

激光准直特性在主动式激光侦察告警系统设计中的应用探讨

李广东¹, 张海庄², 王德飞², 刘志林²

(1. 中国人民解放军63893部队, 河南 洛阳 471003; 2. 中国人民解放军63889部队, 河南 孟州 454750)

摘要: 探讨了主动式激光侦察告警系统入射高斯光束腰斑与望远镜副镜的距离对出射高斯光束准直倍率的影响。在满足入射高斯光束腰斑与望远镜副镜的距离远大于望远镜副镜的焦距的条件下, 望远镜主镜的焦距与望远镜副镜的焦距的比值越大, 出射高斯光束的准直效果越好。在不满足入射高斯光束的腰斑与望远镜副镜的距离远大于副镜的焦距的条件下, 仿真分析了望远镜水平方向的装调误差对高斯光束准直光斑尺寸的影响。望远镜主镜的前焦面与高斯光束经过副镜后的焦平面的位置偏差对激光准直特性的影响进行了数值仿真。对于激光准直光学系统的设计、装调及其在主动式激光侦察告警系统中的应用提供了理论依据, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 激光侦察告警系统; 激光准直; 高斯光束; 准直倍率

中图分类号: V556.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2011)08-0079-05

Application of Laser Alignment Characteristics in Design of Active Laser Reconnaissance/Warning Systems

LI Guangdong¹, ZHANG Haizhuang², WANG Defei², LIU Zhilin²

(1. No. 63893 Unit of PLA, Luoyang 471003, China; 2. No. 63889 Unit of PLA, Mengzhou 454750, China)

Abstract: The distance between incident Gaussian laser beam waist radius of the active laser reconnaissance/warning system and the secondary telescope mirror has an effect on the collimation ratio of the outgoing Gaussian beam. If the distance is much larger than the focal length of the secondary telescope mirror, the ratio of the primary telescope mirror and the secondary telescope mirror will be greater, and the outgoing Gaussian beam collimation will get better. Simulation was made for the situation that the distance is not much larger than the focal length of the secondary telescope mirror, and the influence of the telescope horizontal alignment errors on the Gaussian beam spot size of collimator was analyzed. The effect of the position deviation between the front focal plane of the primary mirror and the focal plane of Gaussian beam through the secondary plane on the laser alignment characteristic was also studied through numerical simulation. The result provides a theoretical basis for the design and alignment of laser alignment optical system in the active laser detection and alarm system.

Key words: laser reconnaissance/warning system; laser alignment; Gaussian beam; alignment ratio

0 引言

随着激光技术的广泛应用, 激光束传输与变换已经成为激光光学中的一个重要研究课题^[1-8], 越来越多的激光物理试验对激光高斯光束的指向稳定性提出了严格的要求^[9-17]。在许多实际应用技术中, 需要在

一定范围内调节高斯光束准直光斑的大小。例如, 主动式激光侦察告警系统在探测远距离目标时的作用距离, 首先取决于激光发射系统发射的激光束质量^[18]。为改善光束的方向性, 提高远距离目标处的激光能量密度, 需要压缩高斯光束发散角, 使其与探测系统的跟踪精度相匹配。在满足发散角和光束宽度的前提下, 要求系统的准直倍率具有可调性, 以便于探测系统能够根据距离远近来完成相应的光斑尺寸的调节。针对主动式激光侦察告警系统的设计, 从理论上探讨了光斑调节方法, 其输出近似为基横模高斯光束, 能够在—

收稿日期: 2010-07-16

修回日期: 2010-10-27

作者简介: 李广东(1982—), 男, 河南太康人, 硕士, 工程师, 主要从事光电对抗与光电技术的研究。

定范围内调节准直光斑大小,即通过沿光轴移动望远镜系统位置来改变光斑的准直倍率,以满足激光探测系统的调节需要。

1 主动式激光侦察告警系统效应模型

主动式激光侦察告警系统的工作原理是:主动发射准直高斯激光束对作战区域扫描,光波直接作用到敌方光电探测设备光敏面上,利用敌方探测系统存在的“猫眼”效应,即入射光束经光学系统到达“眼底”(探测器光敏面)后,由于“眼底”的反射作用,使反射光束沿入射方向返回,对敌方光电探测设备的工作特征进行识别分析。主动式激光侦察告警系统一般配有回波信号处理装置和测距装置,根据回波信号的强度并结合测距信息,可区分敌方光电探测设备是离焦系统还是焦平面系统,离焦系统多用于激光导引头和激光角跟踪设备,焦平面系统多用于成像探测设备。

