

文章编号 1004-924X(2016)10-2456-06

## 用于蓝宝石光盘的数字化数据存储

付明磊<sup>1,3</sup>, 徐武超<sup>1</sup>, 乐孜纯<sup>1,3\*</sup>, 伊凡·高博夫<sup>2,3</sup>, 德米特罗·曼科<sup>2,3</sup>

(1. 浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310023;

2. 乌克兰国家科学院 信息记录研究所, 乌克兰 基辅 03113;

3. 浙江工业大学 义乌科学技术研究院, 浙江 义乌 322001)

**摘要:**为了解决长时数据存储的难题,开展了以数字格式在蓝宝石光盘表面写入数据的研究工作。根据艾林方程,分析了利用常用无机材料进行数据存储的数据失效时间。描述了在蓝宝石材料为基底的光盘上以数字格式记录数据的基本工艺流程,重点介绍了用于蓝宝石光盘的离子束刻蚀系统。实验结果显示,蓝宝石光盘表面刻蚀的信息坑宽度为 0.6  $\mu\text{m}$ ,深度为 0.2  $\mu\text{m}$ ,磁道节距为 1.6  $\mu\text{m}$ ,符合 ISO/IEC 10149:1995 规定的 CD-ROM 格式数据存储要求,表明采用本文提出的方法实现蓝宝石光盘的数字化数据存储是可行的。此外,这种基本工艺流程不仅适用于蓝宝石光盘,同样适用于其它以高度稳定的材料(如石英玻璃)作为基底的光盘。

**关键词:**蓝宝石光盘;光学数据存储;长时数据存储;干法刻蚀

中图分类号:TQ597 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162410.2456

## Data recording in digital form on sapphire optical disk

FU Ming-lei<sup>1,3</sup>, XU Wu-chao<sup>1</sup>, LE Zi-chun<sup>1,3\*</sup>, GORBOV Ivan<sup>2,3</sup>, MANKO Dmytro<sup>2,3</sup>

(1. College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Institute for information recording, NAS of Ukraine, Kiev 03113, Ukraine;

3. Yiwu Academy of Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Yiwu 322001, China)

\* Corresponding author, E-mail: lzc@zjut.edu.cn

**Abstract:** To achieve long-term data storage on a sapphire optical disk, this paper researches how to record data on the sapphire optical disk surface in a digital form. On the basis of Eyring equation, the time-to-failure of data recording on the substrates made of inorganic materials was estimated. The data recording process on the sapphire optical disk with the substrate made of sapphire in digital form was introduced. Dry etching techniques as well as an ion beam etching system were emphasized. Experimental results show that the width and depth of a pit on the optical disk are 0.6  $\mu\text{m}$  and 0.2  $\mu\text{m}$ , respectively, the track pitch is 1.6  $\mu\text{m}$ , and those parameters of the pits on the surface of sapphire optical disk are in compliance with that of CD-ROM form defined by ISO/IEC 10149:1995 standard. These results demonstrate that the proposed method is feasible to realize data recording in digital form on sapphire optical disks. The method is not only suitable for the sapphire optical disk, but also for

收稿日期:2016-04-20;修订日期:2016-05-27.

基金项目:国家高端外国专家资助项目(No. GDT20153300054);浙江省公益性技术应用研究计划资助项目(No. 2015C34011)

other optical disks with substrates made of high stable materials(such as quartz glass).

**Key words:** sapphire optical disk; optical data storage; long term data storage; dry etching

## 1 引言

随着云存储技术和高速互联网技术的发展,人们对使用光盘进行数据存储的需求量不断降低。但光盘在归档数据存储领域依然占据优势<sup>[1-6]</sup>。比如,在需要存储重要文献、历史档案、世界文化遗产信息、基因数据等珍贵资料时,光盘存储往往会作为首选方案。在“大数据”背景下,人们对光盘数据存储的可靠性和时效性提出了更高的要求,即长时数据存储。然而,目前常用的光盘大多以聚碳酸酯(PC)材料为基底,由于PC材料本身的稳定性较低,以及光盘金属层与基底的黏附性较弱,因此目前的光盘难以满足长时数据存储的要求<sup>[7-8]</sup>。

