

文章编号 1004-924X(2014)08-2096-07

基于二氧化硅溅射的 PMMA 和 PDMS 亲水改性

叶雄鹰*, 李子尚, 冯金扬, 马增帅

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了提高以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)为材料的微流体通道的浸润性, 通过溅射 SiO₂ 对 PMMA 和 PDMS 进行了表面亲水改性处理。首先, 对 PMMA 和 PDMS 进行氧等离子刻蚀, 改变其表面形貌; 然后, 溅射 SiO₂ 进行表面亲水改性处理, 由不同溅射时间得到不同厚度的 SiO₂ 薄膜。在亲水处理后一段时间之内对 PMMA 和 PDMS 表面分别进行接触角测量, 评价不同条件下的改性效果, 并对改性后的样片进行黏接性测试。结果表明: 氧等离子刻蚀后, 溅射时间 10 min 以上的 PMMA 表面可在 10 天内保持极亲水的状态; 溅射时间 15 min 后的 PMMA 在 35 天之内接触角不超过 10°; PDMS 的亲水性可保持 10 天, 接触角不超过 60°; 高温老化处理能延缓 PDMS 表面疏水性的恢复。实验结果显示: 氧等离子刻蚀之后, 溅射 SiO₂ 的方法可使 PMMA 和 PDMS 获得较长时间的表面亲水改性效果。另外, 亲水改性处理后的 PDMS 之间仍可实现有效黏接, 改性 PMMA 与未改性 PDMS 也能有效黏接。

关键词: 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA); 聚二甲基硅氧烷(PDMS); 亲水改性; 溅射; 二氧化硅; 等离子刻蚀

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20142208. 2096

Hydrophilic modification of PMMA and PDMS based on silicon dioxide sputtering

YE Xiong-ying*, LI Zi-shang, FENG Jin-yang, MA Zeng-shuai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: xyue@mail. tsinghua. edu. cn

Abstract: To improve the wettability of micro channels made of Polymethyl Methacrylate (PMMA) and Polydimethylsiloxane (PDMS), the wettability of PMMA and PDMS surfaces was modified through sputtering silicon dioxide. Firstly, the surfaces of PMMA and PDMS were etched with an oxygen plasma to change their surface morphologies and enhance the roughnesses. Then, a thin layer of silicon dioxide was sputtered on their surfaces for hydrophilic modification and the silicon dioxide layers with different thicknesses were obtained by different sputtering time. The contact angles of the PMMA and PDMS surfaces were measured within a period of time after the hydrophilic treatment, and the effects of hydrophilic modification under different conditions were evaluated. Finally the adhesivity of the modified samples was tested too. The experimental results show that the surface of PMMA after oxygen plasma etching remains extremely hydrophilicity during 10 days via 10 min dioxide

收稿日期: 2014-01-27; 修订日期: 2014-02-27.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2013YQ19046701)

sputtering, and the contact angle remains lower than 10° in 35 days with 15 min sputtering. The modified PDMS remains hydrophilicity and the contact angle lower than 60° for 10 days. The aging treatment delays the recovering of the hydrophobicity of PDMS. By silicon dioxide sputtering, the PMMA and PDMS after oxygen plasma etching achieves longer hydrophilic modification efficiency. Moreover, after hydrophilic modification, both modified PMMAs, or pristine PDMS and modified PDMS could be bonded effectively.

Key words: Polymethyl Methacrylate(PMMA); Polydimethylsiloxane(PDMS); hydrophilic modification; sputtering; silicon dioxide; plasma etching

1 引言

在微流控芯片制作中,聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)是两种常用材料^[1-3]。由于这两种材料是疏水的,液体进入通道比较困难,且容易在微流体通道内残存气泡。为了提高微流体通道的浸润性,降低气泡残存,需对其表面进行亲水处理^[4]。现有的亲水改性方法包括等离子体处理^[5-8]、紫外线照射^[9]、化学蒸汽沉积^[10-13]、亲水材料涂层^[14-16]等。然而,大多数方法只能让PMMA和PDMS表面获得较短时间的亲水性,使得将这两种材料应用于微流控芯片受到限制。因此,研究长效的亲水改性方法是十分必要的。

