

文章编号: 1001-3806(2007)03-0322-04

二元编码光栅的误差扩散算法研究

程 菊, 苏显渝*

(四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 为了研究二元误差扩散算法, 采用计算机仿真的方法产生光栅模板用于位相测量轮廓术, 分析误差扩散点数和误差分配系数对编码方法和测量精度的影响。结果表明, 应用 3 种常见的误差分配系数用于产生正弦光场都具有较高的测量精度, 三者间没有显著性差异。误差扩散点数对编码方法和相位测量精度的影响较小。实验证明, 采用误差扩散编码后, 系统综合误差可以控制在 1% 的等效波长以内, 验证了二元误差扩散方法的可行性与精确性。

关键词: 衍射光栅; 位相测量轮廓术; 二元编码; 误差扩散算法

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Study on error diffusion algorithm of binary encode grating

CHENG Ju, SU Xian-yu

(Department of Optoeconomics Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract In order to study binary error diffusion algorithm, computer simulation is used to form grating templates which are used in the phase measuring profilometry. The influence of error distributing coefficients and the number of error diffusion points on the precision of encoding and phase measurement is discussed. The results indicate that with the three familiar kinds of error distributing coefficients, the three corresponding sinusoidal structured illumination formed all have relatively high measurement precision and there isn't obvious diversity among them. The influence of diffusion points number on the precision of encoding and phase measurement is relatively small. According to the experiment, the general error of the system can be controlled within 1% of the equivalent wavelength. As a result, the feasibility and accuracy of binary error diffusion method are proved.

Key words diffraction gratings; phase measuring profilometry; binary encode; error diffusion algorithm

引 言

三维面形测量中, 相位测量轮廓术 (phase measuring profilometry, PMP) 是一种重要的测量方法^[1, 2]。该方法中产生标准正弦的投影光场比较困难, 而正弦光场的质量却是影响测量精度的一个关键因素。目前有以下几种主要方法产生正弦强度分布光场: 一是利用两个经扩束和准直的激光束产生干涉, 这种光场具有很大的焦深, 但激光产生的散斑噪声不利于位相展开^[3, 4], 二是采用白光投影正弦透过率光栅, 但制作高精度正弦透过率模板相当困难, 三是采用离焦投影 Ronchi 光栅^[5], 但离焦量需准确调节且导致对比度下降。

作者曾经提出用二元误差扩散编码的方法来得到正弦性较好的光场^[6]。即对光栅进行二元编码, 利用光学系统的低通滤波特性在像面上可以形成高精度的

正弦光场。误差扩散算法作为一种主动 Halftone 技术, 首先由 FLOYD 和 STENBERG 提出^[7]。其基本思想是将已处理元素的量化误差向未处理元素加权扩散, 从而减少整个编码面的量化误差。

作者从误差分配系数和误差扩散点数两方面研究误差扩散算法, 通过计算机仿真讨论这两个因素对编码方法和测量精度的影响。同时还根据算法研究的结果, 设计制作了误差扩散光栅模板, 用于 PMP 实验中, 验证了误差扩散编码方法的可行性与精确性。

1 误差扩散算法

分别对一维和二维误差扩散算法进行讨论。一维误差扩散算法只将量化误差在行方向进行扩散, 而二维误差扩散算法将量化误差在行和列方向同时进行扩散, 可改善光场质量。

设函数 $c(x, y) = 0.5 \left\{ 1 + A(x, y) \cos \left[\frac{2\pi}{p} x - \Phi(x, y) \right] \right\}$,

式中 $A(x, y)$ 是归一化振幅, $0 \leq c(x, y) \leq 1$, p 是结构光场在光栅平面的周期。对 $c(x, y)$ 高密度抽样, 在对每一个像素透过率二值化的同时, 将误差向相邻像素

作者简介: 程 菊 (1983-), 女, 硕士研究生, 现主要从事三维光电传感的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xys@email.scu.edu.cn