为了解决长时数据存储的问题,国内外研究者尝试了多种技术方案。这些方案的共性是选用稳定性高的材料作为记录媒质或基底<sup>[9-13]</sup>。文献[14]采用金属陶瓷作为记录媒质,文献[15]采用石英作为基底材料。文献[16]采用钨作为记录媒质,同时以氮化硅进行封装。在文献[17]和[18]中,作者提出采用离子束刻蚀方法在硼硅玻璃表面制作信息坑。目前,真正实用化的技术方案是由法国 ARNANO 公司设计的超长寿命 Nanoform 光盘<sup>[19]</sup>。采用蓝宝石材料作为基底,存储容量为一万张 A4 纸。但 Nanoform 光盘的数据是以模拟格式记录的,严重制约了光盘的应用范围。

相比以模拟格式写入数据,数字格式主要存在以下优势。(1)数字信号对信号电平的精度要求不敏感,这意味着读取系统可以具有更大的误差允许范围;(2)数字信号可以存储更多类型的文件格式,如视频文件、音频文件等,而模拟格式只能对图像进行存储。单晶蓝宝石材料在物理性质和化学性质方面具有突出优势。比如,它具有 9 级表面硬度(金刚石 10 级)、2 318K 的熔点等。因此,采用单晶蓝宝石材料制作的光盘具有抗磨损擦伤、防火、防化学腐蚀、防紫外线辐射等性能。然而,正是因为这些优势,在蓝宝石光盘表面以数字格式写入数据是一项具有挑战性的工作。

本文介绍了在蓝宝石材料为基底的光盘上以

数字格式记录数据的工艺流程,重点介绍了用于蓝宝石光盘的离子束刻蚀系统和相关的实验结果,证实了采用蓝宝石光盘作为长时数据存储载体的可行性。

## 2 长时数据存储光盘制作材料分析

通常,数据以信息坑的形式刻蚀在光盘的基底表面。一旦光盘的存储环境温度超过了光盘基底的熔点,所记录的数据将丢失。因此,可以根据信息坑的老化时间评估光盘数据存储的数据失效时间。假设两种光盘基底材料的熔点分别为  $T_1$  和  $T_2$ ,由这两种基底材料制作光盘的数据失效时间分别是  $t_1$  和  $t_2$ ,根据艾林方程(Eyring equation),光盘数据存储失效时间与光盘基底材料熔点的关系为<sup>[1-3,7]</sup>:

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{T_1 - T_2}{T}} \quad (1)$$

Okino Y.<sup>[20]</sup>和 Slattery O.<sup>[21]</sup>等人的研究表明:在 20℃ 温度和 40% 相对湿度的存储条件下,以聚碳酸酯(PC)为基底材料的光盘的数据失效时间为 20~50 年。假定在一般存储条件下(即没有维持温度条件和湿度条件),以聚碳酸酯(PC)为基底材料的光盘数据失效时间为 10 年计算,可以估计以高稳定性无机材料为基底的光盘的数据失效时间。其中,式(1)中  $T$  取 20℃ (或者 293 K)。表 1 所示的理论分析结果表明,采用蓝宝石材料作为基底制作的光盘,其数据存储时间可达数千年。

表 1 以无机材料为基底的光盘数据失效时间

Tab. 1 Time-to-failure of data on optical disk made of inorganic materials

基底材料	熔点 / (K)	相对于 PC 基底光盘的数据存储时间	光盘数据失效时间 / (年)
聚碳酸酯(PC)	523	1	~10
钠玻璃	923	$e^{1.36} = 3.91$	~40
石英玻璃	1 986	$e^{4.99} = 146.94$	~1 500
蓝宝石	2 318	$e^{6.13} = 457.73$	~4 500

