

像散对轴棱锥衍射特性的影响与修正^{*}

江新光 吴逢铁[†]

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)
(2007 年 9 月 14 日收到, 2007 年 12 月 3 日收到修改稿)

光束斜入射到轴棱锥上引起的像散将导致其衍射光场发生畸变, 由衍射理论出发推导了受像散影响的轴棱锥衍射光场表达式. 通过模拟不同像散的衍射光斑图和同一像散影响下随轴向距离变化的光强分布图, 分析了轴外像散对轴棱锥衍射特性的影响. 提出修正像散的方法并通过实验验证利用可调精密旋转轴棱锥修正轴外像散导致的光束畸变, 理论分析和实验结果相符合, 研究结果使轴棱锥的应用更加广泛.

关键词: 像散, 贝塞尔光, 轴棱锥, 光束畸变

PACC: 4225, 4230F, 4260K

1. 引 言

轴棱锥(axicon)是 McLeod^[1]于 1954 年提出的光学元件, 它在光学领域有着极其重要的应用^[2-4]. 自 Durmin 提出无衍射贝塞尔(Bessel)光之后, 轴棱锥的一个重要应用就是用它可产生近似无衍射 Bessel 光^[5,6]. 利用轴棱锥系统产生贝塞尔光束的方法具有装置简单, 高转换效率^[7]和高损伤阈值^[8,9]等显著优点, 同时还可以利用轴棱锥产生的贝塞尔光聚焦后生成 bottle beam^[10,11], 实现对微观粒子的操控.

要产生近似无衍射 Bessel 光, 入射光必须严格垂直于轴棱锥. 如果入射光以一定的角度斜入射到轴棱锥, 那么斜入射导致的像散会使轴棱锥焦段面明显扩大^[12,13], 这对轴棱锥应用于测长和准直有很大影响^[14]. 最近, 人们研究利用红、绿、蓝三色光干涉经过轴棱锥形成 Bessel 白光, 这种 Bessel 白光可以应用于生物医学和光显微操纵, 但文章报道得到的 Bessel 白光中心光斑都存在部分分裂(见文献[15]的图 5 和文献[16]的图 2), 并不是很理想的近似无衍射 Bessel 光, 这是受轴棱锥轴外像散或加工误差的影响^[13,17]. 因此研究像散对轴棱锥衍射特性的影响并修正像散, 对无衍射 Bessel 光的应用很有意义.

Tanaka 把轴棱锥等价于环缝-傅里叶变换透镜

进行分析, 利用波像差理论和点扩散函数分析了像差对轴棱锥衍射特性的影响, 研究结果表明轴棱锥的衍射特性只受像散的影响跟彗差无关^[13], 但是并未提出修正轴棱锥像散的方法. 本文理论上从另外一个角度分析, 由衍射理论和像差理论出发根据轴棱锥的振幅透过率, 利用稳相法^[18]推导出受像散影响的轴棱锥的衍射光场表达式, 通过模拟受不同像散影响的衍射光斑图和同一像散影响下不同轴向距离的光强分布图, 详细地分析像散对轴棱锥产生近似无衍射光束的影响. 利用空间光调制器能实时动态弥补像散^[19], 这里我们选择利用可调精密旋转轴棱锥来修正像散导致的光束畸变, 并通过修正实验进行了实验验证, 这种方法还可以用来修正轴棱锥椭圆加工误差对光束畸变的影响^[17]. 因此在光学扫描系统中, 通过设计可调精密旋转轴棱锥就很容易修正像散而得到高质量的图形.

2. 理论分析

首先由衍射理论出发, 引入像散因子, 利用稳相法推导受像散影响的轴棱锥产生畸变无衍射光束的光场分布表达式.

考虑一薄轴棱锥(如图 1), 它的振幅透过率为

$$t(\rho) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)\gamma\rho] & (\rho \leq R), \\ 0 & (\rho > R), \end{cases} \quad (1)$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60477041)和福建省自然科学基金(批准号: A0710011, A0410017)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ftwu@public.qq.fj.cn

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光波波矢, n 和 γ 分别为轴棱锥的折射率和底角(锥面与底面的夹角), R 是通过轴棱锥的光束半径.

