

# 不同反射率光纤光栅再生过程及温度特性研究

丁旭东<sup>1</sup>,张钰民<sup>1</sup>,骆飞<sup>1</sup>,祝连庆<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心;

<sup>2</sup>现代测控技术教育部重点实验室;<sup>3</sup>北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室

**摘要:** 针对再生光栅在高温退火后存在较低反射率导致高温测量受限的问题,采用 244nm 氩离子激光制作两支栅区长度分别为 10mm 和 25mm 的种子光栅,使用超高温箱式炉对种子光栅进行 900℃ 的快速高温退火处理。在擦除初始种子光栅后制备出高温再生光栅,并在 200℃ - 900℃ 温度范围内对高温退火后的两支再生光栅的高温传感特性进行实验测试。结果表明:在 900℃ 温度稳定环境中测试 100min,10mm 再生光栅中心波长的稳定度为 4pm,反射率为 19.03%;25mm 再生光栅中心波长的稳定度为 8pm,反射率高达 84.13%;在 200 - 900℃ 温度范围内,两支再生光栅温度线性度较好,相关系数均在 0.998 以上;温度灵敏度系数分别为 15.23pm/℃ 和 15.24pm/℃;栅区长度为 25mm 的再生光栅更适合用于制作高温传感器。

**关键词:** 再生光栅;高温退火;反射率;温度灵敏度;透射深度

**中图分类号:** TG806;TH741;TN253

**文献标志码:** A

## Study on Regeneration Process and Temperature Characteristics of Fiber Grating with Different Reflectivity

Ding Xudong, Zhang Yumin, Luo Fei, Zhu Lianqing

**Abstract:** In this paper, the regenerated grating has the lower reflectivity after high temperature annealing, which limits the application of high temperature measurement. Two regenerated seed gratings are fabricated by using 244nm Ar<sup>+</sup> laser, with the grating length of 10mm and 25mm respectively. The seed gratings are annealed at 900℃ in the ultrahigh temperature box-type furnace, and the high temperature regenerative gratings occur after the initial seed gratings are vanished. The high temperature sensing characteristics of two regenerated gratings after high temperature annealing are tested under the condition of 200℃ - 900℃. The results show that the center wavelength shift of the 10mm regenerative grating is 4pm with the reflectivity of 19.03%; the center wavelength shift of the 25mm regenerative grating is 8pm with the reflectivity of 84.13%, both of them are in a stable temperature environment with 100 min at 900℃. The linearity of the two non-encapsulated regenerative grating sensors is better, when correlation coefficients are both above 0.998 at 200℃ - 900℃, and the temperature sensitivity coefficients are 15.23pm/℃ and 15.24 pm/℃ or so. The regenerative grating with a grating length of 25mm is more suitable for packaging high temperature sensors.

**Keywords:** regenerated grating; high temperature annealing; reflectivity; temperature sensitivity; transmission depth

## 1 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器由于具有高稳定性、高灵敏度、抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、重量轻等优点<sup>[1,2]</sup>而在结构健康监测业备受青睐<sup>[3-6]</sup>。FBG传感器的这些特点十分符合航空航天、电力监测、石油化工以及机械制造等高温领域的应用要求<sup>[7]</sup>。目前国内外对于在高温环境中的FBG传感研究主要有再生光栅<sup>[8]</sup>、蓝宝石光栅<sup>[9,10]</sup>以及II型光栅<sup>[11]</sup>等。通过对I型FBG进行

高温热处理从而获得再生光栅,且再生光栅能够在1400℃的高温环境中长期稳定<sup>[12]</sup>,其制备过程简单、成本低,可应用于高温条件下的温度检测。

对于再生光栅的形成机理及其在实际中的应用,国内外研究者进行了大量相关研究。2003年,瑞典的Fokine M. A.<sup>[13]</sup>报道了一种新型的耐高温FBG,将其命名为“化学组分FBG”;2009年,Lindner E.等<sup>[14]</sup>将紫外非载氢的高掺锗光纤光栅在700℃恒温条件下热处理150min,所得再生光栅的反射率高达74%。2011年,Bandyopadhyay S.等<sup>[15]</sup>将FBG进行935℃加热处理实验,实验所得的再生光栅的反射率为35%。2012年,香港理工大学的Shao L. Y.等<sup>[16]</sup>研究了再生FBG的重复性,并提出了再生FBG的生产工艺,这一报道促进了再生FBG在实际