如图 1 所示,蓝宝石光盘在结构上可分为衬底层、反射层和保护层。信息是以信息坑形式直接刻蚀在衬底层上的,所以衬底层材料的选择直接关乎光盘数据的有效存储时间。

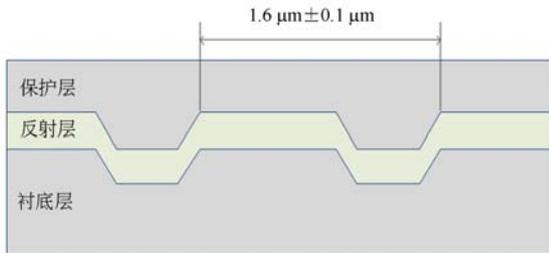


图 1 蓝宝石光盘结构

Fig. 1 Structure of sapphire optical disk

### 3 蓝宝石光盘的数据记录过程

对于以聚碳酸酯(PC)为基底的光盘(可录光盘),其数据记录比较简单,一般采用高强度激光来进行数据写入。对于蓝宝石这种稳定性高的无机材料,采用这种激光刻蚀的方法进行数据记录将比较困难,且成本昂贵。ISO/IEC 10149:1995 标准对数字格式光盘的磁道结构提出了严格要求,考虑到采用干蚀法更易实现刻蚀深度的均匀性<sup>[22-23]</sup>,因此选用干法刻蚀技术在蓝宝石光盘基底表面以 CD-ROM 格式(根据 ISO/IEC 10149:1995)记录数据,其技术流程如图 2 所示。对于蓝宝石材料(折射率为 1.77),如果以 CD 格式进行数字格式写入数据,需要信息坑的深度在 110 nm<sup>[24]</sup>。首先,通过热蒸发在蓝宝石基底表面覆盖一层铬膜,铬膜除了可以作为反射层的材料,还有助于表面电荷转移,提高刻蚀深度。然后,利用离心机在蓝宝石基底表面沉积光刻胶。接下来,通过聚焦激光束将需要存储的数据记录在光刻胶层。通过对光刻胶进行选择性刻蚀,得到刻蚀掩膜。掩膜将决定光盘的信息格式(CD 格式、DVD 格式或 BD 格式)。之后,还需对裸露出的铬膜进行化学刻蚀。接下来,通过离子束刻蚀方法在蓝宝石基底表面制作信息坑。在离子束刻蚀完成后,需要清除残余的光刻胶。最后,在信息坑表面覆盖金属反射层。

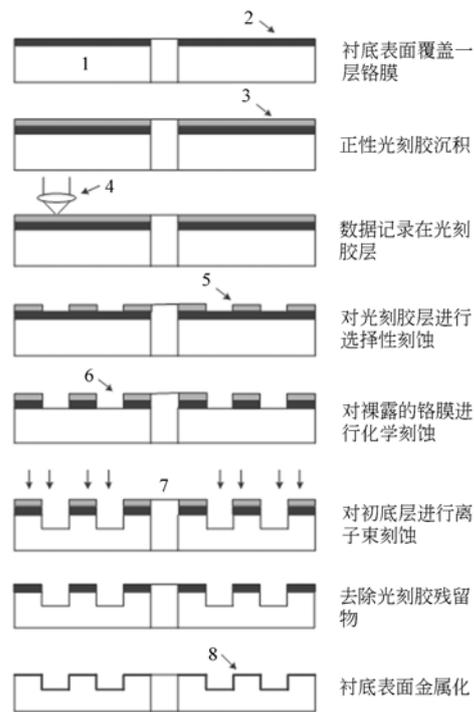
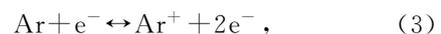
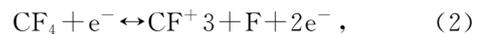


图 2 蓝宝石光盘数据记录过程

Fig. 2 Stages of data recording process on the optical disc for long-term data storage

### 4 用于蓝宝石光盘的离子束刻蚀系统

在蓝宝石光盘的数据记录过程中,离子束刻蚀是关键环节。通过反复实验,CF<sub>4</sub> 与不同比例的氩气混合后,在电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>、离子束直径为 3 cm、电压为 2.6 kV 条件下,可以获得对于蓝宝石材料的最大刻蚀速率为 5 nm/min。通过调整刻蚀时间,可以实现对蓝宝石光盘信息坑深度的精确控制。采用由具有冷阴极的离子源产生的离子束对基底材料进行刻蚀。在强电场作用下,CF<sub>4</sub> 与 Ar 首先会被电离,形成等离子体<sup>[25]</sup>:



其中:电离出的 Ar<sup>+</sup> 为惰性离子,由惰性气体产生的离子束其去除材料的机理是通过物理溅射方式。CF<sub>3</sub><sup>+</sup> 为活性离子,活性离子束刻蚀去除材料的机理主要是通过反应粒子和基底材料原子间的化学反应,而不是通过物理溅射的方式<sup>[8,10]</sup>。

离子束刻蚀系统如图 3 所示,该系统工作在真空环境下。气体源存在于 2 个顶部开有小孔的容器 5、6,气体喷出后首先被 2 kV 的电压加速。在气体源和地线 7 之间的空间由辉光放电产生等离子体,其中离子束被静电场分离出,并由螺旋线圈 3 产生的磁场聚焦。离子束由带正电荷的粒子 2 形成,到达工件 1 表面形成表面电荷。由于事先在工件(蓝宝石衬底层)表面镀了一层铬膜,所以多余的表面电荷会被转移,因此不会发生由于表面电荷沉积而对刻蚀作用产生抑制的现象,有助于提高刻蚀深度。

