

# 9 W 全固态连续单频 1.34 $\mu\text{m}$ Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

杨小平 王春香 冯晋霞 张宽收

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 设计并研制了全固态连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器。利用 880 nm 激光二极管双端端面偏振抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,通过腔镜镀膜抑制 1.06  $\mu\text{m}$  激光振荡和环形激光谐振腔的设计优化使激光器稳定单向行波运转,实验获得了输出功率达 9 W 的连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光输出,光-光转换效率达 18%。激光器在 4 h 内的功率稳定性优于  $\pm 1\%$ ,在 1 min 内的频率漂移为 8.5 MHz,输出激光的光束质量  $M^2$  因子为 1.03。

**关键词** 激光器;1.34  $\mu\text{m}$  激光;连续单频

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602019

## 9 W All-Solid-State Continuous-Wave Single-Frequency 1.34 $\mu\text{m}$ Nd:YVO<sub>4</sub>

Yang Xiaoping Wang Chunxiang Feng Jinxia Zhang Kuanshou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** An all-solid-state continuous-wave (CW) single-frequency 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> laser is designed and fabricated. Based on a polarized and dual-end pumping scheme, a Nd:YVO<sub>4</sub> crystal is directly pumped by an 880 nm laser diode, the 1.06  $\mu\text{m}$  laser is suppressed by the coating of cavity mirrors, and a ring resonator is designed. The measured maximum output power of 9 W at 1.34  $\mu\text{m}$  is obtained with optical-optical conversion efficiency of 18%. The stability of the output power is better than  $\pm 1\%$  over a period of 4 h and the frequency shift is less than 8.5 MHz in 1 min. The output beam is almost diffraction limited with a measured beam quality of  $M^2 = 1.03$ .

**Key words** lasers; 1.34  $\mu\text{m}$  laser; continuous-wave single-frequency

**OCIS codes** 140.3480; 140.3560; 140.3570

## 1 引言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有体积小、光束质量好、转换效率高及使用寿命长等优点。尤其是连续单频运转的固体激光器,以其优良的频率特性和功率稳定性广泛应用于高分辨率光谱学、高精度和高灵敏度探测、冷原子物理、量子光学及量子信息等领域。中心波长为 1.3  $\mu\text{m}$  的固体激光位于光纤传输的低色散和低损耗窗口,具有良好的水分子吸收特性及止血功能<sup>[1,2]</sup>,在光纤传感、光纤通信及激光医学等领域有着广泛的应用前景。而且 1.3  $\mu\text{m}$  激光可以通过非线性频率变换获得在激光

显示、激光医学等领域有着重要应用的红光激光<sup>[3]</sup>和紫外激光<sup>[4]</sup>。

掺钕激光晶体中的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>F<sub>13/2</sub>能级跃迁是产生 1.3  $\mu\text{m}$  波段激光的主要途径。在掺钕激光晶体中, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体具有吸收系数大、受激发射截面大和可直接输出线偏振激光等优点,是研制全固态 1.3  $\mu\text{m}$  激光器的优良增益介质之一。迄今为止,国内外对于 LD 抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 1.34  $\mu\text{m}$  激光器的研究,主要集中在多模及单横模运转模式上<sup>[5-7]</sup>;有关窄线宽、高光束质量的连续单频激光器的研究相对较少。1997 年,Conroy 等<sup>[8]</sup>采用短腔法,通过

**收稿日期**: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-02-27

**基金项目**: 国家重大科学研究计划(2010CB923101)和国家自然科学基金(61227015,11204167)资助课题。

**作者简介**: 杨小平(1986—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: yangxp2006@126.com

**导师简介**: 张宽收(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事量子光学及全固态激光技术等方面的研究。

E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn(通信联系人)

LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>, 获得了 105 mW 的连续单频 1.34 μm 激光输出; 2010 年, Camargo 等<sup>[9]</sup> 采用环形腔结构, 通过 808 nm LD 单端端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 获得最大输出功率为 1.55 W 的连续单频 1.34 μm 激光输出。在研制高功率输出的全固态激光器过程中, 激光晶体的热效应问题成为影响激光器输出性能的关键因素之一<sup>[10]</sup>。特别是在连续波 1.34 μm 激光器研制中, 由于量子亏损相对较大, 激光晶体热效应更为严重。随着 LD 制造技术的发展, 研究人员开始采用直接抽运技术, 利用 880 nm LD 作为抽运源, 将激光介质中的掺杂粒子直接从基态激发到激光上能级<sup>[11,12]</sup>, 来减小激光晶体的热效应、提高激光器的输出功率和光束质量。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对偏振平行于 *c* 轴的 880 nm 抽运光的吸收系数约为垂直于 *c* 轴的抽运光的 4 倍<sup>[13]</sup>, 而光纤耦合输出的 LD 一般为非偏振输出。为提高抽运耦合效率, 同时使激光晶体更加均匀地吸收抽运光, 设计了 LD 双端端面偏振耦合抽运方式, 获得了输出功率达 12 W 的连续单频 532 nm 绿光激光输出, 光光转换效率达 23.1%<sup>[14]</sup>。