基金项目:北京市教委2015年度创新能力提升计划(TJSHG201510772016);北京市优秀人才培养资助项目(2015000020124G074)  
收稿日期:2017年9月

中的应用;2016年,哈尔滨工业大学的 Xie W. 等<sup>[17]</sup>提出在高达 1000℃ 的高温环境中,利用 SiO<sub>2</sub> 热再生光纤来测量超高温陶瓷材料的应变,结果显示在高于 700℃ 时,应变传递系数值在 0.616 - 0.626 之间缓慢变化。无论光纤是否载氢都能进行再生实验,但是通常载氢能够使光纤的再生效率提高<sup>[18]</sup>。再生光栅的反射率与光纤的载氢增敏情况、光纤的数值孔径大小、I 型 FBG 的反射率高低和光纤加热过程等有关,其中种子光栅的反射率越高,所得的再生光栅也就越强<sup>[19]</sup>。

本文针对再生 FBG 在高温退火后具有较低反射率问题,对不同栅区长度再生 FBG 的演化过程及温度特性进行研究。通过对两支栅区长度不同的 I 型紫外载氢种子光栅进行快速高温退火处理实验,对比研究了再生光栅的栅区长度与反射率之间的关系;在 200℃ - 900℃ 温度范围内,对两支再生光栅的光谱进行记录,并进行了数据拟合。实验结果表明,25mm 再生光栅在 900℃ 的环境中可以保持中心波长和反射光强的稳定,且具有高达 84.13% 的反射率,在 200℃ - 900℃ 温度范围内表现出良好的温度特性,为再生光栅应用于高温领域提供依据。

## 2 实验设备及技术方案

### 2.1 I 型光纤布拉格种子光栅的制备

对康宁单模光纤(SMF-28)进行载氢处理,即将光纤置于 80℃、11MPa 的高压载氢装置中保存 4 天。将光纤进行载氢处理能够降低光栅的热稳定性,从而使光栅擦除更容易,也更容易形成再生光栅,并且能够得到强度更大的再生光栅<sup>[20]</sup>。之后使用波长为 244nm 氩离子紫外激光器对光纤进行刻写,利用相位掩模板干涉法得到 I 型种子光栅,栅区长度分别为 10mm 和 25mm。其透射和反射光谱如图 1 所示。

### 2.2 FBG 高温再生实验系统

由紫外激光器刻写的种子光栅进行高温热处理实验装置系统见图 2。将种子光栅在不受任何外力作用下平直放入高温箱式炉中,当宽带光源发出宽带光并从环形器和 3dB 耦合器进入光纤光栅中。由光纤光栅反射回的光谱通过 3dB 耦合器之后再分别进入光谱分析仪 1 和解调仪中,FBG 传感器透射光进入光谱分析仪 2 中,进行中心波长监测。实验系统中所用的超高温箱式炉的型号为 TMX-12L-12,其温度上限为 1100℃,误差为 ±1℃,实时温度通过耐高温热电偶进行检测并记录;BaySpec 解