根据激光的准直特性和远场传播特性,可将激光束视为平行光束,“猫眼”光学系统可简化为单透镜和一个平面反射镜组成的理想光学系统,根据平面反射的对称特性作轴向展开,其光束传播路径如图1所示。图1中实线表示探测器光敏面,虚线表示焦平面位置,阴影区域为损耗部分,其余区域为通过光学系统并有效反射的部分。设探测器光敏面与焦平面的位置偏差(即离焦量)为 δ ,定义光敏面位于焦平面左侧时, $\delta < 0$,反之 $\delta > 0$ 。图1中分别绘出了离焦量 $\delta = 0$ 、 $\delta < 0$ 、 $\delta > 0$ 的3种情形。显然, $\delta = 0$ 时,光束原路返回, $\delta < 0$ 及 $\delta > 0$ 时,光束发散。

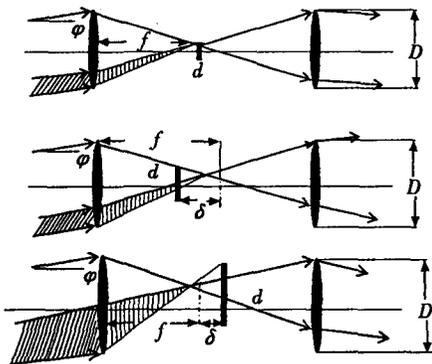


图1 “猫眼”系统光学传播路径

Fig.1 Optical transmission path of “Cat Eye” system

入射光束与接收系统轴向夹角为 φ ,口径为 D ,焦距为 f ,光敏面尺寸为 d ,则焦平面系统视场角为

$$\alpha_1 = 2\arctan(d/2f) \quad (1)$$

对于离焦系统,定义光敏面上光斑外缘与光敏面外缘重合时的入射光束圆锥角为视场角,则其视场角为

$$\alpha_1 = 2\arctan[(df + \delta D)/(2f^2 + 2f\delta)] \quad (2)$$

假定入射光束在“猫眼”光学系统视场内,且入射光为严格的平行光,可利用几何光学的光线追迹^[19]理论,得到“猫眼”光学系统的光束能量通过率 η 、出射光束发散角 θ_1 。

2 主动式激光侦察告警系统高斯光束准直倍率的影响因素

所谓高斯光束的准直,就是改善光束的方向性,压缩光束的发散角。高斯光束的远场发散角 θ 与光束束腰半径 ω_0 的关系为^[20]

$$\theta = \lambda/\pi\omega_0 \quad (3)$$

式中: λ 为入射激光的波长; π 为常数。由式(3)可知,束腰半径越大,远场发散角越小。由高斯光束聚焦特点可知,当入射光的束腰处在透镜的焦距附近时,出射光的束腰半径和入射光的束腰半径成反比^[20]。因此,如果预先用一个短焦距的透镜将高斯光束聚焦,以便获得极小的光斑,然后再用一个长焦距的透镜来改善其方向性,就可得到很好的准直效果。图2所示的第1个透镜是短焦距的凸透镜,利用它先把入射光束的束腰半径由 ω_0 缩小到 ω'_0 。第2个透镜是长焦距凸透镜,它的焦平面近似与 ω'_0 的位置重合。由于 $\omega'_0 < \omega_0$,故这样得到的 ω''_0 比直接用第2个透镜将 ω_0 进行变换所得到的结果要大。

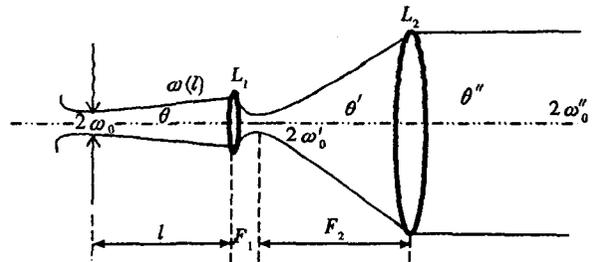


图2 主动式激光侦察告警系统对高斯光束的变换
Fig.2 Transformation of Gaussian beam in active laser detection and warning system