收稿日期: 2006-03-22 收到修改稿日期: 2006-06-05

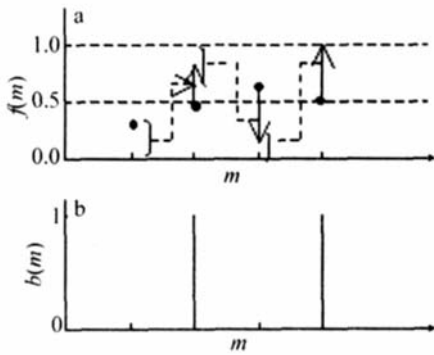


Fig 1 Sketch map of 1-D error diffusion

扩散, 这一个过程可以用图 1a 表示。像素 1 的透过率小于 0.5 被二值化为 0 其剩余误差 (+) 加入第 2 个像素, 由于第 2 个像素原有的透过率加上第 1 个像素的转移误差之和仍小于阈值 0.5 因此仍被二值化为 0。积累的误差 (+) 加上第 3 个像素, 虽然第 3 个像素的原有透过率小于 0.5 但合并前面转移的误差后, 其和大于 0.5 因此被二值化为 1, 由此类推。图 1a 中圆点表示抽样点上的透过率, 箭头表示误差是如何传递到相邻像素的。图 1b 是二值化后的抽样点上的透过率。图 1 以一维情况为例说明了误差扩散的基本过程。图 2 表明了二维图像二值化后误差扩散和校正的

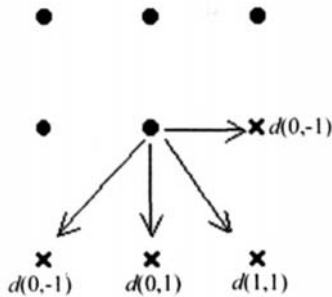


Fig 2 Sketch map of 2-D error diffusion

原理。图中“·”表示已处理过的像素, “×”表示未处理的像素, 每一个像素点二元化后的误差向它相邻的未处理的领域扩散。误差扩散区域内未处理元素的误差扩散的分配系数 $d(m, n)$ 有不同的选择方法, 以下的讨论分析了几种不同误差分配系数的算法精度。

2 误差扩散模板的设计

图 3 和图 4 分别示意了一维和二维误差扩散光栅设计图。其中亮线和亮点表示模板的透光部分, 而暗线和暗点为遮光部分。点或线的分布密度随正弦模板的透过率而变化, 透过率较高的地方亮点或亮线排列密集, 透过率较低的地方暗点和暗线排列紧密。图 5 和图 6 示意了二元模板经适当的低通滤波后, 产生的质量较好的正弦结构照明光场。

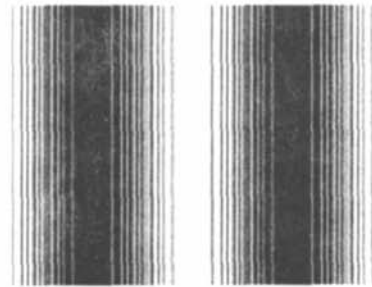


Fig. 3 Plan of 1-D error diffusion template

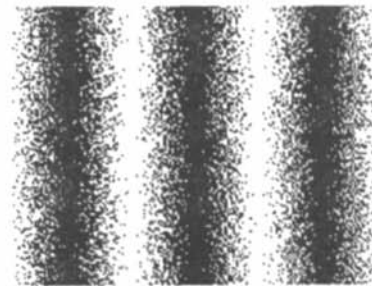


Fig. 4 Plan of 2-D error diffusion template

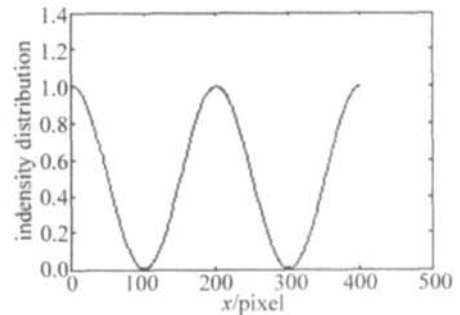


Fig. 5 1-D sinusoidal illumination structure obtained after filtering

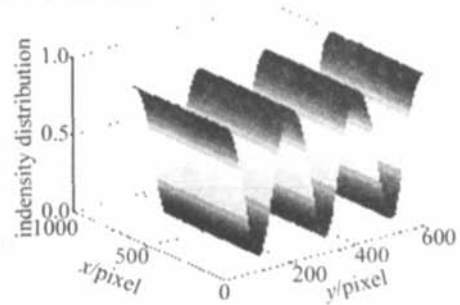


Fig. 6 2-D sinusoidal illumination structure obtained after filtering

2.1 误差扩散点数为 0 的二元编码

误差扩散点数为 0 的情况, 等同于误差分配系数为 0, 对应于普通的二元编码方法。编码中以透过率 0.5 为阈值, 透过率大于 0.5 的采样点被量化为 1, 反之则被量化为 0。这样一个正弦结构就会被量化为一个阶跃型的二元结构光场, 形成罗奇光栅。以一维光栅为例, 从频域分析, 比较有无误差扩散情况下的二元编码方法, 以此说明二元误差扩散算法的优越性。