调仪的波长解调范围为 1525 - 1565nm,分辨率为 1pm;光谱分析仪的型号为 AQ6370D,其光谱分辨率 0.02nm。

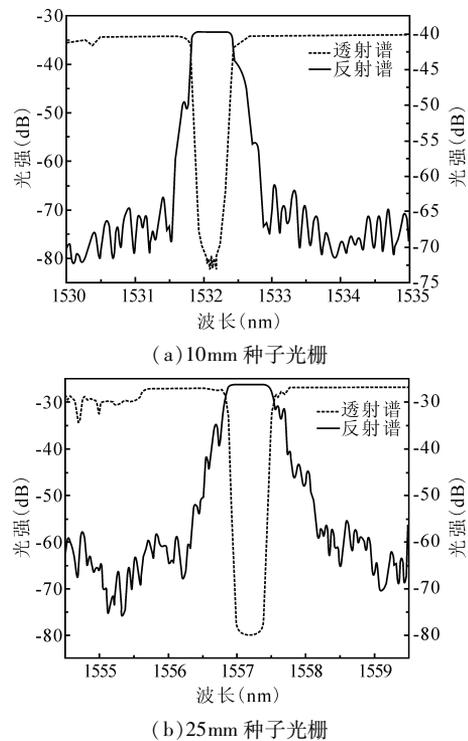


图 1 不同栅区长度的种子光栅反射光谱及透射光谱

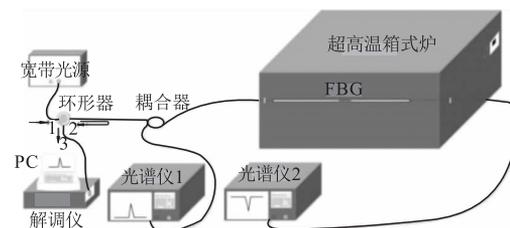


图 2 实验装置

将紫外激光器刻写的 Type I 型 FBG 放入超高温箱式炉中,将超高温箱式炉温度设定为 900℃,使炉温从室温直接升到设定温度,并保持其温度恒定,利用光谱分析仪和解调仪分别连续记录在升温 and 恒温过程中的光栅光谱。高温再生实验装置实物见图 3。



图 3 实验装置

## 3 光栅再生过程及结果分析

利用热处理实验装置对初始种子光栅进行高温

退火处理实验,记录光栅完全被擦除所需的时间、光栅生长所需的时间以及其光强达到饱和所需的时间,分析其反射率的大小以及中心波长的变化情况,不同栅区长度的光栅再生过程中温度和反射强度随时间变化的曲线见图4。

由实验记录可知,在升温过程中,超高温箱式炉从室温升高到900℃所用时间为19min,并保持该温度恒定。在保温过程中,保持炉温在900℃下不变,该温度为初始FBG的擦除温度。在升温过程和保温过程,初始光栅的反射强度随着时间增大逐渐降低,直至初始光栅被完全擦除,经过一段时间会在原初始位置形成一个新的光栅,即为再生光栅。由图4a可知,在900℃恒温条件下保持23min,初始种子光栅消失,在此温度条件下经过34min,光栅再次出现;在900℃恒温条件下保持约200min时,再生光栅的强度达到饱和并基本保持不变。由图4b可知,在900℃恒温条件下保持37min时,初始种子光栅消失,在此温度条件下经过12min,光栅再次出现,在900℃恒温条件下保持约200min时,再生光栅的强度达到饱和并基本保持不变。

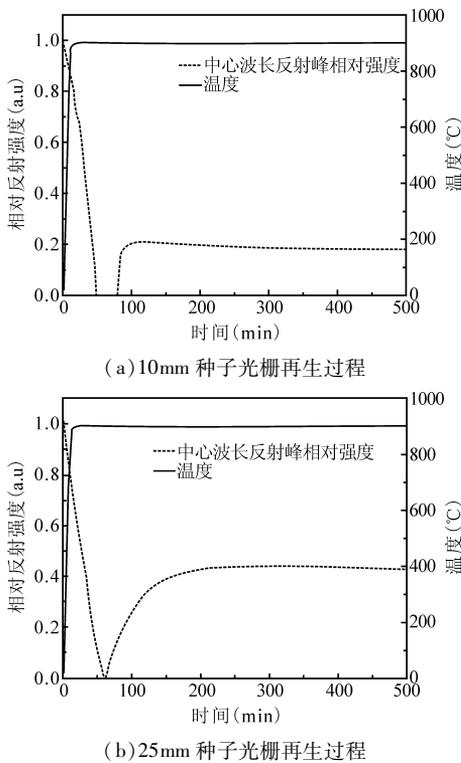
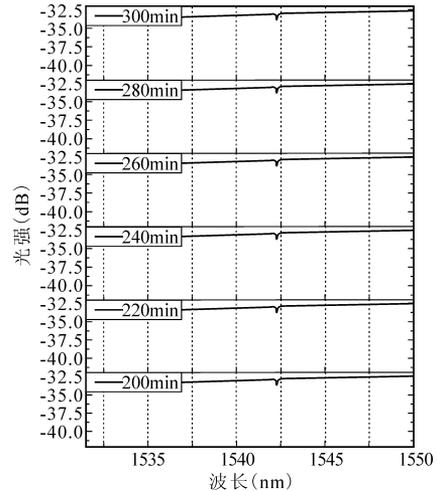