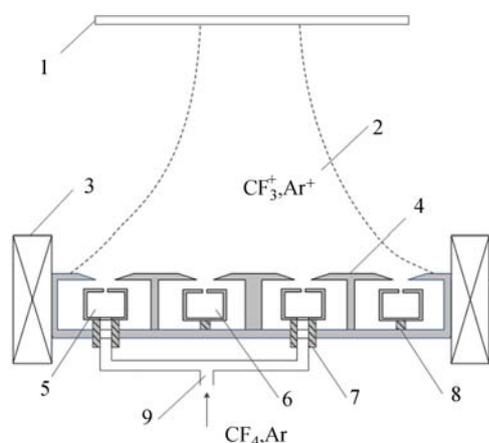


图 3 离子束刻蚀系统

Fig. 3 Scheme of ion beam etching system

需要注意的是,由于蓝宝石材料的主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,在刻蚀完成后,蓝宝石基底信息坑表面可能积聚一层氟化铝薄膜。如有必要,可采用氩离子束将这层薄膜去除。

## 5 实验结果及讨论

在蓝宝石光盘中以 CD 格式记录数据。首先,对蓝宝石基底进行彻底清洗,依次采用氢氟酸(HF)、超声波清洗器、液态丙酮、异丙酮进行处理,最后进行 15 min 的高压放电。然后,通过转速为 2 800 rpm 的离心机在蓝宝石基底表面沉积一层 Shipley 1813 光刻胶,其厚度为 150 nm,并且在 90 °C 温度下进行 1 h 退火处理。在制作刻蚀掩膜前,为降低离子束对掩膜的刻蚀速率,通过热蒸发在蓝宝石基底表面覆盖一层铬膜以提高刻蚀深度。在完成光刻胶层上的数据记录和选择性

刻蚀后,需要去除暴露出来的铬膜。最后,当离子束刻蚀完成后,蓝宝石光盘基底需在 2% 的 KOH 溶液中浸泡 10 h 以去除残余光刻胶。

在完成对蓝宝石光盘表面刻蚀后,采用原子力显微镜对光盘表面微结构进行检测,以便对刻蚀效果进行评估。图 4 和图 5 分别给出了原子力显微镜下蓝宝石光盘表面数据结构图像和截面分析曲线。结果显示,信息坑的宽度约为 0.6  $\mu\text{m}$ ,深度约为 0.2  $\mu\text{m}$ ,磁道节距约为 1.6  $\mu\text{m}$ ,这样的深度和形状使得数据易于被读取或复制。因此,该方法实现蓝宝石光盘的数字化数据存储是可行的。

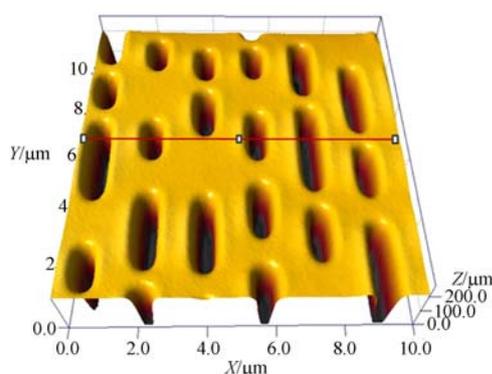


图 4 CD 格式蓝宝石光盘表面数据结构

Fig. 4 Data structure in CD format on the surface of sapphire optical disc

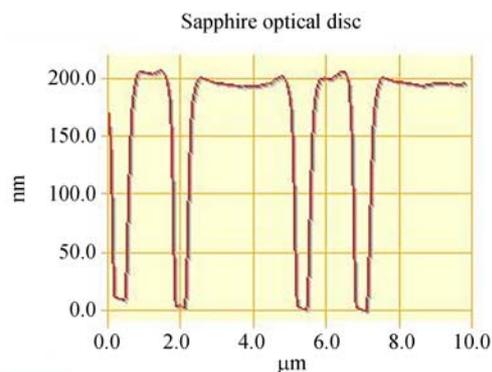


图 5 蓝宝石光盘纵向截面分析曲线

Fig. 5 Section analysis curve for sapphire optical disc

本次实验是以 CD 格式在蓝宝石光盘表面记录数据。同时,也考虑以高密度媒体格式(DVD 格式或者 BD 格式)记录数据的可能性。然而,数据记录密度的增加会使基底表面结构的特征尺寸减小,例如 BD 格式光盘信息坑的磁道宽度仅为 150 nm。这就意味着需要对现有的离子束刻蚀