图 7, 图 8 分别是二元误差扩散编码光栅和罗奇光栅^[8]的规一化频谱。从图中可以看出, 二元误差扩散编码光栅频谱中靠近基频高频分量比罗奇光栅的弱。二元误差扩散编码光栅的零频和基频 (即正弦分

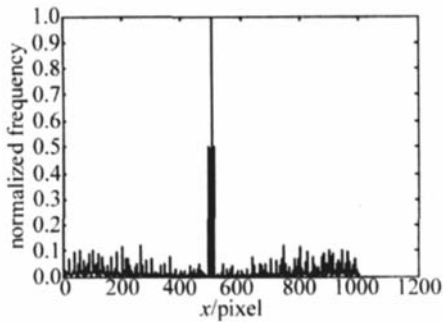


Fig 7 Spatial frequency spectrum of the error diffusion grating

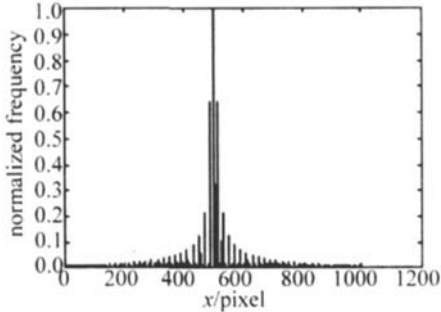


Fig 8 Spatial frequency spectrum of the Ronchi grating

量)的能量占整个功率谱的绝大部分,而相对较弱的高频分量分布在远离基频的高频频段上,这表明了误差扩散在频域的实质是以增加高频频段的量化噪声为条件来压低其低频频段的量化噪声。因此,这种二元模板经适当的低通滤波后,将产生质量较好的正弦结构照明光场。

表 1 中比较了两种光栅在不同采样点数下频域信

Table 2 a—phase errors with error diffusion grating of Floyd-Steinberg rectangle diffusion coefficients b—phase errors with error diffusion grating of Floyd-Steinberg error diffusion coefficients c—phase errors with error diffusion grating of average error diffusion coefficients

a						
phase error(N = 5)	T = 50	T = 100	T = 200	T = 250	T = 400	T = 500
standard	0.0318	0.0160	0.0080	0.0049	0.0040	0.0032
max	0.1074	0.0534	0.0263	0.0253	0.0129	0.0104
b						
phase error(N = 5)	T = 50	T = 100	T = 200	T = 250	T = 400	T = 500
standard	0.0304	0.0168	0.0083	0.0054	0.0060	0.0052
max	0.1171	0.0484	0.0307	0.0107	0.0153	0.0133
c						
phase error(N = 5)	T = 50	T = 100	T = 200	T = 250	T = 400	T = 500
standard	0.0369	0.0154	0.0128	0.0083	0.0056	0.0054
max	0.1070	0.0592	0.0238	0.0128	0.0132	0.0115

应用 3 种常用的误差分配系数编码光栅,算法精度为同一数量级。误差分配系数的不同并不会令相位测量剖面术中的测量相位误差产生根本改变。因而可以得出结论,3 种误差分配系数的编码方法用于产生 PMP 的正弦光场都具有较高的测量精度,三者之间没有显著性差异。

2.3 误差扩散点数的影响

以前的讨论只将编码的量化误差向相邻元素扩

Table 1 SNR of binary error diffusion grating and Ronchi grating

SNR	Ronchi	error diffusion
T = 50	10.7867	63.4224
T = 100	10.3943	81.5064
T = 200	12.8407	117.9932
T = 250	13.7435	629.4679
T = 400	13.6596	415.6394
T = 500	13.8384	627.5125

