文章编号　1004-924X(2017)01-0133-08

米级弯月面化学薄膜涂覆装备的研制

徐　佳[1]，许文斌[1]，卜和阳[1]，卢振武[1]，刘正坤[2]，洪义麟[2]，鱼卫星[3*]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学技术大学，安徽 合肥 230026；
3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119)

摘要：弯月面化学涂膜技术因其具有大面积、低成本以及高效率等优势成为继旋涂、喷涂等传统涂膜工艺后极具发展潜力的新型化学薄膜涂覆技术。本文针对国家某重大项目对米级光学元件表面的化学薄膜涂覆需求，对基于弯月面涂胶的技术原理进行了系统研究，分析了涂胶压强、基片和狭缝间距以及材料亲疏水性与涂胶面形态的关系，实现了对弯月液面的精密调控并研制出基于弯月面化学薄膜涂覆技术的装备，在 1 400 mm×420 mm 尺寸玻璃基片上实现了光刻胶的均匀涂覆，使整体胶膜厚度误差<4%，满足了米级元件表面精密化学薄膜的涂覆需求。

关　键　词：弯月面；大面积；涂胶；液面调控；光学元件

中图分类号：TB853.29　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172501.0133

Meter-scale thin film coating equipment based on meniscus-coating technology

XU Jia[1], XU Wen-bin[1], BU He-yang[1], LU Zheng-wu[1], LIU Zheng-kun[2], HONG Yi-lin[2], YU Wei-xing[3*]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*;
3. *Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of CAS, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 710119, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yuwx@opt.ac.cn*

Abstract: The meniscus chemical coating technology becomes a very promising new chemical thin-film coating technology after traditional coating technologies such as spin-coating and spray coating due to its merits of large area, low-cost and high efficiency. To meet the requirements of one national major projects on the meter-scale chemical thin film coating of optical component surface, based on the systematical research of the meniscus chemical film coating principal, static and dynamic gluing experiments were respectively conducted, and the relationships among the gluing pressure, the gap between substrate and slit, the material hydrophobicity and the morphology of meniscus were analyzed, then the fine tuning of the meniscus could be achieved and equipment based on the meniscus

收稿日期：2016-06-20；**修订日期**：2016-08-05.

基金项目：国际科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04001000-214)；国家自然科学基金资助项目(No. 11504369)；2014 年吉林省博士后科研项目

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

chemical thin film coating technology was developed. The coating uniformity of photo-resist was realized using this equipment on the glass substrate sizing 1 400 mm×420 mm, making overall coating thickness error less than 4% and satisfying coating requirements of meter-scale chemical precision thin film coating of optical component surface.

Key words: chemical coating; optical components; meniscus; large area; gluing; liquid level regulation

1 引 言

随着激光加工技术、新型光学材料以及半导体制造等领域的发展，在大尺寸光学元件表面制备均匀涂层的需求越来越大[1-5]。基片表面涂胶的传统方法有包括旋转涂胶、刮胶和浸液涂胶等方法[6-7]。对于旋涂方法，其工艺过程主要分为滴胶、高速旋转和后烘等步骤。首先将胶液滴注到基片表面上，然后经高速旋转将其铺展到整个基片，再通过后烘去除剩余的溶剂，最后得到性能稳定的薄膜[8-9]。但是在旋涂方法中，由于基片的高速旋转，绝大部分胶体都在涂胶过程中从基片的边缘甩出，使得涂胶过程中接近90%的胶液被浪费[10]。与此同时，在旋涂静置过程中出现的边珠现象及边界层表面效应会增大胶体与基片接触面间的压力，使得在静止过程中胶膜厚度发生改变，对最终胶膜的形态和均匀性造成严重影响。此外，当光学元件尺寸达到米级时，其重量也急剧增加达到百公斤量级，使得电机无法带动其高速旋转，无法实现米级大尺寸基片的胶体涂覆。对于刮胶方法，可以实现大面积涂胶，但薄膜厚度难以控制在纳米尺度。而浸液式涂胶虽然也能够实现较大面积上的胶液涂敷，但其无法实现单面涂胶，给基片的非涂胶面带来了污染，同时也造成了涂膜材料的巨大浪费。