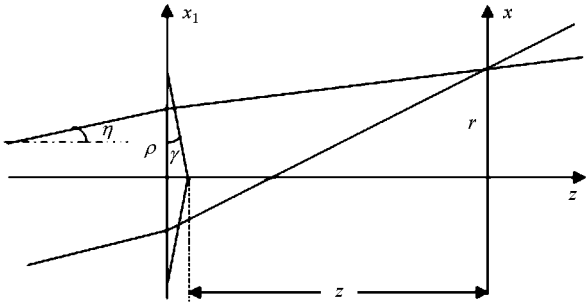


图1 轴棱锥的斜入射

利用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分.若入射光束为高斯光束,其场分布 $E(\rho) = \exp(-\rho^2/w^2)$ 其中 w 为光束腰斑半径.

考虑到存在轴外像散^[13]

$$W(\rho, \varphi; R_1) = CR_1^2 \rho^2 \cos^2 \varphi, \quad (2)$$

其中 $C = knl \sin \eta$ (η 为入射光与光轴的夹角)^[18], R_1 为像斑的光斑半径.

则入射光可表示为

$$E(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) e^{i\mathcal{K} CR_1^2 \rho^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma \rho}. \quad (3)$$

根据柱坐标下标量菲涅耳衍射积分公式

$$E(r, z) = \frac{\exp[ikz]}{i\lambda z} \int_0^R E(\rho) \exp\left\{i\frac{k}{2z}[\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\theta - \varphi)]\right\} \rho d\rho d\theta, \quad (4)$$

这里 ρ, φ 为源径向距离和方位角, r, θ 为场的径向距离和方位角, z 是轴向距离, 坐标原点取在轴棱锥的顶点处.

把(3)式代入到(4)式有

$$E(r, \theta, z) = \frac{\exp[ikz]}{i\lambda z} \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) e^{i\mathcal{K} CR_1^2 \rho^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma \rho} \times \exp\left[ik\left(\frac{\rho^2}{2z} + \frac{r^2}{2z} + \frac{\rho r \cos(\varphi - \theta)}{z}\right)\right] d\rho d\varphi. \quad (5)$$

进一步整理,可以得到 z 处的衍射光场为

$$E(r, \theta, z) = \frac{\exp\left[ikz\left(z + \frac{r^2}{2z}\right)\right]}{i\lambda z} \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) \times e^{i\mathcal{K} CR_1^2 \rho^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma \rho}$$

$$\times \exp\left[ik\left(\frac{\rho^2}{2z} + \frac{\rho r \cos(\varphi - \theta)}{z}\right)\right] d\rho d\varphi. \quad (6)$$

因为常数项只影响光强大小而不影响衍射光斑的分布,故可不用考虑.利用稳相法,可以简化(6)式为

$$E(r, \theta, z) = \int_0^{2\pi} \rho_p \exp\left(-\frac{\rho_p^2}{w^2}\right) e^{i\mathcal{K} CR_1^2 \rho_p^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma \rho_p} \times \exp\left[ik\left(\frac{\rho_p^2}{2z} + \frac{\rho_p r \cos(\varphi - \theta)}{z}\right)\right] d\varphi, \quad (7)$$

这里 ρ_p 是稳相点.其中(6)式中的相位项可表示为

$$f(\rho) = CR_1^2 \rho^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma \rho + \frac{\rho^2}{2z} + \frac{\rho r \cos(\varphi - \theta)}{z}.$$

对 ρ 进行求导 $f'(\rho) = 2CR_1^2 \rho \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma + \frac{\rho}{z} + \frac{r \cos(\varphi - \theta)}{z}$.

令 $f'(\rho) = 0$ 即可求得稳相点为

$$\rho_p = \frac{(n-1)z\gamma + r \cos(\varphi - \theta)}{2zCR_1^2 \cos^2 \varphi + 1}, \quad (8)$$

因此,在最大准直距离内的光强可表示为

$$I(r, \theta, z) = |E(r, \theta, z)|^2. \quad (9)$$

3. 计算机模拟分析

利用(7)(8)和(9)式可以模拟不同像散因子 CR_1^2 影响下的衍射光斑图以及相同像散不同轴向距离的衍射光斑图.