噪比的不同。从该表可以看出,误差扩散编码光栅的信噪比高于罗奇光栅。

2.2 误差分配系数的讨论

文中比较了 3 种常用的误差分配系数的算法精度。

第 1 种是平均分配误差系数, $d(1, 0) = 1/4$, $d(-1, 1) = 1/4$, $d(0, 1) = 1/4$, $d(1, 1) = 1/4$ 。第 2 种是 Floyd-Steinberg 在 Halftone 技术中提出的误差分配系数: $d(1, 0) = 7/16$, $d(-1, 1) = 3/16$, $d(0, 1) = 5/16$, $d(1, 1) = 1/16$ 。第 3 种是按距离加权的 Floyd-Steinberg 扩散矩形, 距离总权重 $w = 2(1 + \sqrt{2})$, $d(1, 0) = d(0, 1) = \sqrt{2}/w$, $d(-1, 1) = d(1, 1) = 1/w$ 。

分别应用 3 组误差分配系数产生每周期具有不同采样点数的光栅模板,然后用计算机仿真的方法将得到的正弦光场应用于 PMP 中,计算相位误差,见表 2。

从表 2 可以看出,在二维的二元误差扩散算法中,

散,为了研究误差扩散点数对编码方法和测量精度的影响,用计算机仿真的方法增大误差扩散点数,并将编码得到的光栅用于 PMP 中,分析该因素引入的测量精度的差异。

由于二维误差扩散模板多层的误差扩散比较复杂,简便起见,这里只讨论一维误差扩散模板的情况。编码中,误差扩散点数从 1 增大至 4,误差分配系数采用距离加权的方法得到。计算机仿真 5 次相移 PMP

实验,采用具有 20 个周期,每周期 100 个采样点的光栅。表 3 中示意了实验得到的相位测量误差随误差扩散点数的变化情况。

Table 3 Different phase errors(in radians) caused by the change of points number of error diffusion P

phase error ($T=100, N=5$)	$P=1$	$P=2$	$P=3$	$P=4$
standard	0.0118	0.0096	0.0089	0.0104
max	0.0589	0.0614	0.0626	0.0709

实验结果表明,在一维误差扩散算法中误差扩散点数变化并不会带来测量精度的明显变化,即该因素对编码方法和测量精度的影响可以忽略。

3 相位测量误差的实验证实

为了验证二元误差扩散光栅的可行性,将所设计的光栅做成 $36\text{cm} \times 24\text{cm}$ 大小的胶片,完成 PMP 实验,测量一个标准平面并计算相位测量误差。实验系统原理图如图 9 所示,二元误差扩散编码光栅置于工作台,并用微动工作台进行相移,相移的大小由光栅数显仪表示出。

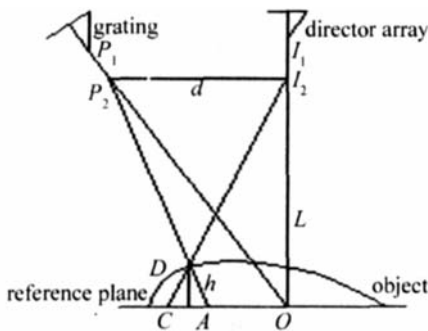


Fig 9 Optical geometry of PMP

光栅投影仪被投影到参考平面上, CCD 接收变形的光栅像并转化为 $482 \times 796 \times 8$ 比特的数字图像存储在计算机中。通过记录 5 帧, $2\pi/5$ 相移的变形光栅像,计算出相应的被测物体高度和相位分布。图 10 示意了 CCD 接收的二维二元误差扩散光栅像。图 11a