弯月面化学涂膜技术是利用从狭缝溢出的胶体与基片表面相互接触形成的具有弯月面形态的液面来对水平运动的基片进行均匀薄膜涂覆。其涂膜尺寸取决于出胶狭缝的长度以及基片与狭缝之间的相对行程[11-15]。通过控制胶体的黏稠度、基片的运动速度等参数，可以实现大面积上的均匀薄膜涂覆，其成膜厚度从纳米到微米范围内连续可调[16-17]。同时，利用该方法进行薄膜涂覆，具有涂膜速度快、涂胶过程不受基片尺寸和形状的限制、溢出的胶液可以循环利用从而大幅提高了材料的利用率等技术优势[18-19]。本文针对国内某重大项目对米级光学元件化学涂膜的需求，在系统研究弯月面化学涂膜原理的基础上，分别进行了静态和动态涂胶实验，根据实验分析了涂胶液压、基片和狭缝的距离以及材料亲疏水性与涂胶弯月面形态的关系，并实现了对弯月液面的精密调控。最后在理论和实验的基础上，研制出了基于弯月面化学涂膜原理的大型涂胶装备，在1.4 m的长方形大尺寸基片上实现了光刻胶的均匀涂覆，薄膜的厚度误差控制在4%以下，满足了该重大专项对米级光学元件进行均匀化学薄膜涂覆的需求。

2 弯月面涂胶系统及原理

图1所示为弯月面涂胶系统原理图。利用具有曲面结构的涂胶管，将胶体以一定压力注入涂胶管使其从顶部的狭缝溢出，基片通过毛细力与流动的胶体相接触，并通过控制基片相对涂胶狭缝的运动来实现基片大面积上的薄膜涂覆[20-21]。在原理实验中，采用去离子水作为涂胶液体，分别选择具有不同疏水性表面的基片作为待涂胶面，并利用匀速电机带动基片实现一维方向上的运动。

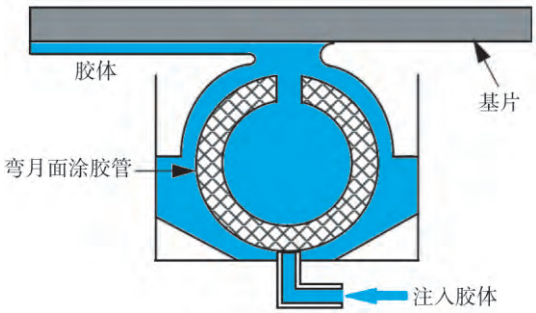


图1 弯月面涂胶系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of meniscus coating

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

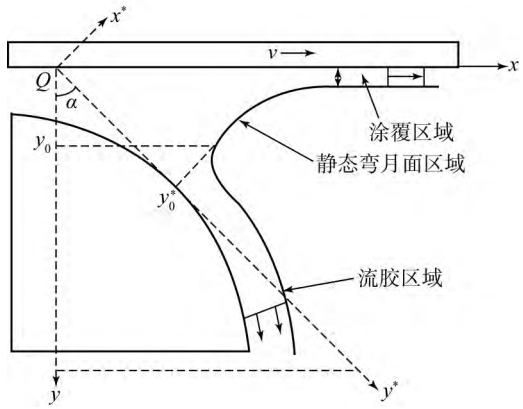


图 2　弯月面几何流体图

Fig. 2　Geometry-fluid diagram of meniscus

如图 2 所示为利用弯月面涂胶的胶面几何流体图。胶液在单位长度内以一定的流量从狭缝中流出，在与基片接触过程中液面被分为三个区域，分别是涂覆区域、静态弯月面区域和流胶区域[22]。在涂覆区域，液面的曲率较小且液体沿 x 方向涂覆，该情况下其近似的黏滞流体运动方程为[23]：

$$\frac{\partial P}{\partial y}=\rho g,\frac{\partial P}{\partial x}=\mu\frac{\partial^2 v}{\partial y^2},\tag{1}$$