本文通过溅射 SiO_2 对PMMA和PDMS表面进行亲水改性处理。首先利用氧等离子刻蚀方法改变两种材料的表面形貌,然后通过溅射使得材料表面附着一层 SiO_2 ,利用 SiO_2 的亲水性对其进行表面改性。最后,在不同条件下对PMMA和PDMS的表面改性效果进行评价,并且通过不同条件下PMMA和PDMS溅射前后的电镜照片比较其表面形貌。PMMA与PDMS、PDMS与PDMS之间可通过氧等离子处理的方法进行永久性黏接^[17],构成微流体通道。为了检测亲水处理后的PMMA与PDMS的黏接性,使用同样的方法对两种样片分别进行黏接性测试。实验结果表明该方法效果良好,能够获得保持较长的亲水改性效果,并且能够实现有效黏接。

2 实验方法

2.1 基片准备

通过数控铣后打磨的方法在PMMA基片上

加工出深 $200\ \mu\text{m}$ 、宽 $4\ \text{mm}$ 的沟槽,用异丙醇对其进行超声清洗,吹干去除残留的异丙醇。沟道外打磨经过抛光,较沟道内更为光滑。

PDMS薄膜以PI(聚酰亚胺)膜为基片,经过旋涂固化($10:1, 100^\circ\text{C}, 3\ \text{h}$)得到,厚约 $150\ \mu\text{m}$ 。PDMS是交联聚合物,由于一些没有交联的低分子(LMW)迁移到PDMS薄膜表面,使亲水处理后的PDMS恢复疏水性。有研究表明,通过长时间高温老化使PDMS充分交联消除低分子,可以获得较长时间的亲水性^[18]。本实验也尝试了在改性处理前对部分PDMS进行高温退化($180^\circ\text{C}, 5\ \text{h}$)。

2.2 氧等离子刻蚀

使用JR-2B型溅射-刻蚀机对PMMA和PDMS样片进行氧等离子处理($\text{O}_2\ 40\ \text{mL}/\text{min}, 20\ \text{Pa}, 200\ \text{W}$),以增加其表面粗糙度,改变其表面形貌,提高 SiO_2 在其表面的黏附性。

2.3 SiO_2 溅射

使用JR-2B型溅射-刻蚀机对两种样片溅射 SiO_2 ($\text{Ar}\ 100\ \text{mL}/\text{min}, \text{RF}\ 100\ \text{W}, 0.6\ \text{Pa}$),溅射速率为 $4.8\ \text{nm}/\text{min}$,溅射不同时间得到不同厚度的 SiO_2 薄膜。

2.4 接触角测量

使用微量移液器将 $2\ \mu\text{l}$ 去离子水滴在样片表面,利用自制的接触角测量系统测量接触角,每个样片测量3次取平均值。为了得到在亲水处理之后样片的亲水性随时间的变化情况,每隔一段时间进行一次接触角的测量。

2.5 电镜观察

利用扫描电子显微镜(Tescan Mira 3LMH)进行样片的表面形貌观察,观测前先对样品进行溅铂处理。PMMA样片对温度敏感,普通电镜模式下容易产生热变形,因此使用减速模式进行观察,电压为 $1\ 000\sim 3\ 000\ \text{V}$;PDMS使用普通模式观察。

2.6 黏接性测试

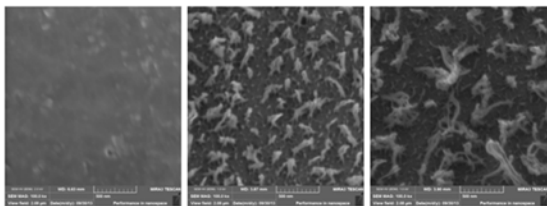
将刻蚀 5 min、溅射 10 min 亲水处理后的 PMMA 样片以及刻蚀 5 min、溅射 5 min 亲水处理后的 PDMS 薄膜使用等离子清洗机进行氧等离子处理(O_2 50 mL/min, 40 Pa, 120 W) 2 min, 然后将其浸泡在 5% 3-APTES 溶液中 80℃ 水浴 20 min, 在空气中晾干。将上述处理的样片同时进行氧等离子处理(O_2 50 mL/min, 40 Pa, 120 W) 40 s。将 PMMA 与 PDMS、PDMS 与 PDMS 的处理面分别黏接在一起。然后从边沿揭撕 PDMS 薄膜, 检验其黏接性。