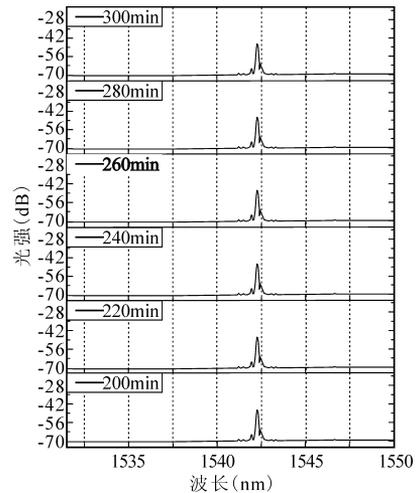
图4 不同栅区长度的光栅再生过程中温度和反射强度随时间变化曲线

图5a为10mm栅区长度的再生光栅在900℃长时间温度稳定下的透射光谱图,其FBG平均透射深度为0.917dB,反射率为19.03%。由图5b可知,在900℃时光谱图形一致性较好,反射光谱没有出现退

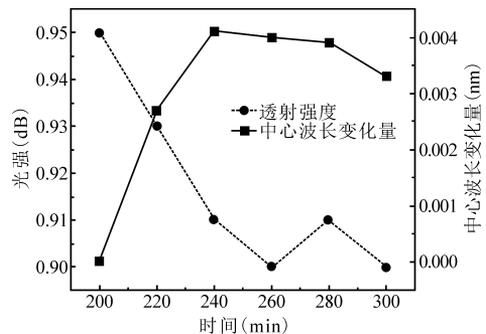
化和啁啾现象,中心波长平均值为1542.2749nm。由图5c可知,随着时间的增加,透射深度和中心波长变化量较小,透射深度最大变化量仅为0.05dBm,中心波长最大变化量仅为4pm,基本保持在动态平衡范围内。



(a) 透射光谱



(b) 反射光谱

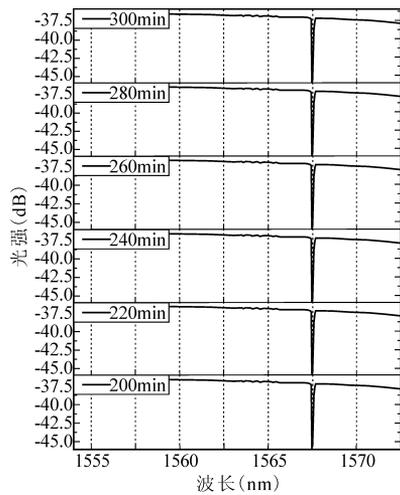


(c) 透射深度与中心波长相对变化量随时间变化曲线

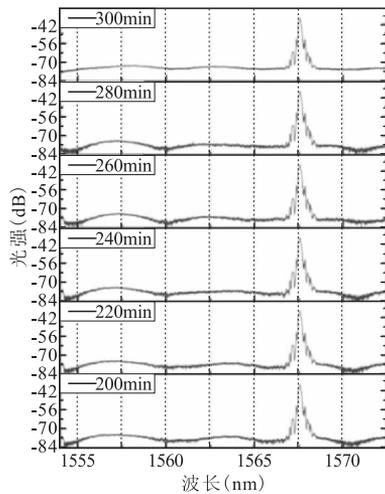
图5 在900℃条件下10mm栅区的再生光栅特性曲线

图6a为25mm栅区长度的再生光栅在900℃长时间温度稳定下的透射光谱图,其FBG平均透射深度为8.24dB,反射率为84.13%。由图6b可知,在900℃时光谱图形一致性较好,反射光谱没有出