其中：P 为胶体的液压强度，ρ 为胶体密度，μ 为胶体黏度，g 为重力加速度，v 表示基片的水平移动速度。此时边界条件满足：$y=h(x)$ 时，$\frac{\partial v}{\partial y}=0$，其边界条件为：

$$P=-\sigma k(x)=-\sigma\frac{h}{(1+h^2)^{\frac{3}{2}}},\tag{2}$$

其中：h 为胶液厚度，σ 为胶体表面张力。进一步求解可以得到关于胶厚 h 为：

$$\frac{h^3\sigma}{3\mu}\left[\frac{h}{(1+h^2)^{\frac{3}{2}}}\right]-\frac{\rho g h^3 h_s}{3\mu}=v(h-h_s),\tag{3}$$

其中：$h_s=\left(\frac{\mu v}{\rho g}\right)$，在这种情况下，需要该区域的曲率与弯月面的曲率保持一致连续性。在静态弯月面区域，表面张力与液体自身重力的动态平衡为：

$$\frac{\partial P}{\partial y}-\sigma\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}y}=\rho g.\tag{4}$$

通过边界条件可以将式(4)进行无量纲化[24]：

$$h=\frac{1.3375}{C_0}\left(\frac{\mu v}{\rho g}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\rho g}{\sigma}\right)^{\frac{1}{6}},\tag{5}$$

其中：

$$C_0=Y+\frac{\mathrm{d}^2\Phi/\mathrm{d}Y^2}{[1+(\mathrm{d}^2\Phi/\mathrm{d}Y^2)]^{\frac{3}{2}}},$$

$$\Phi=\left(\frac{\sigma}{\rho g}\right)^{-\frac{1}{2}}h,Y=\left(\frac{\sigma}{\rho g}\right)^{-\frac{1}{2}}y.\tag{6}$$

在这种情况下，静态弯月面区域液面曲率需要与流胶区域的曲率相匹配，而此时对于流胶区域的曲率为：

$$\left(\frac{\rho g}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}}(C_0^2-2)^{\frac{1}{2}}=\frac{h}{y^2}\left[1+2\left(\frac{h}{y}\right)\tan\alpha-1.1444\right]^{\frac{1}{2}}.\tag{7}$$

最终得到基片上的薄膜厚度[25]为：

$$h=\frac{1.3375\left(\frac{v\mu}{\rho g}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\rho g}{\sigma}\right)^{\frac{1}{6}}}{\left[2(1+\sin\alpha)-1.1444(\cos\alpha)^{\frac{4}{3}}\left(\frac{\rho g}{\sigma}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{3q\mu}{\rho g\cos\alpha}\right)^{\frac{2}{9}}\right]^{\frac{1}{2}}},\tag{8}$$

其中：v 表示基片的水平移动速度，ρ 为胶体密度，μ 为胶体黏度，σ 为胶体表面张力，α 为接触角，q 为胶体流量，g 为重力加速度。当选定某一种液体作为涂覆胶体后，影响涂胶效果的主要因素是胶液面与基底之间的亲疏水性、弯月液面形态以及基底的运动速度等，所以可以通过对以上因素进行精密调节与控制来获得对基片上所涂覆薄膜厚度的精密控制。

3　静态与动态弯月液面的精密调控

图 3 所示为用来进行弯月面精密调控的系统原理图。在保证注入液体压力一定的情况下，可以调整左、右两侧的升降平台来改变基片下表面与涂胶狭缝之间的距离，由此获得具有不同形态的涂胶弯月面。在调整距离过程中，通过观察弯月面形态变化来获得具有稳定工作状态的涂胶系统参数。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