图2为不同像散影响模拟的衍射光斑图.从模拟的光斑图可以看出,没有像散的理想情况下,通过轴棱锥形成的是近似无衍射 Bessel 光;存在像散时,衍射光斑将发生畸变.随着像散因子的增加,中心光斑逐渐向外环分裂.当 $CR_1^2 = 0.01$ 时,中心光斑强度就有所减弱,且第二环光环已经存在微小分裂,当像散增加到 0.015 时,可以明显看到第二环光斑的分裂迹象.在 $CR_1^2 = 0.02$ 时,光斑第二环完全分裂成 4 个光斑,且亮度跟中心光斑亮度差不多.当 $CR_1^2 = 0.04$ 时,中心光斑光强几乎为零,与此同时,第三环已经分裂成 8 个光斑.如果再增大像散因子的值,则可形成规则地光斑阵列(如图 2(f)所示).从图 2 的整体来看,光强最大的光斑会随着像散因子的增加逐渐从中心向外环转移.

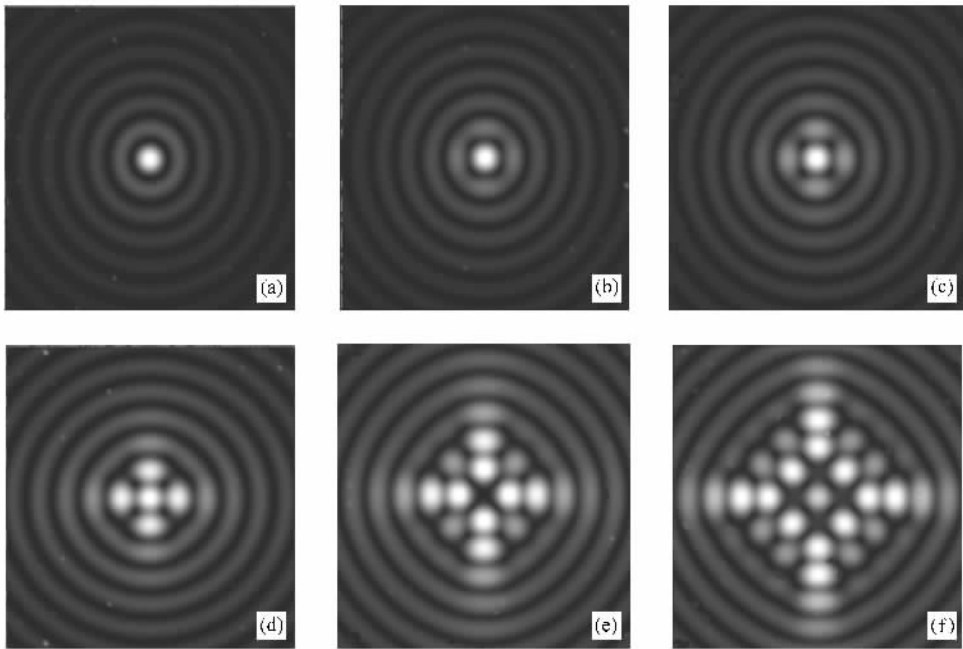


图 2 不同像散影响的模拟衍射光斑图 (a);(b)0.01;(c)0.015;(d)0.02;(e)0.04;(f)0.06

在相同的模拟参数条件下,比较轴棱锥斜入射下的衍射光斑图^[12,17],容易得出,模拟受像散影响的不同衍射光斑图与斜入射角近似为 $\eta = 0.0^\circ, 4.0^\circ, 4.5^\circ, 5.0^\circ, 7.0^\circ$ 和 10.0° 模拟的衍射光斑图是类似的.

为了更清楚的观察衍射光斑的变化情况,我们模拟了同一像散影响条件下,随轴向距离变化的衍射光强分布图(如图 3 所示). 其中图 3(a)是理想情况下轴棱锥形成的近似无衍射 Bessel 光纵向剖面光强分布图,图 3(b)为像散 $CR_1^2 = 0.04$ 时经过轴棱锥后的衍射光场随轴向距离变化的纵向剖面光强分布图.