设透镜1、2的焦距分别为 f_1 、 f_2 。 f_1 为短焦距透镜(称为副镜)的焦距,当满足条件 $l \gg f_1$ 时,可将物镜高斯光束聚焦于副镜后焦面上,得一极小光斑为

$$\omega'_0 = \frac{\lambda f_1}{\pi\omega(l)} \quad (4)$$

式中: l 为入射光束束腰与副镜之间的距离; $\omega(l)$ 为入射在副镜表面上的光斑半径。由于 ω'_0 近似落在长焦距透镜(主镜)的前焦面上,所以腰斑为 ω'_0 的高斯光束将被主镜很好地准直。整个系统的准直倍率可被计算如下。

以 θ 表示入射高斯光束的发散角, θ' 表示经过副镜后的高斯光束的发散角, θ'' 表示出射高斯光束的发

散角,则该望远镜对高斯光束的准直倍率 M 定义为

$$M = \frac{\theta}{\theta''} = M' \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda l}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (5)$$

式中, $M' = f_2/f_1$ 为望远镜的准直倍率(或称几何压缩比)。

一个望远镜中 $f_1 = 2.5 \text{ cm}, f_2 = 20 \text{ cm}, \lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}, \omega_0 = 0.28 \text{ mm}, 80 \text{ cm} \leq l \leq 90 \text{ cm}$; 由式(5)可知, $18.2858 \leq M \leq 20.1541$ 。因此,一个给定望远镜对高斯光束的准直倍率 M 不仅与望远镜本身的结构参数有关,而且还与入射高斯光束的结构参数以及其腰斑与副镜的距离有关。通过调节 l 可以在一定范围内改变准直光斑的大小。在满足 $l \gg f_1$ 的条件下, M 与 l 的关系曲线如图 3 所示。另外, $f_2 > f_1$, 所以 $M \geq M' > 1$ 。即 $\theta'' = \theta/M' < \theta$ 。这说明出射光束的发散角比入射光束的发散角小了。 M' 越大,准直效果越好。

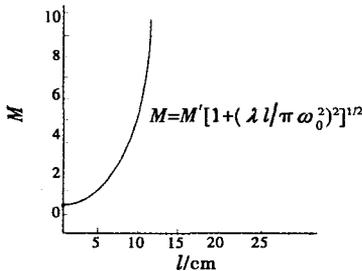


图 3 M 与 l 的关系示意图

Fig. 3 Relationship between M and l

在不满足 $l \gg f_1$ 的条件下,由薄透镜对高斯光束的变换特点可知,望远镜对高斯光束的准直倍率 M 与入射高斯光束的 l 之间的关系更加清晰完整^[21];高斯光束通过薄透镜的变换可以在满足薄透镜假设的基础上,用薄透镜的成像公式进行计算。在 l 和 ω_0 确定的情况下,只要将长焦距凸透镜(主镜)的前焦面调节到近似与 ω_0' 的位置重合,同样能够得到好的准直效果。就长焦距凸透镜(主镜)的前焦面与 ω_0' 的位置偏差 x 对于高斯光束的准直倍率 M 的影响进行了仿真分析,见图 4。

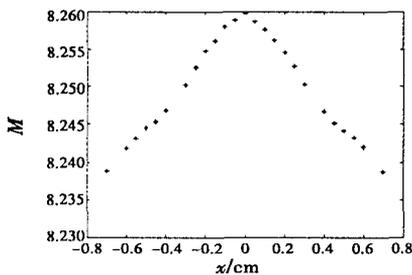


图 4 主镜的前焦面与高斯光束腰斑的位置偏差对准直倍率的影响

Fig. 4 The effect of position deviation between the front focal plane of primary mirror and the Gaussian beam waist on the rate of alignment

假设 $l = 10 \text{ cm}, f_1 = 2.5 \text{ cm}, f_2 = 20 \text{ cm}, \lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}, \omega_0 = 0.28 \text{ mm}$; 当 $-0.7 \text{ cm} \leq x \leq 0.7 \text{ cm}$ 时,可以得到 $8.2388 \leq M \leq 8.2598$ 。