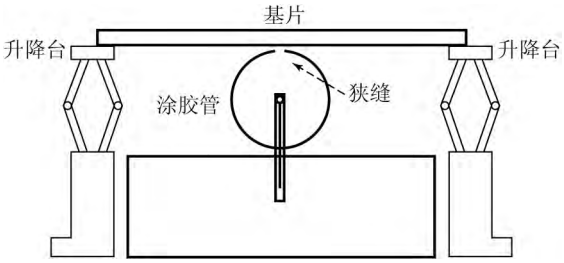


图3 基于弯月面涂胶的胶液面调控系统

Fig. 3 Home built meniscus shape controlling system

在放置基材之前，首先要通过调整液体注入压力以及涂胶面的水平位置来获得所需要的液体溢出面。在该实验中，液体的压力是通过精密气压控制阀以及高精度气压计来进行调控。液体溢出面的水平调整是在液体从狭缝溢出后，通过流向狭缝左右两侧的液体流量以及溢出液面的对称程度来进行判别，并根据结果对涂胶管进行旋转使得出胶狭缝处于整体结构的中间位置。如图4所示，通过调整注入液压以及狭缝的位置，获得了具有恒定流量且形态稳定的胶体溢出液面，其高度为1.5 mm。

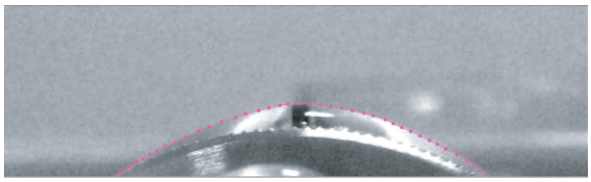


图4 实验中得到的稳态溢出液面

Fig. 4 Static meniscus shape obtained in experiment

由于基底表面的亲疏水性对弯月面涂膜的效果影响显著，所以选择具有不同表面特性的基片来研究其对弯月面的影响。图5所示为实验中采用的不同材质的待涂胶基片表面，从左至右其分别是高分子聚合物涂层、镀铬金属面以及玻璃表面，3种材料的基片宽度为25 mm，厚度为5 mm，长度为500 mm。利用如图4所示的出液面，分别对3种材料进行液面静态调控实验。在实验中溢出液面与基片接触后形成涂胶弯月面，通过调整狭缝和基片之间的距离可以获得不同形态的弯月面，通过分析实验结果获得基片与狭缝间距以及不同材质的待涂胶面对于涂胶弯月面的影响，实验结果如图6～8所示。

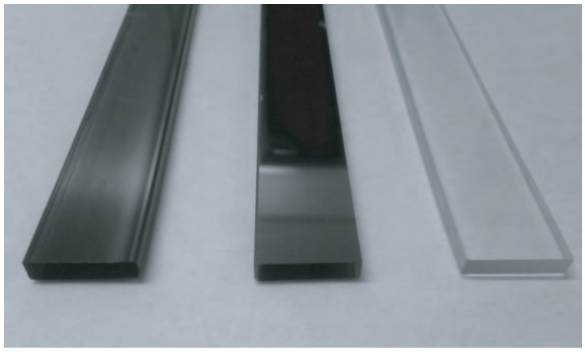


图5 用于涂胶的基片材料，从左至右分别是：高分子聚合物涂层，镀铬金属面和玻璃表面

Fig. 5 Different materials used for coating, from left to right: polymer, chromium and glass

图6所示为基片表面为高分子聚合物涂层时，基片与狭缝之间所形成的弯月面的形态随狭缝与基片间距变化的实验结果。由图9可以发现，随着狭缝与基片间距逐渐增大，液体与材料的接触面积逐渐减少并在间距为7.2 mm时达到最小，此时弯月面晃动严重，若进一步增大间距，液面将从基片表面脱离。

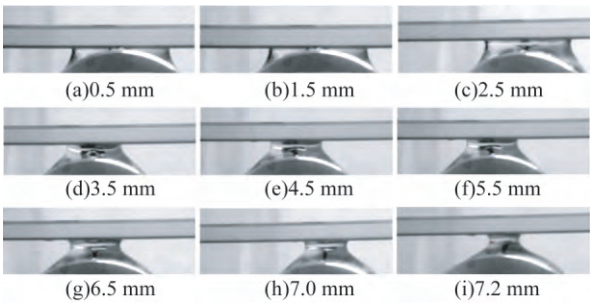


图6 高分子聚合物涂层弯月面形态随狭缝与基片间距变化的实验结果图

Fig. 6 Meniscus based on the polymer surface with different distances between substrate and slit