3 结果和讨论

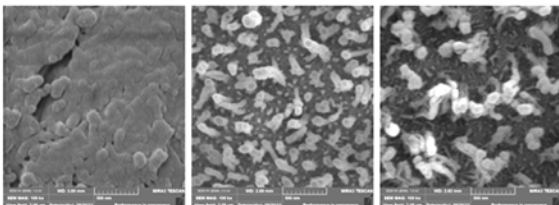
3.1 PMMA 亲水处理结果

3.1.1 氧等离子刻蚀对 PMMA 亲水处理的影响

氧等离子刻蚀会明显改变 PMMA 的表面形貌^[19], 为了研究表面形貌对表面改性的影响, 对 PMMA 的抛光面进行不同时间的刻蚀, 其表面形貌如图 1 所示。氧等离子刻蚀 5 min 后, PMMA 表面形成很多条状纳米结构, 相邻较长的条状结构会相互黏附在一起。氧等离子刻蚀 8 min 后, PMMA 表面的条状结构长度更大, 如图 1(c) 所示, 平均长度约 500 nm, 更多的相邻条状物会黏附在一起形成更大的结构。



(a) 未经处理 (b) 刻蚀 5 min (c) 刻蚀 8 min
(a) Pristine (b) Etching for 5 min (c) Etching for 8 min



(d) 无刻蚀 (e) 刻蚀 5 min (f) 刻蚀 8 min
(d) Non-etching (e) Etching for 5 min (f) Etching for 8 min

图 1 不同处理的 PMMA 表面电镜照片

Fig. 1 SEM images of PMMA surfaces after different etching time

不同的氧等离子刻蚀时间所产生的 PMMA 表面形貌的不同, 会影响溅射的 SiO_2 在 PMMA 表面的附着情况。对未经氧等离子刻蚀的 PMMA 表面溅射 10 min, SiO_2 会在 PMMA 表面形成一层不均匀的薄膜, 如图 1(d) 所示, 此时, 接触角为 7° 。经过氧等离子刻蚀之后, SiO_2 更多的附着在 PMMA 表面的条状结构上, 如图 1(e)、(f) 所示。相对于未经刻蚀的 PMMA, 条状结构会增加其溅射后的表面粗糙度, 此时, 其表面接触角接近 0° 。图 2 所示为不同刻蚀时间条件下的 PMMA 亲水改性结果及其经时变化。对于只做氧等离子刻蚀, 氧等离子刻蚀的时间越长, 刻蚀之后的亲水性越好, 但 4 d 以后, 基本恢复到一致。而对于刻蚀后溅射 SiO_2 , 刻蚀 5 min 和 8 min 对溅射后的接触角基本没有影响, 都接近 0° , 且能够保持 10 d。对于没有刻蚀直接溅射 SiO_2 的表面, 其接触角在 10° 附近, 7 d 内逐渐变大, 但变化不明显。因刻蚀 5 min 和 8 min 对溅射处理的接触角无明显影响, 后续实验采用 5 min 刻蚀。

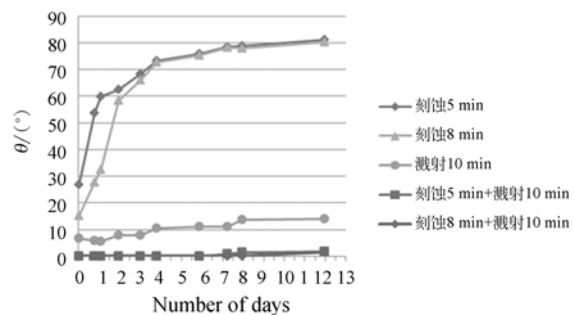


图 2 不同刻蚀时间 PMMA 的亲水改性结果及经时变化

Fig. 2 Ongoing changes of contact angles of modified PMMA at different etch time

3.1.2 溅射 SiO_2 亲水改性处理结果

图 3 所示为不同溅射时间改性的沟道内外 PMMA 表面接触角及其经时变化, 这里, 氧等离子体刻蚀时间为 5 min。溅射的时间越长, SiO_2 薄膜的厚度越大, PMMA 基片表面的接触角越小。氧等离子刻蚀可以使 PMMA 的接触角小于 60° , 但是在空气中放置 3 d 后, 沟道内、外普遍恢复疏水性, 接触角大于 70° 。在刻蚀之后经过溅射 SiO_2 , 不仅可使 PMMA 的表面接触角在处理短时间内接近 0° , 而且在 5 d 内均可保持非常