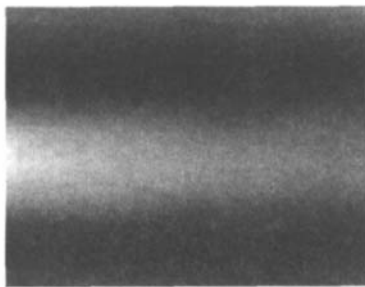


Fig 10 Image of the binary error diffusion grating captured by the CCD

图 11b 中分别给出了沿 CCD 中心行和中心列方向的位相计算误差。用一维和二维光栅进行实验,和标准的正弦光栅的实验结果进行对比,分析误差扩散光栅

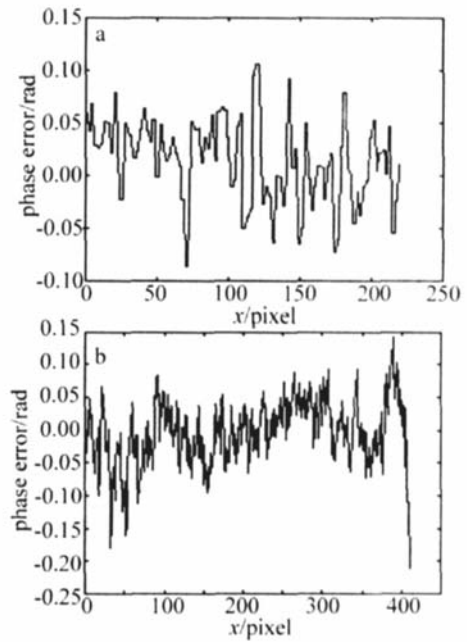


Fig 11 a— errors of the centerline in the horizontal direction b— errors of the centerline in the vertical direction

的引入的误差,从而验证其是否可行。计算位相测量结果,应用二维光栅的效果较好,与标准正弦相差不大,而一维光栅误差较大。这是由于胶片输出设备的分辨率不足造成的,导致一个周期的实际采样点个数无法达到理想值,如果使用光刻等高精度的方法^[9,10],也可以做出达到要求的一维光栅。实验结果表明:当使用每个周期抽样点数为 100 的二元误差扩散光栅时,位相标准差为 $\sigma = 0.0544$ 而应用灰度级从 1 到 256 变化的正弦光栅进行实验时,位相标准差为 $\sigma = 0.0401$ 。实验误差来源于多方面,比如相移不精确, CCD 的热噪声等。这个结果表明采用误差编码后,系统综合误差仍可以控制在 1% 的等效波长以内,验证了二元误差扩散光栅的可行性。

4 结 论

对二元误差扩散编码的方法进行讨论,分析了可能影响二元光栅正弦透过率的几个因素,并将光栅模板做成胶片进行位相测量轮廓术的实验,验证了这种方法的可行性。

分析结果表明,二元误差扩散算法中所研究的 3 种误差分配系数(即平均分配, Floyd-Steinberg 在 Half-ton 技术中采用误差分配,距离加权的扩散矩形)用于产生 PMP 的正弦光场都具有较高的测量精度,三者之间没有显著性差异。误差扩散点数对编码方法和相位测量精度的影响较小,而每个周期的采样点数对于光场正弦性起关键作用,影响测量精度。

范围内,使其能够在不损伤基底和薄膜的前提下迅速完成沉积过程。

图 4 为采用高功率密度、短作用时间的方法所得到的沉积薄膜。虽然该沉积区域面积很小,但仍然存

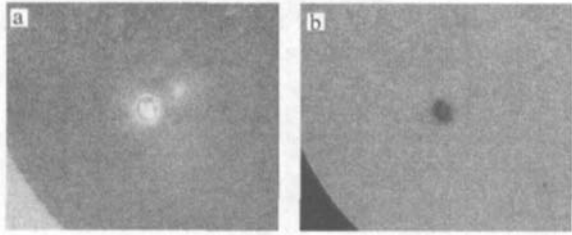


Fig 4 Photographs of film surface growing in the designed chamber (laser intensity: $1.3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, laser radiation time: 1.5s, $\text{Cr}(\text{CO})_6$ temperature: 55C)

a— reflection b— transmission

在光斑能量分布不均匀的问题:沉积区域中心薄膜厚度与边缘相比较薄,这是由于中心功率密度高于边缘功率密度并达到了薄膜的蒸发阈值。然而整个沉积区域形态较好,透射时消光性能良好,且符合上述指标要求。

3 小 结

激光化学气相沉积技术自产生以来一直是研究应用的热点,近年来,其应用领域已从二维平面加工发展到了三维零件成型,应用前景十分广阔。此项技术是目前针对光掩模版亮场缺陷的主要修复手段,特别是其修复精度能满足微电子行业高集成度、高精度的要求,使其成为光掩模版生产过程中不可缺少的一环。