3 装调误差对主动式激光侦察告警系统高斯光束准直光斑尺寸影响的仿真

设计高斯光束准直光学系统时,透镜装调误差是一个很重要的影响因素。透镜装调误差往往存在两个方面,即水平方向的装调误差和竖直方向的装调误差。由于高斯光束的光强集中在中心部分,并且高斯光束准直光学系统往往由多个透镜组成,因此舍弃透镜边缘的小部分。这里重点分析一下由两个透镜组成的望远镜系统的水平方向的装调误差 α 对高斯光束准直光斑尺寸的影响,多个透镜组成的高斯光束准直光学系统与此类似。根据薄透镜对高斯光束的变换特点可知^[22],水平方向透镜装调误差 α 和高斯光束出射光斑 ω_0'' 的大小之间存在以下联系。

$$\frac{1}{\omega_0''} = \frac{1}{\omega_0'} \left\{ \left[1 + (f_2 + \alpha)/f_2 \right]^2 + \left(\frac{\pi \omega_0'^2}{\lambda} \right)^2 / (f_2 + \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中: ω_0' 为入射高斯光束经望远镜副镜后的光束腰斑半径; f_2 为望远镜主镜的焦距大小; $(f_2 + \alpha)$ 为 ω_0' 与望远镜主镜的距离。不失一般性,假定 $\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}, \omega_0' = 0.03 \text{ m}, -0.003 \text{ m} \leq \alpha \leq 0.003 \text{ m}, 0.23 \text{ m} \leq f_2 \leq 0.31 \text{ m}$,在 f_2 取不同数值的情况下,就水平方向装调误差 α 对出射光束腰斑 ω_0'' 大小的影响进行分析。仿真发现,在光源参数和准直光学系统一定的情况下,水平方向透镜装调误差 α 和出射光束腰斑 ω_0'' 之间近似成线性关系,如图 5 所示。

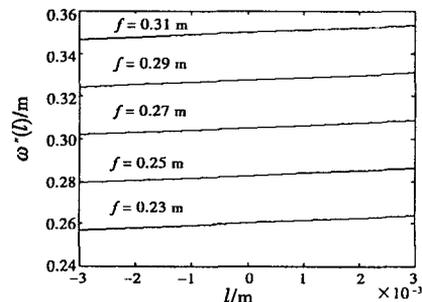


图 5 水平方向透镜装调误差对高斯光束准直光斑大小的影响

Fig. 5 Effect of the horizontal alignment errors on the size of collimated Gaussian beam spot

装调误差 α 对输出光束准直性能的影响的定量分析需要考虑装调平行度对输出光束的影响,光束腰斑和发散角之间的关系等多种因素,这对高斯光束传输特性的应用研究更具现实意义,将在之后的工作中继续深入研究。

4 主动式激光侦察告警系统高斯光束准直光学系统的设计

4.1 高斯光束准直光学系统的组成及要求

高斯光束准直光学系统主要由透镜、透镜的支撑结构、镜座3部分组成。表面质量、平行度等是透镜的重要指标。表面质量应是透镜没有或少有刻痕及疵点;平行度应优于 $10''$,否则,透镜将对高斯光束的透射产生影响,改变透射光的强度分布以及峰值强度的大小和位置;不平行度越大,影响越明显。军用激光器由于受体积和重量的限制,通常采用铝质整体骨架结构和紧凑的安装结构,整个支架常常用整块的金属加工而成。固体激光器的透镜都是安装在可以调整的镜座或调整架上的。好的镜座要求在两个方向的调节是互不影响、正交的。调整过程和调整好的镜座应是无间隙的,并有足够的分辨率。另外,设计镜座时必须考虑其稳定性,包括热稳定性和机械稳定性。

4.2 高斯光束准直光学系统的设计

高斯光束准直光学系统的设计主要是确定透镜组的焦距 f_1 和 f_2 ,设计应根据具体应用需要而定,但在设计时必须考虑镜筒长度、透镜尺寸和装调误差的要求^[23]。就实际工程的应用来说,镜筒的长度不应太大,主要由 f_1 、 f_2 决定。一般说来,尺寸超过1m的透镜加工就很困难,当光斑等于或大于透镜的孔径时,要想通过提高准直倍率来无限制地压缩高斯光束的发散角是不可能的,这时出射光斑的发散角由透镜的孔径决定。