亲水的状态,接触角小于 10° 。在表面处理后的 2 周之内,溅射 10 min 以下 SiO_2 的 PMMA 的接触角会逐渐增大,但仍小于 60° ,保持亲水性,2 周之后接触角几乎保持不变,其亲水性至少可以保持 30 d。而且,溅射时间为 15 min 的 PMMA 表面 (SiO_2 薄膜厚度约为 72 nm),可以长时间保持良好的亲水性,其接触角小于 10° 。另外,沟道内外接触角无明显差异。图 3 溅射 10 min 的样片比图 2 同样处理的样片的接触角在 7 d 后有较大变化的主要原因可能是所使用的溅射设备溅射速率的不均匀造成的。

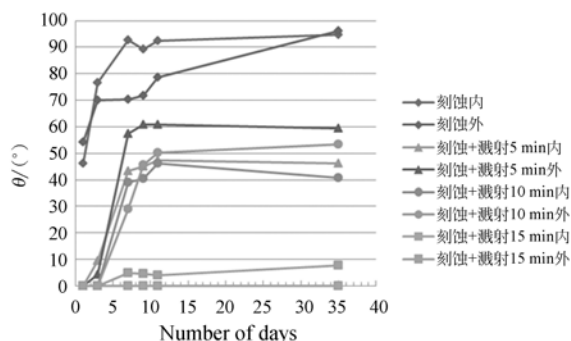
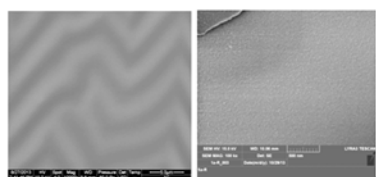


图 3 PMMA 亲水处理后的接触角及其经时变化

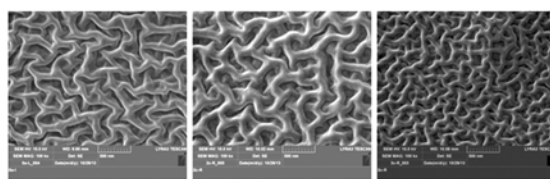
Fig. 3 Ongoing changes of contact angles of modified PMMA

3.2 PMDS 亲水处理结果

刻蚀引起的表面形貌变化可增加薄膜的表面粗糙度,获得更好的亲水性^[20]。如图 4(a)所示,在 10 k 倍电镜下,未经处理的 PDMS 薄膜只能看到由于应力引起的较大的规则皱纹,将其放大到高倍后观察不到结构;只溅射 SiO_2 ,除 SiO_2 颗粒外并无明显的结构,如图 4(b)。经过 5 min 的氧等离子处理之后,薄膜表面形成不规则的条纹纳米结构,溅射使条纹变粗,如图 4(c)、(d)所示。如图 4(e)所示,高温老化使得刻蚀形成的纳米结构变细小。



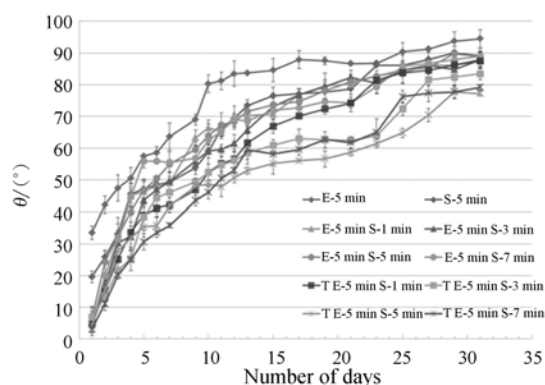
(a) 未处理 (b) 只溅射
(a) Pristine PDMS (b) Only sputtering