图7所示为基片表面为玻璃时，弯月面的形态随狭缝与基片间距变化的实验结果。随着狭缝与基片间距逐渐增大，液体在材料表面的接触面积逐渐减小，而且由于玻璃的亲水性劣于高分子涂层，所以狭缝与基片间距允许的最大值为6.5 mm，在间距大于6.5 mm时弯月面将无法形成。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

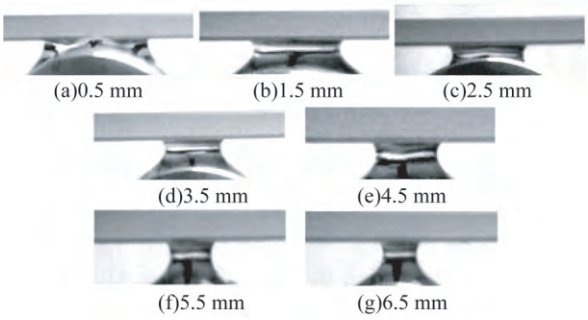


图 7　玻璃表面弯月面形态随狭缝与基片间距变化实验结果图

Fig. 7　Meniscus based on the glass surface with different distances between substrate and slit

同样现象也出现在基片表面为铬金属镀层时，如图 8 所示，由于金属铬的疏水性最强，从而导致在该情况下如要保持弯月面形态狭缝与基片间的最大允许距离仅为 3.5 mm。

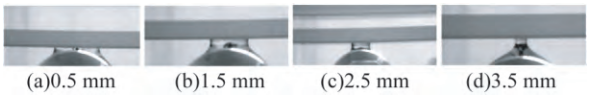


图 8　铬金属表面弯月面形态随狭缝与基片间距变化实验结果图

Fig. 8　Meniscus based on the chromium surface with different distances between substrate and slit

根据上述实验可以看到，随着狭缝与基片间距的逐渐增大，基片与胶液接触面的宽度随着距离的增大而减小，弯月面的稳定性逐渐下降，如图 9 所示。当基片表面与涂胶狭缝之间的距离过大时，虽然液体依然可以附着在基片表面，但此时的弯月面由于受到液体自身流动以及外界振动的影响，会产生液面抖动现象，距离越大抖动越严重。而当基片表面与涂胶狭缝之间的距离过小时，液体注入的压力对基片表面的作用远大于毛细力，进而导致在弯月面两侧的基片表面出现滴液的现象。所以，在实际工作中需要根据不同的涂胶基片材料、胶体注入压力以及狭缝与基片表面间距来进行精密联合调控，从而获得较为理想的涂胶弯月面。

在实验中，由于铬金属面具有较强的疏水性，基片表面与狭缝之间的距离在 1～1.5 mm 内变化时，弯月面较稳定，液体流动和外界振动几乎不会对弯月面的形态造成影响，同时这一距离的选择也可以使得溢出液体对称地流往狭缝两侧，而不会由于材料的疏水性，使得液体聚集在狭缝出口。这种方法也同样适用于玻璃接触面，其弯月面处于稳定状态时，基片表面与狭缝之间的合适距离在 2.5～3.5 mm。对于高分子聚合物涂层而言，由于其良好的亲水性，使得在相同高度下获得的弯月面形貌与其余两种材料相比变化较大，根据实验结果，基片表面与涂胶狭缝之间的距离在 3～4.5 mm 内变化时，可以获得稳定的涂胶弯月面。

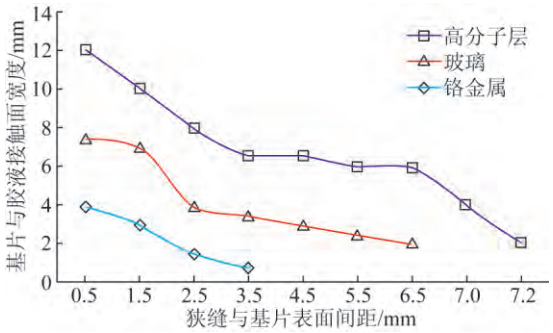


图 9　高分子涂层、玻璃以及金属铬三种不同表面材料中，胶液接触面宽度随狭缝和基片间距变化的曲线图

Fig. 9　Curve graph of meniscus-contact area changed with the different distances between substrate and slit and different materials