激光器出射高斯光束的发散角如图6所示,发散角越小,物方孔径角也就越小;发散角越大,物方孔径角也就越大。如果系统物方孔径角全部包容,则系统数值孔径就较大,那么系统的体积变得很大,使得像差校正更加困难。由于高斯光束的光强集中在中心部分,可以舍弃边缘的小部分,如图7所示。

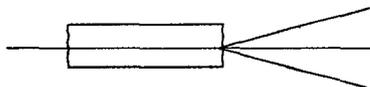


图6 激光器发光示意图

Fig. 6 Schematic diagram of laser light

如果一个望远镜系统的准直效果不够理想,可以采用多个望远镜系统,使高斯光束得到多次的放大和准直。这时望远镜系统中的副镜宜采用凹透镜,这样可以使透镜系统更加紧凑。应当说明,对应激光等强光源,为避免因为聚焦而产生空气击穿现象,其光学系统应尽量避免具有实焦点。在保证准直的前提下,使用最合适的数值孔径,使得系统在准直性能发射效率以及体积等方面协调统一,获得一个满意的设计。

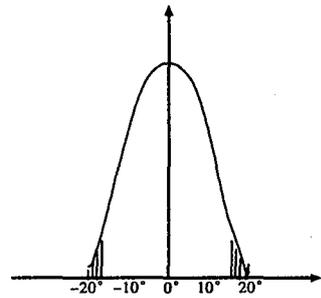


图7 高斯光束被切割示意图

Fig. 7 Schematic diagram when Gaussian beam is cut

5 结束语

随着激光技术应用的日益普及,激光高斯光束传输与变换的研究越来越深入。在满足发散角和光束宽度的前提下,要求系统的准直倍率具有可调性,以便于探测系统能够根据距离远近来完成相应的光斑尺寸的调节。研究结果对于激光准直光学系统的设计、装调及其在主动式激光侦察告警系统中的应用提供了理论依据,具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 周胜国,沈学举. 扩束准直光学系统中光学元件失调对高斯光束传输变换的影响分析[J]. 应用光学,2008(2):253-256.
- [2] 赵延伸,宋丰华,孙华燕. 高斯光束的激光变焦扩束光学系统设计[J]. 装备指挥技术学院学报,2007(5):85-89.
- [3] 楼越焕,何平安. 基于圆衍射条纹的激光准直系统设计[J]. 光学与光电技术,2009,7(5):59-62.
- [4] 张永利,潘留占,孙金锋. 平顶高斯光束通过光阑-透镜分离系统的焦移[J]. 激光技术,2010,34(2):258-260,264.
- [5] 谷锁林,赵延伸. 高斯光束通过猫眼逆反射器的变换特性[J]. 激光与红外,2008,32(4):320-323.
- [6] 周胜国,沈学举. 高斯光束通过失调空间滤波器的传输特性[J]. 激光与红外,2008,38(1):17-19.
- [7] 王自鑫,李亨,李佳明. 一种高精度激光光路自动准直系统的实现[J]. 应用激光,2009,29(5):423-426,430.
- [8] 周中亮. 高斯光束大气传输规律的数值分析[J]. 激光技术,2009,33(1):47-50.
- [9] 董进. 机载激光雷达的背景辐射抑制技术研究[J]. 电光与控制,2009,16(7):62-64.
- [10] 孙露,王建立,王鸣浩. 激光主动照明成像实验研究[J]. 电光与控制,2009,16(9):77-79.
- [11] 叶庆,孙晓泉,程玉宝. 激光制导信号的批次分选与码型识别技术研究[J]. 电光与控制,2009,16(10):70-74.