(c) 只刻蚀 (d) 刻蚀溅射 (e) 老化刻蚀溅射
(c) Only etching (d) Etching and sputtering (e) Aging, etching and sputtering

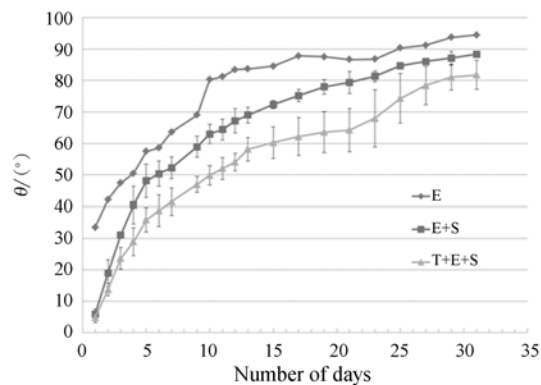
图 4 不同条件亲水改性的 PDMS 电镜照片

Fig. 4 SEM images of the surfaces of PDMS after different treatment



(a) 原始数据

(a) Original data



(b) 同一处理方法的平均

(b) Averages of same treatments

图 5 PDMS 亲水改性结果及其经时变化

Fig. 5 Ongoing changes of contact angles of modified PDMS

图 5(a)为亲水处理后 PDMS 接触角的经时变化,图中“E”代表“刻蚀”,“S”代表“溅射”,“T”代表“高温退化”。只经过氧等离子刻蚀而未溅射的 PDMS 薄膜,在密闭空气中放置约 4 d 后,其接触角超过 50° ;14 d 后,接触角接近 90° ,薄膜恢复

疏水性。经过溅射 SiO_2 之后,在 PDMS 表面形成一层亲水的 SiO_2 薄膜,可获得较长时间的亲水改性效果。溅射后的 PDMS 薄膜疏水性恢复缓慢,10 d 内的接触角均小于 60° 。因此,溅射 SiO_2 可明显延长亲水改性的保持时间。

此外,只经过溅射的 PDMS 薄膜,处理后接触角约为 20° ,而在刻蚀的基础上溅射的 PDMS 薄膜处理后接触角均小于 10° ;但 4 d 后,二者的接触角接近。因此,氧等离子刻蚀在短时间内进一步改善了溅射 SiO_2 的亲水改性效果,但对于亲水改性的长效性其效果不明显。其他条件相同,不同溅射时间的 PDMS 薄膜亲水改性的效果没有明显区别,在改性后的不同时段内,没有明显的接触角随刻蚀时间增大而减小的规律。经过高温老化后的 PDMS 薄膜在改性后的疏水性恢复普遍比未经高温老化的 PDMS 薄膜更加缓慢。将其他处理条件相同,不同溅射时间的 PDMS 亲水改性效果分别取平均,如图 5(b)所示,在亲水改性后 30 d 内,高温老化延缓了 PDMS 表面疏水性的恢复,相较于未经高温处理的 PDMS 薄膜,接触角小 10° 左右。

3.3 亲水处理后的黏接性

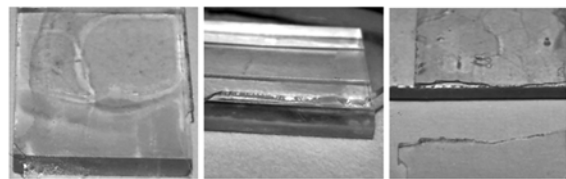
3.3.1 揭膜操作对 PDMS 亲水改性的影响

制作微流道时,一般需把 PDMS 膜从基片

上揭下,表 1 所示为改性后的 PDMS 薄膜揭膜前后的接触角,揭膜后 PDMS 接触角均超过 90° 。揭膜操作会使处理后的 PDMS 表面产生裂纹(图 6),破坏 PDMS 表面的 SiO_2 层,使疏水的 PDMS 暴露于表面,PDMS 表面恢复疏水。