系统做进一步改良。提高离子束刻蚀系统的刻蚀精度可以从两个方面入手:(1)寻找性能更为优良的光刻胶材料作为刻蚀掩膜,例如具有更高分辨能力、更耐离子束侵蚀的掩膜材料;(2)提升离子束的聚焦能力以提高刻蚀精度。

本文研究的蓝宝石光盘,其制作方法类似于传统光盘的母盘制作方法<sup>[26]</sup>。所不同的是,相比于制作母盘时在玻璃衬底上刻蚀数据,在蓝宝石这种高度稳定的材料上刻蚀数据难度更大、成本更高。区别于制作母盘时所采用的方法流程,本文提出的方法预先在蓝宝石衬底表面覆盖了一层铬膜,大大提高刻蚀深度。但是,由于所述方法对刻蚀设备(离子束刻蚀机)的要求过高,因此该方法目前很难普及,只能面向一些特殊的机构,用于保存更有价值的信息。在数据读取方面,由于蓝宝石材料具有明显的各向异性,当扫描光束入射到蓝宝石衬底中会发生双折射,产生像差,从而影响信息读取的可靠性和分辨率。在这一点上,可采用增加补偿板的方式来对像差进行补偿。研究发现,石英是一种与蓝宝石具有相反各向异性的材料,因此可采用石英补偿板来补偿蓝宝石衬底

的像差。

## 5 结 论

本文介绍了利用蓝宝石光盘进行数字式数据存储的基本工艺流程,重点介绍了所采用的离子束刻蚀系统和所得到的实验结果。实验结果显示,蓝宝石光盘信息坑的宽度约为  $0.6 \mu\text{m}$ ,深度约为  $0.2 \mu\text{m}$ ,磁道节距约为  $1.6 \mu\text{m}$ ,符合 ISO/IEC 10149:1995 规定的 CD-ROM 格式数据存储要求。此外,这种基本工艺流程不仅适用于蓝宝石光盘,同样适用于其它以高度稳定的材料(如石英玻璃)作为基底的光盘。目前,相对于聚碳酸酯(PC)光盘,蓝宝石光盘的制作成本相对较高,因此短时间内很难大规模普及。但是,蓝宝石光盘在长时数据存储中的优异性能使得它在归档数据存储(特别是价值高、具有重要意义的数据)中依然具有较广阔的应用空间。在未来工作中,将努力提高蓝宝石光盘的数据记录密度,优化蓝宝石光盘的制作工艺流程。

## 参考文献:

- [1] 信息技术信息交换和可录类光盘记录媒体:光盘档案寿命的评估试验方法(上)(ISO/IEC 10995-2008)(征求意见稿)[J]. 记录媒体技术, 2010, 03: 24-41. Information technology—Digitally recorded media for information interchange and storage—Test method for the estimation of the archival lifetime of optical media(I) (ISO/IEC 10995-2008) [J]. *China Mediatech*, 2010, 03:24-41. (in Chinese)
- [2] 信息技术信息交换和可录类光盘记录媒体:光盘档案寿命的评估试验方法(中)[J]. 记录媒体技术, 2010, 04: 39-60. Information technology—Digitally recorded media for information interchange and storage—Test method for the estimation of the archival lifetime of optical media(II) [J]. *China Mediatech*, 2010, 04: 39-60. (in Chinese)
- [3] 信息技术信息交换和可录类光盘记录媒体:光盘档案寿命的评估试验方法(下)[J]. 记录媒体技术, 2010, 05: 25-35. Information technology—Digitally recorded media for information interchange and storage—Test method for the estimation of the archival lifetime of optical media(III) [J]. *China Mediatech*, 2010, 05: 25-35. (in Chinese)
- [4] WAN SH G, CAO Q, XIE CH S. Optical storage: an emerging option in long-term digital preservation [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2015, 7(4): 486-492.
- [5] KIM J H, KIM J W. Reliability Estimation of Blu-Ray Recordable Media with Effect of Initial Recording Performance [J]. *Quality & Reliability Engineering*, 2014.
- [6] KRYUCHYN A A, PETROV V V, KOSTYUKOVYCH S O. Is there any future of optical discs [J]. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2013.
- [7] PETROV V, KRYUCHYN A, GORBOV I. High-density optical disks for long-term information storage [C]. *SPIE*, 2011, 8011(1):80112J-80112J-7.
- [8] GORBOV I V. The using of accelerated ageing of the optical media for estimating life expectancy of it [J]. *Data recording, Storage and Processing*, 2009, 10(2):3-12.
- [9] KRYUCHYN A A, PETROV V V, SHANOILO S

