP | 24.8 ± 0.04 | >18.8 | 5.0 ± 0.5 | 6 ± 0.5 | 96 ± 9 | 0.25 ± 0.02 |

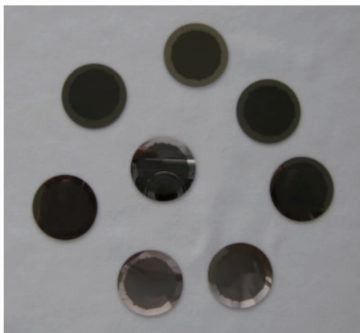


图 1 实体边小通道 MCP 外观形貌

Fig. 1 Appearance of MCP with small channels and solid border

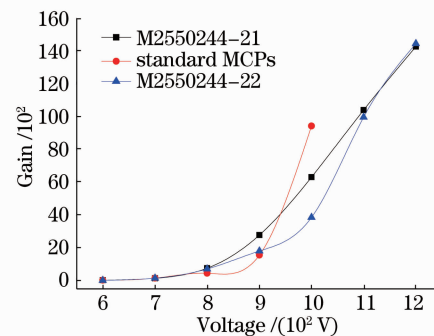


图 2 小孔径 ($5 \mu\text{m}$) MCP 增益和工作电压的关系

Fig. 2 Current gain of MCP with small channels as a function of working voltage

4.1 MCP 的电性能

从表 3 及图 2 看出, MCP 的起始增益的电压在 $650 \sim 700 \text{ V}$ 之间, 比常规 $8 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的 MCP 的起始电压高 $50 \sim 100 \text{ V}$, 主要原因是为了提高 MCP 的机械强度和防止还原时变形, 将 MCP 的长径比控制在 $50 \sim 55$ 之间, 板的厚度一般在 $0.25 \sim 0.27 \text{ mm}$ 之间, 而 $8 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的 MCP 的长径比选用 $45 \sim 50$ 之间, 所以起始电压较低。和光子公司标准微通道板相比, 开发的 MCP 低电压增益较高, 这样相同增益时电压降低, 本底噪声也降低, 影像质量提高。

表3 小孔径(5 μm)MCP 主要电性能参数

Table 3 Electric parameters of MCP with small channels (5 μm)

| No. | Body resistance (500 V)/MΩ | Gain | | | | | | |
|---------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | | 600 V | 700 V | 800 V | 900 V | 1000 V | 1100 V | 1200 V |
| M2550244-21 | 76 | 335 | 1500 | 7665 | 27835 | 63165 | 104165 | 142835 |
| M2550244-22 | 77 | 165 | 1515 | 7165 | 18165 | 38665 | 99835 | 144665 |
| Standard MCPs | — | 313 | 1563 | 4501 | 15625 | 94375 | — | — |

Note: Data of standard MCPs (standard 5 micron MCPs of photonics company) from web of Photonics Group Company

4.2 增益的均匀性

5 μm 孔径 MCP 的增益均匀性极佳,在 650~1200 V, 荧光屏上看不到板上有“鸡丝”等固定图案噪声,非常均匀;测量了大量的 MCP,基本没有亮斑、暗斑和暗点等瑕疵。图 3 为工作电压为 800 V 时的增益照片。MCP 的显微结构图如图 4,可以看出孔径十分均匀,肉眼无法看出误差,即使是复丝边界孔径的变形也极小,所以不容易出现六角形的复丝边界^[6]。



图 3 800 V 工作电压下小孔径实体边 MCP 的增益照片
Fig. 3 Gain photo of MCP with small channels at voltage of 800 V

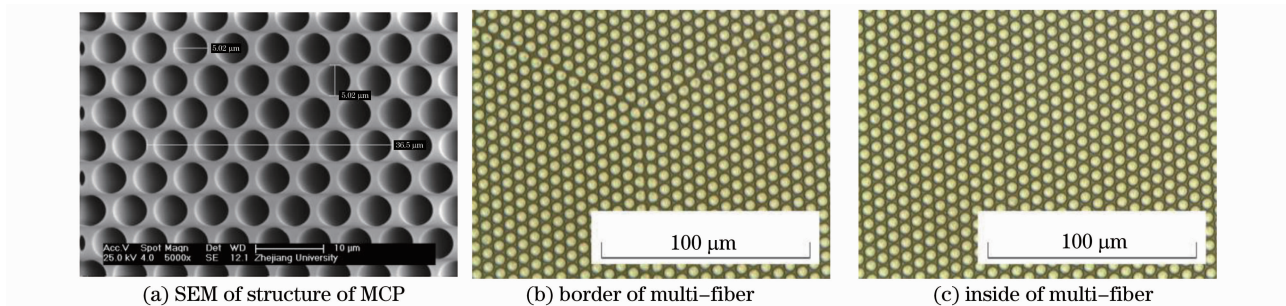


图 4 实体边小通道 MCP 结构

Fig. 4 Structure of MCP with small channels and solid border

4.3 噪声性能

实验测量了大量 MCP 后发现,其噪声水平较低。在 1000 V 时,其噪声水平一般在 1×10^{-12} A/cm² 以下,电压升高至 1100~1200 V 时,MCP 的电子增益超过 5×10^4 ,但噪声水平很少超过 5×10^{-12} A/cm²。说明所用玻璃材料以及冷加工酸腐蚀工艺水平很出色^[7,8],不但固定图案噪声、热噪声很弱,发射点也极少见,从而保证了 5 μm MCP 的优质性能和较高的成品率。