图 3 指出,不存在像散时,衍射场为近似无衍射 Bessel 光场,在无衍射距离范围内光强分布基本不随轴向距离变化;存在像散情况下,光束开始还是近似无衍射 Bessel 光,但随着轴向距离的增加,光场会发生畸变,中心光斑在一定传播距离内会消失,接着又会重现,但强度明显减弱,光斑一环一环规则地向外分裂,形成有规则的阵列形状.

众所周知,由像差的衍射理论知道,存在像散时,像空间中会形成切向焦面和弧矢焦面,衍射图案会呈现比较复杂的形状,并具有纵横交叉的干涉条纹. 所以像散存在时,经过轴棱锥的衍射光场会发生很大的改变(如图 2 和图 3 所示).

通过比较圆形轴棱锥斜入射^[12]和椭圆加工误

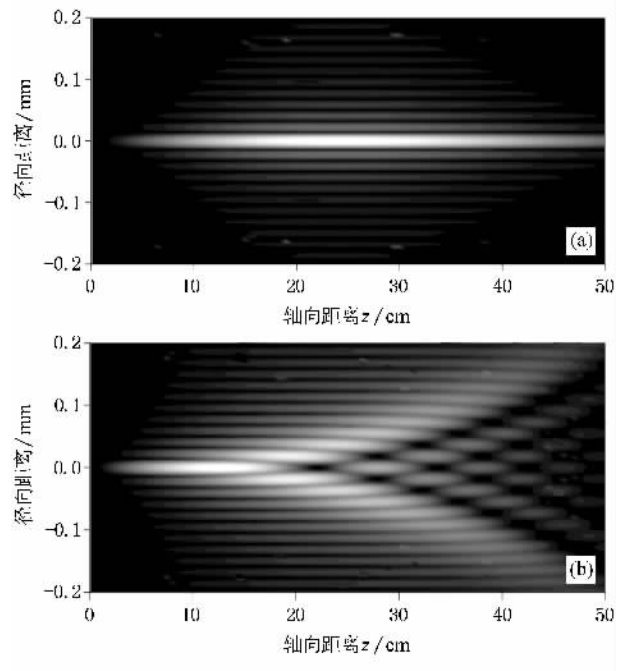


图 3 光强分布随轴向距离变化的衍射光斑图

差^[17]的衍射光斑图,知道它们造成的光束畸变是等价的. 我们已经研究了轴棱锥椭圆加工误差对光束畸变的影响,在理论和实验上都证明了利用可调精密旋转轴棱锥可以修正光束畸变. 而轴棱锥受像散影响时,从像散因子的表达式知道($CR_1^2 = R_1^2 knl \sin \eta$),如果调整轴棱锥使 η 角趋于零,则像散

因子就会趋于零. 因此利用可调精密旋转轴棱锥动态的旋转调整入射光与轴棱锥的角度, 就可以达到修正像散的效果. 所以实验设计可调精密旋转轴棱锥能大大减小轴棱锥受像散的衍射限制.

4. 实 验

首先从实验上得出像散影响下轴棱锥形成的衍射光斑图, 再通过微型可调旋转轴棱锥动态的旋转修正像散对衍射光束的影响.

实验中采用 3mW He-Ne 激光 (波长 632.8 nm) 作为光源, 输出光经过透镜扩束准直后入射到锥角 $\gamma = 2^\circ$ 的石英轴棱锥 (其折射率 $n = 1.458$) 上, 而轴棱锥镜架固定在精密旋转台上 (旋转台的技术指标: 最

小刻划 1° , 最小读数 $2'$), 经轴棱锥的出射光投影到旋转屏上, 再使用具有 40 倍放大功能的 CCD 体视显微镜, 调整可变衰减, 即可拍摄到不同斜入射角引起的轴外像散影响的衍射光斑图. 图 5 为距轴棱锥顶点 $z = 200$ mm 处拍摄的光斑图, 实验结果跟理论模拟结果基本符合.