为进一步实现一维方向上的大面积涂胶，利用电机带动基片做一维方向上的匀速运动来进行弯月面涂胶。该电机由系统程序控制，提供了 1.5 mm/s 的稳定水平涂胶速度。由理论分析以及式(8)可知，动态涂胶实验相比于静态实验对液体压力有一定的要求，高运动速度对应于高液体压力，低运动速度对应于低液体压力，这样才能保证稳定的运动涂胶状态。所以在动态涂胶过程中，在保证其他条件不变的情况下，增加注入液体压力到原来的 2 倍，使得胶体的注入与涂覆达到动态平衡以获得稳定的涂胶弯月面。与此同时，基片表面材质的亲疏水性的差异会在动态涂胶中更加明显地体现，具有较强亲水性的高分子涂层的弯月面动态效果差异最为明显，其次是玻璃表面，最后是铬金属面。其动态效果差异截图如图 10 所示，亲水性越好的基片在涂胶过程中弯月面形变越明显，并且胶液与基片表面的接触面积变化较大。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

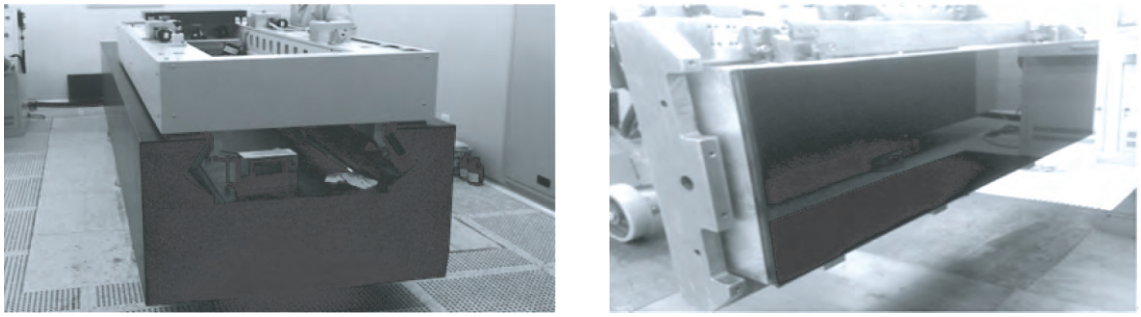
(a)高分子聚合物涂层 (b)玻璃表面 (c)铬金属面
(a)Polymer (b)Glass (c)Chromium

图 10　三种基片表面材料的弯月面动态效果截图

Fig. 10　Screenshots of coating-process for different materials

4　米级弯月面涂膜装备的研制及实验

基于上述开展的对弯月面精密调控技术的研究，最终实现了米级弯月面涂胶装备的工程设计、制造及系统集成。图 11(a)所示为基于弯月面调控原理的大尺寸涂胶装备。利用该装备实现了在 1 400 mm×420 mm 尺寸基片上的涂胶工艺，涂胶后的基片如图 11(b)所示。在涂胶过程中采用 S1805(Shipley)作为待涂光刻胶，通过控制胶体压强、基片和狭缝间距以及基片相对于出胶口的运动速度，在该基片上得到了所需厚度的光刻胶涂层。在涂胶过程中，利用 Thin-Film Analyzer (FILMETRICS F20, Filmetrics, Inc.)膜厚测量仪，并按照 1 采样点/秒的实时采样速率对已涂胶区域进行膜厚测量，其实时采样膜厚测量曲线如图 12(a)所示。通过对实时膜厚数据进行分析计算，可得到如图 12(b)所示的胶膜厚度误差曲线，可见其整体涂胶厚度误差低于±4%。