4.4 MCP 的变形

保证厚度在 0.25 mm 左右的 MCP 在还原和真空烘烤时不变形是制作孔径 5 μm 以下 MCP 成败的关键。在实验过程中,较常发生的情况是坏板在热压后炸裂,MCP 板在还原后发生变形甚至开裂,有些板在还原后不变形而镀膜后变形,或是成品板在真空烘烤时发生变形。为此我们做了大量实验,不断调整配方和制板工艺。

在设计玻璃成分时,为了保证坏板不炸裂,必须保证 MCP 中玻璃受到压应力,否则,一旦玻璃受到张应力,且张应力超过玻璃的强度时,玻璃就会炸裂^[9]。由于玻璃是脆性材料,其抗张强度只是抗压强度的几分之一,因此,设计玻璃成分时,除提高玻璃的抗张强度外,主要考虑不让玻璃受张应力。所以,设计的芯玻璃综合线膨胀系数应略小或基本等于皮玻璃的膨胀系数,这样压屏后的 MCP 坏板就不会炸裂,也能顺利通过切片、滚圆、倒角和双面研抛等一系列冷加工而不破碎。

1) 全面综合平衡皮、芯、实体边 3 种玻璃的温度-粘度、温度-热膨胀系数曲线,使三者处于比较匹配、和谐的状态,这是成功的关键;

2) 在此基础上,尽量提高实体边玻璃的机械强度、硬度以及和皮玻璃的亲合力和粘合力;

3) 在切片、研磨、抛光等冷加工过程中,保证板的平行度、平面度和消除有效面积和实体边的偏心度,从而消除了因板各处厚薄不均或不对称而造成的额外应力;

4) 在镀电极时,尽量使两端面的膜层厚度均匀一致,以消除因两端面膜层厚度不同带来的额外应力;

5) 找出最佳的酸溶和还原工艺,以保证超薄小孔径 MCP 不致发生变形和破裂。

5 结 论

通过优化材料配方和相互匹配性能,解决了制造小孔径超薄微通道板生产和使用过程中的变形和破裂问题。通过设计新的拉丝和排棒排屏压屏工具,优化制造工艺,解决了固定图案噪声问题,图像的均匀性很好,实现了规模生产,满足了市场需要。

参 考 文 献

- 1 Wang Li, Shang Xiaoxing, Wang Ying. Development of low-light level night vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3): 56~60
王 丽,尚晓星,王 瑛. 微光夜视仪的发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(3): 56~60
- 2 Liu Shulin, Li Xiang, Deng Guangxu *et al.*. Development of low-noise, high-gain microchannel[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(4): 22~25
刘术林,刘 翔,邓广绪等. 低噪声、高增益微通道板的研究[J]. 应用光学, 2005, **26**(4): 22~25
- 3 B. A. Lincoln. Product development update: 2- μ m pore MCPs[C]. *SPIE*, 2000, **4128**: 1~4
- 4 Miao Kunzhi, Zhan Zhuoqun. The development of glass for MCP[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2000, (6): 14~17
缪坤治,詹卓群. 微通道板用玻璃的发展[J]. 中国建材科技, 2000, (6): 14~17
- 5 Miao Kunzhi, Liu Yunde, Ning Jin. Development of Gen. III MCP[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 1999, (6): 33~38
缪坤治,刘云德,宁 进. 三代微通道板研制[J]. 中国建材科技, 1999, (6): 33~38
- 6 Liu Hui, Huang Ying, Wang Shanli *et al.*. Study cause of formation on the fixed pattern noise of the MCP[J]. *Architectural Glass and Functional Glass*, 2005, (6): 30~33
刘 辉,黄 英,王善立等. 微通道板固定图案噪声成因探索[J]. 建筑玻璃与工业玻璃, 2005, (6): 30~33
- 7 Sun Zhongwen, Huang Yonggang, Jia Jinsheng *et al.*. Effect of acid etching on electrical performances of microchannel plate [J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, **29**(2): 161~165
孙忠文,黄永刚,贾金升等. 酸蚀对微通道板电性能的影响[J]. 应用光学, 2008, **29**(2): 161~165
- 8 N. R. Rajopadhye, S. V. Bhoraskar. Electron emission properties of Pb and Bi containing glasses[J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 1988, **105**: 179~184
- 9 Inokuti Masahiko, Takeo Sugawara, Matsuura Keili *et al.*. Microchannel plate[P]. China: 01813092.X, 2003-09-24
井日昌彦,管原武雄,松浦惠树等. 微通道板[P]. 中国: 01812092.X, 2003-09-24