- [12] 应家驹,王永仲,何永强,等. 全向激光告警系统中激光光斑定位方法[J]. 电光与控制,2009,16(12):53-57.
- [13] 庞春颖,张涛. 激光主动成像探测距离的成像与仿真[J]. 电光与控制,2008,15(12):70-73.
- [14] 张金生,王仕成,高智杰,等. 激光制导武器仿真系统视线角精确识别控制研究[J]. 电光与控制,2005,12(4):19-23.
- [15] 黄勇,邓建辉. 高能激光武器的跟踪精度要求分析[J]. 电光与控制,2006,13(6):86-88,107.
- [16] 辛维娟,高明,杜玉军. 多波长激光扩束器的光学设计[J]. 光学仪器,2007(3):31-34.
- [17] 高鸿雁. 激光自准直角度测量系统建模方法研究[J]. 测试技术学报,2007(1):6-12.
- [18] 谷锁林,孙华燕,张永基,等. 空中目标的激光主动探测[J]. 激光与红外,1996,26(1):30-31.
- [19] 王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):651-655.
- [20] 陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 杭州:浙江大学出版社,2004:217-223.
- [21] 陈家璧. 激光原理及应用[M]. 北京:北京电子工业出版社,2007:82-84.
- [22] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京:科学出版社,2007:47-49.
- [23] 卢毅,何友金,任建存,等. 高斯光束聚焦光学系统研究[J]. 光电技术应用,2006(2):5-8.

(上接第59页)

总之,随着中波红外玻璃制备技术提升和性能突破,综合性能优异的中波红外光学玻璃将获得更大应用,并将成为未来红外光学材料家族中的重要成员。

参考文献

- [1] HWA L G, CHANG Y R, CHAO W C. Infrared spectra of lanthanum gallogermanate glasses[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 85(1):158-162.
- [2] KOBAYASHI K. Development of infrared transmitting glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 316(2-3):403-406.
- [3] GAN F. Optical properties of fluoride glasses: A review[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 184(1):9-20.
- [4] LUCAS J, CHANTHANASINH M, POULAIN M, et al. Preparation and optical properties of neodymium fluorozirconate glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1978, 27(2):273-283.
- [5] BENHAMIDECHE C, BOUTARFAIA A, POULAIN M. Fluoroaluminate glasses[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 366(1-2):233-240.
- [6] FLÓREZ A, ULLOA E M, CABANZO R. Optical properties of Nd³⁺ and Er³⁺ ions in fluoro-phosphate glasses: Effects of P₂O₅ concentration and laser applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 488(2):606-611.
- [7] SUNG Y M, KWON S J. Glass-forming ability and stability of calcium aluminate optical glasses[J]. Journal of Materials Science Letters, 1999, 18(15):1267-1269.
- [8] CORMIER L, NEUVILLE D, CALAS G. Structure and properties of low-silica calcium aluminosilicate glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2000, 274(1):110-114.
- [9] HARRIS D C. Durable 3 ~ 5 μm transmitting infrared window materials[J]. Infrared Physics and Technology, 1998, 39(4):185-201.
- [10] 李玉林,杨广治,王世焯. 透6 μm无锆铝酸钙红外光学玻璃[J]. 光学精密工程, 1987, 95(2):29-34.
- [11] JIANG X, LOUSTEAU J, RICHARDS B, et al. Investigation on germanium oxide-based glasses for infrared optical fibre development[J]. Optical Materials, 2009, 31(11):1701-1706.
- [12] BAYYA S S, HARBISON B B, SANGHERA J S, et al. BaO-Ga₂O₃-GeO₂ glasses with enhanced properties[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1997, 212(2-3):198-207.
- [13] CAO G X, LIN F Y, HU H F, et al. A new fluorogermanate glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 326-327(1):170-176.
- [14] JEWELL J M, BUSSE L E, CRAHAN K, et al. Optical properties of BaO-Ga₂O₃-GeO₂ glasses for fiber and bulk optical properties[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1994, 2287, 154-163.
- [15] KUBUKI S, NISHIDA T, KAUNG P, et al. Application of the IR transmission method and the mossbauer effect to the crystallization of calcium gallate glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1997, 209(1-2):87-95.
- [16] SHELBY J E. Lead gallate glasses[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1988, 71(5):254-256.
- [17] DUMBAUGH W H, TYNDELL B P. Lead gallate glasses[P]. U. S. Patent, No. 4483931, 1984.
- [18] CHAGRAOUI A, TAIRI A, AJEBLI K, et al. New tellurite glasses and crystalline phases in the Bi₂O₃-CaO-TeO₂ system: Synthesis and characterization[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495(1):67-71.
- [19] KAUR A, KHANNA A, PESQUERA C, et al. Preparation and characterization of lead and zinc tellurite glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2010, 356(18-19):864-872.