3.3.2 黏接性

为了检验溅射 SiO_2 是否会影响黏接性,对亲水处理后的样片进行黏接破坏实验。如图 7(a)所示,改性 PMMA 与改性 PDMS 进行黏接的样片,右上位置有部分区域黏接上,其余位置均未能实现黏接,亲水改性后的 PMMA 与改性 PDMS 不能通过等离子刻蚀的方法实现有效黏接;图 7(b)为改性 PMMA 与未改性 PDMS 进行黏接的样片,图 7(c)为改性 PDMS 与改性 PDMS 黏接的样片,边沿处的 PDMS 薄膜被拉断,黏接部分均未被撕开。因此,通过氧等离子刻蚀的方法对改性 PDMS 与改性 PDMS 及改性 PMMA 与未改性 PDMS 进行黏接,其黏接强度大于 PDMS 薄膜自身的强度,可满足微流体通道的黏接要求。



(a) PMMA-PDMS (b) PMMA-未改 PDMS (c) PDMS-PDMS
(a) PMMA-PDMS (b) PMMA-Pristine PDMS (c) PDMS-PDMS PDMS

图 7 改性后的黏接样片

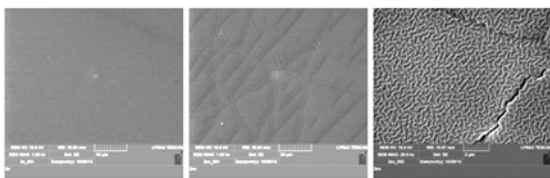
Fig. 7 Bondings of modified PMMA and PDMS

表 1 揭膜前后的 PDMS 接触角

Tab. 1 Contact angles of peeled PDMS

编号	刻蚀时间 /min	溅射时间 /min	接触角 / $^\circ$	揭膜后接触角/ $^\circ$
0*	/	/	110.7	/
1	5	/	30.4	98.5
2	0	5	17.4	91.1
3	5	5	5.3	94.6
4*	5	5	2.3	94.4

*注:0号未做任何处理,为原始基片;4号经过高温老化



(a) 未揭膜 (b) 溅射后揭膜 (c) 溅射后揭膜(高倍)
(a) Unpeeled off (b) Peeled off (c) Peeled off (10 k \times)

图 6 溅射 5 min 的 PDMS 电镜照片

Fig. 6 SEM images of PDMS surfaces with 5 mins sputtering

4 结 论

本文提出了通过溅射 SiO_2 对 PMMA 和 PDMS 进行表面亲水改性的方法。在溅射前对 PMMA 和 PDMS 进行氧等离子处理,可增加表面粗糙度,改变 SiO_2 在 PMMA 和 PDMS 表面的附着状态,改善亲水改性效果。刻蚀后溅射 SiO_2 可获得表面亲水性保持超过 1 个月的 PMMA, PDMS 亲水性保持 10 d,接触角 $< 60^\circ$,溅射 SiO_2 明显延长了只通过氧等离子刻蚀的方法对两种材料改性的亲水性保持时间。氧等离子刻蚀后溅射

15 min SiO₂ 的 PMMA 表面接触角在 1 个月内仍保持小于 10°。高温老化延缓了 PDMS 表面疏水性的恢复,相较于未经高温处理的 PDMS 薄膜,1 个月后的接触角小 10°左右。亲水改性处理不会

影响到 PDMS 与 PDMS 的黏接,黏接性可满足微流体通道的强度要求。亲水改性后的 PMMA 与改性 PDMS 不能通过等离子刻蚀的方法实现有效黏接,但与未改性 PDMS 可以实现有效黏接。

参考文献:

- [1] 于海霞, 栗大超, 刘同坤, 等. 基于微流体技术的组织液透皮抽取装置[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 651-656.
YU H X, LI D C, LIU T K, *et al.*. Interstitial fluid transdermal extraction tool based on microfluidics technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 651-656. (in Chinese)
- [2] 杨璐霞, 郝晓剑, 王春水, 等. 具有三维聚焦功能的微流控芯片[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2309-2316.
YANG L X, HAO X J, WANG CH SH, *et al.*. Three-dimensional focusing microfluidic chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2309-2316. (in Chinese)
- [3] 徐征, 王继章, 杨铎, 等. 辅助溶剂对 PMMA 微流控芯片模内键合的影响[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 321-328.
XU ZH, WANG J ZH, YANG D, *et al.*. Effect of assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 321-328. (in Chinese)
- [4] SHINOHARA H, HORI T, UMEDA S, *et al.*. Integrated hydrophilic surface treatment system of vapor deposition polymerization and vacuum ultraviolet irradiation for chemical/biochemical microchips [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(8): 2751-2754.
- [5] LAI J, SUNDERLAND B, XUE J, *et al.*. Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(10): 3375-3379.
- [6] VESEL A, MOZETIC M. Surface modification and ageing of PMMA polymer by oxygen plasma treatment [J]. *Vacuum*, 2012, 86(6): 634-637.
- [7] TAN S H, NGUYEN N T, CHUA Y C, *et al.*. Oxygen plasma treatment for reducing hydrophobicity of a sealed polydimethylsiloxane microchannel [J]. *Biomicrofluidics*, 2010, 4: 032204.
- [8] PRIEST C, GRUNER P J, SZILI E J, *et al.*. Microplasma patterning of bonded microchannels using high-precision "injected" electrodes [J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(3): 541-544.
- [9] SHINOHARA H, MIZUNO J, SHOJI S. Studies on low-temperature direct bonding of VUV, VUV/O₃ and O₂ plasma pretreated cyclo-olefin polymer [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(1): 124-131.
- [10] BAUER W A C, FISCHLECHNER M, ABELL C, *et al.*. Hydrophilic PDMS microchannels for high-throughput formation of oil-in-water microdroplets and water-in-oil-in-water double emulsions [J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(14): 1814-1819.
- [11] LEE D, YANG S. Surface modification of PDMS by atmospheric-pressure plasma-enhanced chemical vapor deposition and analysis of long-lasting surface hydrophilicity [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 162(1): 425-434.
- [12] LI J, WANG X, CHENG C, *et al.*. Selective modification for polydimethylsiloxane chip by micro-plasma [J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(3): 1310-1314.
- [13] OZAYDININCE G, COCLITE A M, GLEASON K K. CVD of polymeric thin films: applications in sensors, biotechnology, microelectronics/organic electronics, microfluidics, MEMS, composites and membranes [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(1): 016501.
- [14] RATNER B D. Surface modification of polymers: chemical, biological and surface analytical challenges [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 1995, 10(9): 797-804.
- [15] AZUMA A, AKIBA N, MINAKUCHI S. Hydrophilic surface modification of acrylic denture base material by silica coating and its influence on *Candida albicans* adherence [J]. *Journal of Medical and Dental Sciences*, 2012, 59: 1-7.
- [16] KITSARA M, NWANKIRE C, O'REILLY A, *et al.*. Hydrophilic polymeric coatings for enhanced, serial-siphon based flow control on centrifugal lab-on-a-disc platforms [J]. 2012.

- [17] KIM K, PARK S W, YANG S S. The optimization of PDMS-PMMA bonding process using silane primer [J]. *BioChip Journal*, 2010, 4(2): 148-154.
- [18] EDDINGTON D T, PUCCINELLI J P, BEEBE D J. Thermal aging and reduced hydrophobic recovery of polydimethylsiloxane [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 114(1): 170-172.
- [19] TSOUGENI K, TSEREPI A, CONSTANTOU-DIS V, *et al.*. Plasma nanotextured PMMA surfaces for protein arrays: Increased protein binding and enhanced detection sensitivity [J]. *Langmuir*, 2010, 26(17): 13883-13891.
- [20] BODAS D, KHANMALEK C. Hydrophilization and hydrophobic recovery of PDMS by oxygen plasma and chemical treatment—an SEM investigation [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 123(1): 368-373.

作者简介:



叶雄英(1961-),女,广东广州人,博士,教授,博士生导师,1989年于日本东京大学获博士学位,主要研究方向为微/纳机电系统,特别是微流控技术、微/纳传感器等。E-mail: xyue@mail. tsinghua. edu. cn



李子尚(1989-),女,北京人,硕士研究生,2011年于清华大学获得学士学位,主要从事微流体技术的研究。E-mail: lizish11@163. com

(版权所有 未经许可 不得转载)