介绍了一套开放式实验系统的结构和组成,并通过实验确定了激光垂直于基底表面时薄膜生长的两个阶段:光解离的诱导过程和热解离的主导过程。根据实验可以得出以下结论:一定的饱和蒸汽压和载气的

流量下,采用高功率密度激光辐射能够在短时间内完成消光性能良好的金属沉积薄膜;激光光斑能量均匀性对沉积薄膜形态影响很大,在沉积形态要求较高的应用中应当保证光斑能量匀化;采用开放式的反应室便于应用于工业生产,特别是针对大幅面的光掩模版的修复,然而也应当特别注意反应室内的惰性环境,避免高温下的金属被氧化;沉积薄膜生成后,应当注意及时调整参数,避免沉积薄膜因热影响或光作用而被破坏。

参 考 文 献

- [1] FENG B. Photomask laser repair technologies [J]. Microfabrication Technology 1994 (4): 7~ 17 (in Chinese).
- [2] NANA IL, KORDAS K, BALIK. Laser induced liquid phase deposition (LCLD); the state of art [J]. SPIE, 2001, 4157: 228~ 248
- [3] CHEN C H, LIU J G. The mechanism of CO_2 laser induced metal deposition from aqueous solution [J]. Laser Technology 2005, 29 (4): 383~ 385 (in Chinese).
- [4] CHEN C H, ZHENG J Sh, LIU J G *et al*. Research of CO_2 laser induced metal deposition from aqueous solution [J]. Plating and Surface Finishing 2003, 90 (5): 84~ 90.
- [5] LYDT N H, WILDEN R. Depositing materials by laser aided technique [J]. Metals and Materials 1973, 7 (4): 159~ 60
- [6] MAZUMDER J ALLEN S D. Laser chemical vapor deposition of titanium carbide [J]. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers 1979: 198: 73~ 80
- [7] DUTY C E. Design, operation, and heat and mass transfer analysis of a gas jet laser chemical vapor deposition system [D]. Georgia Georgia Institute of Technology, 2001: 5~ 6.
- [8] GUY B Z, NKOLAY G, VLADIMIR D *et al*. Photomask clear defects repair using ultrafast laser technology [J]. Proc SPIE, 2004: 5446: 357~ 363.
- [9] HAIGHT R A, LONGO P P, WAGNER A. Method and apparatus for performing laser CVD [P]. U S Patent 6656539B1, 2003-12-02.
- [10] DROZDOW ICZ Z, STONE H, VOGLER J. Photolithographic mask repair system [P]. U S Patent 4778693, 1988-10-18

(上接第 325 页)

参 考 文 献

- [1] SRINIVASAN V, LIU H C, HALDUA M. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Appl Opt 1984, 23 (18): 3105~ 3108.
- [2] SU X Y, von BALLY G, VUKCEVIC D. Phase-stepping grating profilometry utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. Opt Commun, 1993, 98: 141~ 150
- [3] JUDGE T R, BRYANSTON-CROSS P J A. review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. Optical and Lasers in Engineering 1994, 21 (4): 199~ 239.
- [4] SU X Y. Phase unwrapping techniques for 3-D shape measurement [J]. Proc SPIE, 1996, 2866: 465~ 465
- [5] SU X Y, ZHOU W Sh. Phase measuring profilometry with defocusing illumination Ronchi grating [J]. Optoelectronic Engineering 1993, 20 (4): 8~ 16 (in Chinese).
- [6] XIAN T, SU X Y. A phase modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase measuring profilometry [J]. Appl Opt 1999, 40 (8): 1153~ 1158
- [7] BRYNDAHL Q, SCHEERMESSE T, WYROWSKI F. Digital halftone synthesis of binary images [J]. Progress in Optics 1994, 33 (1): 389~ 462.
- [8] TAN X S, SU X Y. Characteristics of the three dimensional distribution of Talbot diffraction field [J]. Optoelectronic Engineering 1996, 23 (2): 35~ 42 (in Chinese).
- [9] CHENG Y L, LIS N, WANG Q. Extreme ultraviolet source of micro lithography based on laser induced plasma and discharge induced plasma [J]. Laser Technology, 2004, 28 (6): 2~ 5 (in Chinese).
- [10] SONG D Y. Research status of deep ultraviolet lithography with 193nm excimer laser [J]. Laser Technology, 1999, 23 (5): 34~ 37 (in Chinese).