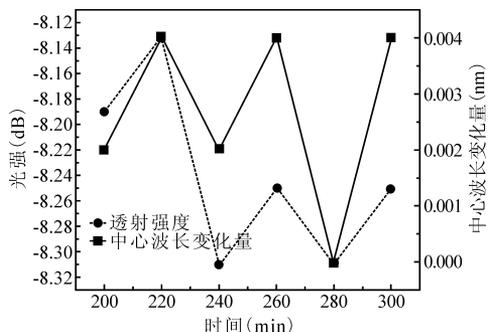
现退化和啾啾现象,中心波长平均值为1556.9747nm;由图6c可知,随着时间的增加,透射深度和中心波长变化量较小,透射深度最大变化量仅为0.18dB,中心波长最大变化量仅为8pm,基本保持在动态平衡范围内。这些波动都在可接受的误差范围内,并且可以改进。在相同实验条件下,25mm 栅区长度的再生光栅相比于10mm 栅区长度的再生光栅具有更高的反射率,这是因为种子光栅栅区长度越长,退火之后其反射率越高<sup>[21]</sup>。



(a) 透射光谱



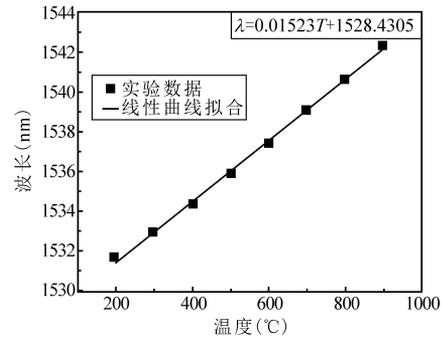
(b) 反射光谱



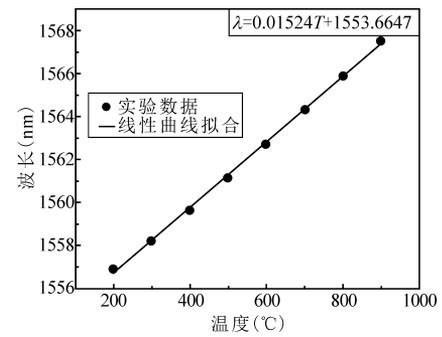
(c) 透射深度与中心波长相对变化量随时间变化曲线

图6 在900℃条件下25mm 栅区的再生光栅特性曲线

实验中,温度变化范围为200℃ - 900℃,并间隔100℃记录光栅光谱,根据实验数据,绘制图7所示不同温度条件下、不同栅区长度的再生光栅中心波长随温度变化的曲线图。



(a) 10mm



(b) 25mm

图7 不同栅区长度的再生光栅中心波长随温度升高变化曲线

由图7可知,当温度升高时,中心波长随温度的升高而增大,并且在200℃ - 900℃范围内中心波长具有良好的温度稳定性和线性度。如图7a所示,10mm 栅区长度的再生光栅温度灵敏度相关系数为0.9985,温度灵敏度系数在线性变化区间平均值为15.23pm/℃;如图7b所示,25mm 栅区长度的再生光栅温度灵敏度相关系数为0.9987,温度灵敏度系数在线性变化区间平均值为15.24pm/℃。由此可知,再生光栅在200℃ - 900℃范围内温度灵敏度系数波动性较小,基本为常数,可以用于900℃以下环境中的温度测量。

### 4 结语

本文通过对两支栅区长度不同的再生种子光栅进行快速高温退火处理,对得到的再生光栅的透射光谱及反射光谱进行分析。对两支再生光栅在200℃ - 900℃的温度范围内进行高温传感特性研究。

实验结果表明:在900℃快速高温退火处理时,25mm 栅区的种子光栅相比于比10mm 栅区的种子光栅其光栅擦除时间更长,且形成再生光栅所需时

间更短;在 900℃ 长时间温度稳定环境中,25mm 再生光栅相比于 10mm 再生光栅具有更高的反射率;在 200℃ -900℃ 温度范围内,两支再生光栅的线性度较好,相关系数均在 0.998 以上,其温度灵敏度系数在线性变化区间平均值为分别为 15.23pm/℃ 和 15.24pm/℃ 左右。栅区长度为 25mm 的 FBG 相比于栅区长度为 10mm 的 FBG 更适合用于制作高温传感器。因此,通过选取特定长度的再生种子光栅制备高反射率再生光栅的大规模生产是可行的,但应用在超高温领域时,需考虑合理的传感器封装形式。