在相同实验条件下, 我们对入射角为 5° 的斜入射引起的像散进行了修正. 实验采用精密旋转台控制旋转轴棱锥, 当入射光斜入射到轴棱锥上, 在 $z = 200$ mm 处平面上拍摄到畸变的衍射光斑图如图 6 (a) 所示, 与理论模拟结果是相符合的. 微调精密旋转轴棱锥, 使入射光与轴棱锥基本垂直, 图 6 (b) 为同一轴向距离处拍摄的修正衍射光斑图 (即近似理想的无衍射 Bessel 光斑图).

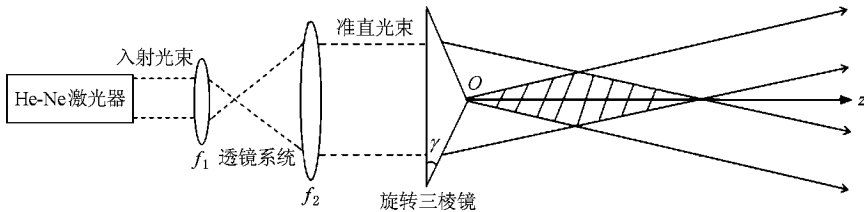


图 4 高斯型光束经透镜 $f_1 = 15$ mm 和 $f_2 = 45$ mm 扩束后照射轴棱锥产生近似无衍射 Bessel 光的实验装置图

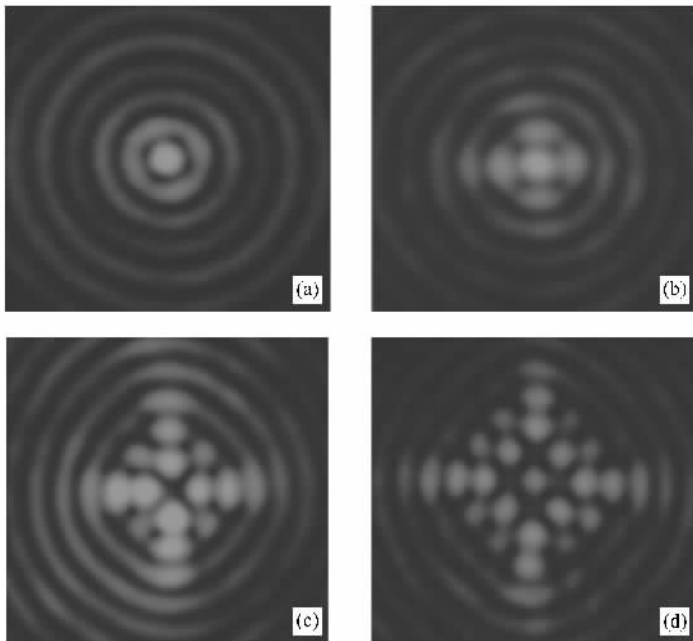


图 5 实验拍摄的不同入射角经过圆轴棱锥的衍射光斑图 (a) $\eta = 0^\circ$ (b) $\eta = 5^\circ$ (c) $\eta = 7^\circ$ (d) $\eta = 10^\circ$

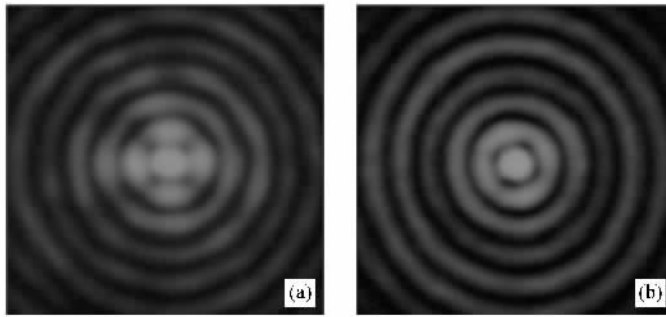


图 6 存在像散时轴棱锥的衍射光斑图和实验修正后的光斑图

5. 结果与讨论

文章由衍射理论和像差理论出发推导受像散影响的轴棱锥衍射光场表达式,理论模拟分析了像散对轴棱锥形成近似无衍射 Bessel 光的影响.可以看到,随着像散的增加,衍射中心光斑规则的逐渐向外分裂,并从实验中拍摄了受像散影响的衍射光束畸

变图形.提出修正衍射畸变光束方法,在实验中通过设计可调精密旋转轴棱锥修正了斜入射带来的像散对光束质量的影响,修正效果基本理想.因此,利用可调精密旋转轴棱锥动态的旋转修正轴外像散,可大大减小轴棱锥受轴外像散的限制,使轴棱锥在准直和测长以及产生 Bessel 白光和 bottle beam 等方面的应用更具实效性.