- M, *et al.*. Sapphire optical discs for long term data storage[C]. SPIE, 2014;92010C-92010C-9.
- [10] GORBOV I V, BELYAKOVSKY V O. Optical discs carriers for long-term data storage [J]. *Data Recording, Storage and Processing*, 2007, 9(1): 73-87.
- [11] ZHOU G, JESACHER A, BOOTH M, *et al.*. Axial birefringence induced focus splitting in lithium niobate[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17970-5.
- [12] GORBOV I V, PETROV V V, KRYUCHYN A A. Using ion beams for creation of nanostructures on the surface of high-stable materials [J]. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2007, 10(1):27-29.
- [13] GORBOV I V. Basic features of optical media for long-term data storage [J]. *Pomiary, Automatyka, Komputery w Gospodarce i Ochronie rodowiska*, 2010, N. 4:35-37.
- [14] TOPPIN E. Setting a new standart in permanent archival storage [J]. *Digital 2 Disc*, 2010;42-44.
- [15] ZHANG J, GECEVIČIUS M, BERESNA M, *et al.*. 5D data storage by ultrafast laser nanostructuring in glass[C]. *CLEO: Science and Innovations, Optical Society of America*, 2013.
- [16] VRIES J, SCHELLENBERG D, ABELMANN L, *et al.*. Towards gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium[J]. *ArXiv.org*, 2013.
- [17] VANDERLINDE W E, RUOFF A L, KRAMER E J. Diffusion of reactive ion beam etched polymers [J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(2):101-102.
- [18] MADOU M J. *Fundamentals of Microfabrication: the Science of Miniaturization* [M]. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2002.
- [19] <http://www.arnano.fr/the-ultra-long-life-nano-form.html?lang=en>[OL]
- [20] OKINO Y, IRIE M, KUBO T, *et al.*. Estimating a life expectancy of high-density recordable optical disks [C]. *Proceedings of SPIE*, 2005;5966.
- [21] SLATTERY O, LU R, ZHENG J, *et al.*. Stability comparison of recordable optical discs—a study of error rates in harsh conditions[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2004;109:517.
- [22] 邱克强,周小为,刘颖,等. 大尺寸衍射光学元件的扫描离子束刻蚀[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1676-1683.
- QIU K Q, ZHOU X W, LIU Y, *et al.*. Ion beam etching of large aperture diffractive optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1676-1683. (in Chinese)
- [23] 吴娜,谭鑫,于海利,等. 宽波段全息-离子束刻蚀光栅的设计及工艺[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7):1978-1983.
- WU N, TAN X, YU H L, *et al.*. Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):1978-1983(in Chinese).
- [24] GORBOV I V. The influence of substrate's material refractive index on optical media data layer relief depth[J]. *Data recording, Storage and Processing*, 2009, 11(1):3-10.
- [25] METWALLI E E, PANTANO C G. Reactive ion etching of glasses: composition dependence [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2003, 207(1):21-27.
- [26] 邹志强,陈国明,方红丽,等. 反应离子束刻蚀母盘研究[J]. *真空科学与技术学报*, 1999, 10:126-129.
- ZOU ZH Q, CHEN G M, FANG H L, *et al.*. A study of preparing master with reactive ion beam etching [J]. *Vacuum Science and Technology*, 1999, 10:126-129. (in Chinese)

#### 作者简介:



付明磊(1981—),男,天津蓟县人,博士,副教授,硕士生导师,2004年于浙江工业大学获得学士学位,2007年于浙江工业大学获得硕士学位,2010年于浙江工业大学获得博士学位,主要从事微结构光学器件及其信息处理技术方面的研究。E-mail: fuml@zjut.edu.cn



徐武超(1992—),男,浙江台州人,硕士研究生,2014年于天津理工大学获得学士学位,主要从事光学信息存储方面的研究。E-mail: xwc@zjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)