### 参考文献

- [1] 王景凡,刘芳芳,陈丽娟,等. FBG 微应变测量系统的相位解调技术研究[J]. 工具技术,2015,49(4):82-84.
- [2] Zhang Z, Yan L, Pan W, et al. Sensitivity enhancement of strain sensing utilizing a differential pair of fiber Bragg gratings[J]. Sensors,2012,12(4):3891-3900.
- [3] Kinet D,Goossen K W,Qiu L,et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions [J]. Sensors, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [4] 岳音,王源,段建立,等. 光纤光栅 CFRP 混凝土复合拱裂缝监测实验研究[J]. 中国激光,2015,42(8):156-162.
- [5] 郑文宁,庄炜,姚齐峰,等. 基于准分布式 FBG 阵列的大型机械结构应变监测研究[J]. 工具技术,2017,51(6), 103-106.
- [6] 晏克俊,代猛,缪丽萍. 基于光纤光栅的小量程称重传感器设计[J]. 工具技术,2014,48(9):69-72.
- [7] Mihailov S J. Fiber bragg grating sensors for harsh environments[J]. Sensors,2012,12(2):1898-1918.
- [8] Xie W, Meng S, Jin H, et al. Measurement of the high-temperature strain of UHTC materials using chemical composition gratings[J]. Measurement Science & Technology,2016, 27(5):055-101.
- [9] Habisreuther T, Elsmann T, Graf A, et al. High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order bragg gratings[J]. IEEE Photonics Journal,2016,8(3):1-8.
- [10] Xiao H, Deng J, Pickrell G, et al. Single crystal sapphire fiber-based strain sensor for high temperature applications [J]. Journal of Lightwave Technology,2003,21(10):2276-2283.
- [11] Fielder R S, Stinsonbagby K L, Palmer M E. Harsh-environment fiber optic sensors for structural monitoring applications [C]//Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering,2003.
- [12] Yang H Z, Qiao X G, Das S, et al. Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400℃ using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber [J]. Optics Letters,2014,39(22):6438-6441.
- [13] Fokine M A. Laser induced sub-micron changes of the chemical composition of SiO<sub>2</sub>-based optical fibers [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,2003.
- [14] Lindner E, Chojetzki C, Brueckner S, et al. Arrays of regenerated fiber Bragg gratings in non-hydrogen-loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks [J]. Sensors,2009,9(10):8377-8381.
- [15] Bandyopadhyay S, Canning J, Biswas P, et al. A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing [J]. Optics Express, 2011, 19(2):1198-1206.
- [16] Shao L Y, Wang T, Canning J, et al. Bulk regeneration of optical fiber Bragg gratings [J]. Applied Optics, 2012, 51(30):7165-7169.
- [17] Xie W, Meng S, Jin H, et al. Measurement of the high-temperature strain of UHTC materials using chemical composition gratings [J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(5):055-101.
- [18] Cook K, Shao L Y, Canning J. Regeneration and helium-regenerating Bragg gratings in helium-loaded germanosilicate optical fibre [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(2):1733-1742.
- [19] Canning J. Regenerated gratings for optical sensing in harsh environments [C]//Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides,2012.
- [20] Bandyopadhyay S, Canning J, Biswas P, et al. A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing [J]. Optics Express, 2011, 19(2):1198-1206.
- [21] Canning J, Stevenson M, Fenton J, et al. Strong regenerated gratings [C] International Conference on Optical Fiber Sensors, 2009.

第一作者:丁旭东,硕士研究生,北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心,100016 北京市

First Author: Ding Xudong, Postgraduate, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China

通信作者:祝连庆,博士,教授,北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心,100016 北京市

Corresponding Author: Zhu Lianqing, Doctor, Professor, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China