- [1] McLeod J H 1954 *J. Opt. Soc. Am.* A **44** 592
- [2] Jarutis V, Matijošius A, Smilgevičius V, Stabinis A 2000 *Opt. Commun.* **185** 159
- [3] Cacciapuoti L, Angelis M de, Pierattini G 2001 *Eur. Phys. J.* **14** 373
- [4] Herman R M, Wiggins T A 2002 *J. Opt. Soc. Am.* A **19** 116
- [5] Durmin J 1987 *J. Opt. Soc. Am.* A **4** 651
- [6] Scott G, McArdle N 1992 *Opt. Eng.* **31** 2640
- [7] Angelies M D, Cacciapuoti L, pierattini G, Tino G M 2003 *Opt. Lasers Eng.* **39** 283
- [8] Wu F T, Chen Y B, Guo D D 2007 *Appl. Opt.* **46** 4943
- [9] Wu F T, Chen Y B, Guo D D, Zhang J R 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1073 (in Chinese)[吴逢铁、陈云彬、郭东栋、张建荣 2007 中国激光 **34** 1073]
- [10] Zeng X H, Wu F T, Liu L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 791 (in Chinese)[曾夏辉、吴逢铁、刘 岚 2007 物理学报 **56** 791]
- [11] Zhang L, Cai Y J, Lu X H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1777 (in Chinese)[张 蕾、蔡阳健、陆璇辉 2004 物理学报 **53** 1777]
- [12] Zhao B, Li Z 1998 *Appl. Opt.* **37** 2563
- [13] Tanaka T, Yamamoto S 2000 *Opt. Commun.* **184** 113
- [14] Jaroszewicz Z 1997 *SPIE Polish Chapter Research and Development Series* Vol. 5, 1997
- [15] Fischer P, Brown C, Morris J 2005 *Opt. Express.* **13** 6657
- [16] Fischer P, Little H, Smith R L 2006 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** 477
- [17] Jiang X G, Wu F T, Liu B 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1538 (in Chinese)[江新光、吴逢铁、刘 彬 2007 中国激光 **34** 1538]
- [18] Born M, Wolf E 2005 *Principles of Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p197, p744
- [19] Jaroszewicz Z, Climent V, Duran V, Lancis J, Kololdziejczyk A, Burvall A, Friberg A T 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 2185

Influence of astigmatism on the diffraction property of the axicon and its correction^{*}

Jiang Xin-Guang Wu Feng-Tie[†]

(*College of Information Science & Engineering , Huaqiao University , Quanzhou 362021 , China*)

(Received 14 September 2007 ; revised manuscript received 3 December 2007)

Abstract

The diffraction field will show aberration if an axicon has astigmatism for beams incident at an angle. In this paper , the diffractive optical field expression of an axicon with astigmatism was derived based on the diffraction integral theory. The influence of the astigmatism on the diffraction property of the axicon was analyzed through the numerical simulation of the diffraction pattern with different astigmatism and the optical intensity distribution along the propagation direction for a given astigmatism. The method of correcting the beam aberration caused by the astigmatism is proposed and realized by the experiment using a precise tunable rotator. Experimental results agree with the theoretical analysis. The result extends the field of applications of the axicon.

Keywords : astigmatism , Bessel beam , axicon , beam aberration

PACC : 4225 , 4230F , 4260K

^{*} Project supported by the National Science Foundation of China (Grant No. 60477041) and Natural Science Foundation of Fujian Province , China (Grant Nos. A0710011 , A0410017).

[†] Corresponding author. E-mail : ftwu@public.qz.fj.cn