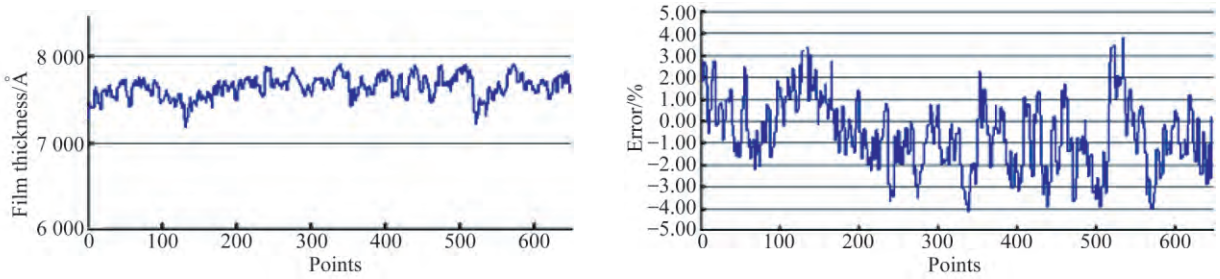


(a)自行研制的弯月面大尺寸涂胶设备
(a)Meniscus-base coating device with the big area

(b)基于弯月面调控涂胶实现的大尺寸涂胶基片
(b)Big area substrate coated by meniscus-controlling

图 11　涂胶设备照片

Fig. 11　Photo of meniscus-base coating device



(a)实时采样膜厚测量曲线
(a)Measured curve of film thickness based on the real-time sampling

(b)胶膜厚度误差曲线
(b)Error curve of film thickness

图 12　膜厚测量

Fig. 12　Measured of film thickness

5　结　论

本文基于弯月面化学涂膜原理，对弯月面涂胶过程进行了系统研究。根据实验分析了涂胶液压、基材和狭缝的距离以及材料亲疏水性与涂胶弯月面形态的关系并实现了对弯月液面的精密调控。分别选择了高分子聚合物涂层、镀铬金属面以及玻璃面作为待涂胶面，利用匀速电机实现了一维方向上的运动涂胶工艺。并在该研究的基础上，成功研制出基于弯月面涂胶的大型涂胶设备，并在 1 400 mm×420 mm 尺寸的基片上实现了

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大面积均匀涂胶，其整体涂胶厚度误差低于±4%。本文所涉及到的弯月面涂胶技术、系统及涂胶设备，将会对我国在发展大尺寸精密光学元件的化学涂膜技术及装备制造方面奠定良好的技术基础，从而满足我国在激光加工、半导体制造等领域的需求。

参考文献：

[1] 武建芬，卢振武，张红鑫，等. 光学非球面离子束加工模型及误差控制[J]. 光学 精密工程，2009(11)：2678-2683.
WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, *et al*.. Processing model and controlling error of Ion beam processing based on the optical aspheric surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2678-2683. (in Chinese)

[2] 刘华，卢振武，熊峥，等. 绝对式光栅尺母尺刻划曝光系统[J]. 光学 精密工程，2014，22(7)：1814-1819.
LIU H, LU ZH W, XIONG ZH, *et al*.. Exposure system of Absolute type grating ruler [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7):1814-1819. (in Chinese)

[3] 鱼卫星，卢振武，王鹏，等. 亚波长周期结构与多层增透膜反射特性的比较[J]. 光学 精密工程，2004，9(1)：10-13.
YU W X, LU ZH W, WANG P, *et al*.. Comparison of periodic subwavelength structure and multilayer antireflection coatings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 9(1):10-13. (in Chinese)

[4] 刘民哲，刘华，许文斌，等. 用于空间望远镜的膜光子筛[J]. 光学 精密工程，2014(08)：2127-2134.
LIU M ZH, LU H, XU W B, *et al*.. Membrane photon sieve for the space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014(08):2127-2134. (in Chinese)

[5] 曹召良，卢振武，李凤友，等. 二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计分析[J]. 光学 精密工程，2004，10(6)：537-541.
CAO ZH L, LU ZH W, LI F Y, *et al*.. design and analysis of the two-dimensional antireflective subwavelength grating structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 10(06):537-51. (in Chinese)

[6] CARCANO G, CERIANI M, SOGLIO F. Spin coating with high viscosity photoresist on square substrates [J]. *Microelectronics International*, 2013, 10(3): 12-20.

[7] BORNSIDE D E, MACOSKO C W, SCRIVEN L E. On the modelling of spin coating [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 1984, 13: 122-130.

[8] MEYERHOFER D. Characteristics of resist films produced by spinning [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49:3993-3997.

[9] BORNSIDE D E, MACOSKO C W, SCRIVEN L E. Spin coating: one-dimensional model [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66:5185-5193.

[10] HAALAND P, MCKIBBEN J, PARADI M. Fundamental constraints on thin film coatings for flat-panel display manufacturing [J]. *S/D*, 1995: 79-84.

[11] BRITTEN J A, THOMAS I M. Non-newtonian flow effects during spin coaling large-area optical coatings with colloidal suspensions [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71:972-979.

[12] BOKH F, BIRBARA P J. Method of meniscus coating [P]. *U. S. Patent*, 4370356, 1983.

[13] BHATTACHARYA S K, BHATEVARA S, MORALSE H, *et al*.. Low-cost, high throughput, large area meniscus coating for MCM-D and MCM-L substrates [J]. *International Symposium on Microelectronics*, 2000, 4339:74-79.

[14] JAEHOON K, BRIAN J N, JOSEPH M D, *et al*.. Ultrathin film deposition by liquid CO_2 free meniscus coating-uniformity and morphology[J]. *Langmuir*, 2006, 22:642-657.

[15] BHATTACHARYA S K, MOON K S, TUMMALA R R, *et al*.. Meniscus coating: a low-cost polymer deposition method for system-on-package (SOP) substrates [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2003, 26: 110-114.

[16] HERRICK C S. Method and apparatus for meniscus coating [P]. *U. S. Patent* 3201275, 1965.

[17] BOK H F, BIRBARA P J. Uniform, micro-thin [P]. *U. S. Patent* 4370356, 1983.

[18] GAUSS A F, KAMEN E W, CHNG C M, *et al*.. Recipe generation for large-area meniscus coating using kalman filter estimation [J]. *IEEE Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 1997, 97: 76-80.

[19] BHATEVARA S, BHATTACHARYA S K, MAY G S, *et al*.. Mechatronics toward development of a fully automated meniscus coating system[J]. *54th Electronic Components & Technology Conference*,

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2004, 1:2009-2014.

[20] BHATTACHARYA S K, BHATEVARA S, SUTTER D A, *et al*.. An automated work cell for meniscus coating on 24-in packaging substrates [J]. *IEEE Transactions on Components And Packaging Technologies*, 2001, 24:625-630.

[21] BRITTEN J A, THOMAS I M. Sol-gel multilayers applied by a meniscus coating process [J]. *Better Ceramics Through Chemistry V*, 1992:271, 413.

[22] BHATTACHARYA S K, BHATEVARA S, MORALES H, *et al*.. An automated meniscus coating system for polymer deposition on large-area MCM-D and MCM-L substrates [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2000, 23:267-276.

[23] SAVAGE M. Meniscus roll coating: Steady flows and instabilities [J]. *Free Boundary Problems: Theory And Applications*, 1999, 409:89-102.

[24] JERALD A, BRITTEN J A. A Simple theory for the entrained film thickness during meniscus coating [zJ]. *Nuclear Physics A*, 1969, 123:33-53.

[25] GARROU P, REHG T, HEISTAND R, *et al*.. Large area processing: Meniscus coating of thin film polymer dielectric & photoresist [J]. *Proceedings of International Symposium on Microelectronics*, 1997, 3235:150-156.

作者简介:

徐 佳(1984—),**男,吉林长春人,博士**,2008**年于长春理工大学获得学士学位**,2014**年于长春理工大学获得博士学位,现为中科院长春光机所博士后,主要从事微纳加工及光刻技术方面的研究**。E-mail:xujia728@163.com

鱼卫星(1975—),**男,陕西临潼人,研究员**,1998**年于西北工业大学获学士学位**,2001**年于中科院长春光机所获理学硕士学位**,2004**年于新加坡南洋理工大学获博士学位,主要研究领域包括亚波长光学、微纳光学、表面等离子体光学、微细加工技术、三维微纳加工技术等**。E-mail:yuwx@opt.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net