本文采用双端端面偏振抽运耦合技术, 880 nm LD 直接抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 在减小激光晶体的热负载、使激光晶体更加均匀地吸收抽运光的基础上, 通过腔镜镀膜抑制 1.06 μm 激光振荡和设计优化环形激光谐振腔使激光器单向行波运转, 实验获得了输出功率达 9 W 的连续单频 1.34 μm 激光输出, 光光转换效率达 18%, 输出激光的光束质量 *M*<sup>2</sup> 因子为 1.03。

## 2 实验装置

图 1 为 LD 双端端面偏振耦合抽运的连续单频 1.34 μm 激光器的实验装置图。抽运源采用德国 LIMO 公司生产的光纤耦合输出的 LD, 光纤芯径为 400 μm, 中心波长为 880 nm, 最大输出功率为 60 W。LD 抽运光经过透镜 L<sub>1</sub> 准直后, 再经过偏振分束器 (PBS) 及透镜 L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub> 聚焦, 分别从激光晶体的两个端面注入激光晶体中; 准直聚焦后的抽运光腰斑半径为 330 μm。为了减小热效应, 激光晶体选用低掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体, 尺寸为 3 mm × 3 mm × (5 + 17 + 5) mm, 中间 17 mm 掺杂部分 Nd<sup>3+</sup> 的浓度为 0.27% (原子数分数), 两端 5 mm 部分为不掺杂部分, 晶体两端面均镀有对 880 nm 和 1.34 μm 激光的减反膜 (*R*<sub>880</sub> < 3%, *R*<sub>1342</sub> < 0.2%)。实验中, 将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体用钢膜包住放置于紫铜控温炉内, 用

控温精度为 ±0.01 °C 的温度控制仪 (型号: YG-4S, 宇光公司) 将晶体炉的温度控制在 25 °C。激光谐振腔为由镜片 M<sub>1</sub>~M<sub>6</sub> 构成的六镜环形腔。平面镜 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 为输入耦合镜, 均镀有 45° 的对 880 nm 和 1.06 μm 激光的高透膜以及对 1.34 μm 激光的高反膜 (*T*<sub>880</sub> > 95%, *T*<sub>1064</sub> > 95%, *R*<sub>1342</sub> > 99.8%), 镀 1.06 μm 高透膜是为了抑制 1.06 μm 激光在谐振腔中起振。平面镜 M<sub>3</sub> 和 M<sub>6</sub> 为 45° 的对 1.34 μm 激光的高反镜 (*R*<sub>1342</sub> > 99.8%)。M<sub>4</sub> 和 M<sub>5</sub> 是曲率半径 *R* = 100 mm 的平凹镜, M<sub>4</sub> 为 0° 的对 1.34 μm 激光的高反镜 (*R*<sub>1342</sub> > 99.8%), M<sub>5</sub> 为输出耦合镜 (*T*<sub>1342</sub> ≈ 10%)。在激光器谐振腔中由 1/2 波片和铽铍石榴石 (TGG) 晶体构成的光学单向器, 使激光在谐振腔内实现单向行波运转, 消除空间烧孔效应。

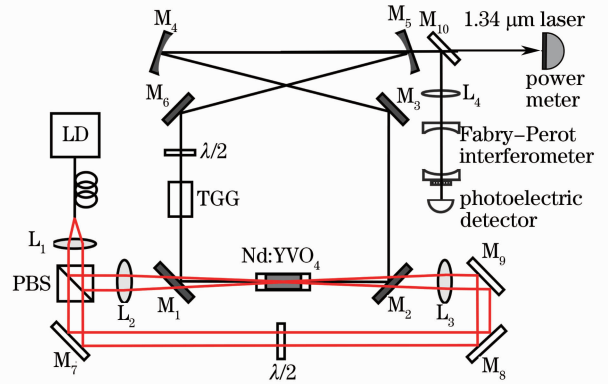


图 1 连续单频 1.34 μm 激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of continuous-wave single-frequency 1.34 μm laser

为获得稳定性好、输出功率高及光束质量好的连续单频 1.34 μm 激光输出, 在测量激光晶体的热透镜焦距<sup>[15]</sup>的基础上, 当抽运功率为 50 W 时, 把激光晶体等效为一个焦距为 200 mm 的薄透镜, 利用 ABCD 传输矩阵对激光谐振腔进行了优化设计。结合实验研究并优化激光器系统, 确定两平凹镜 M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub> 之间的腔长为 100 mm, M<sub>4</sub> 经激光晶体到 M<sub>5</sub> 之间的腔长为 380 mm。在该实验条件下, 激光晶体处的振荡光斑半径为 360 μm, 满足抽运模式匹配; 谐振腔的稳定性系数 (*A* + *D*)/2 = -0.3, 使激光器可以单横模稳定运转。

## 3 实验结果与分析

图 2 是用功率计 (LabMax-Top/LM-45 HTD, 美国相干公司) 测量的全固态连续 1.34 μm 激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线。激光器的阈值抽运功率为 11 W。阈值抽运功率比较高, 是由于激光谐

振腔的设计是为了在抽运功率为 50 W 时获得最佳激光输出,而在较低抽运功率下,谐振腔处于非稳区而不能实现激光振荡。当抽运功率为 50 W 时,连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光器的输出功率为 9 W,光-光转换效率达 18%。实验中,利用双色镜 M<sub>10</sub> 分出小部分 1.34  $\mu\text{m}$  激光,并注入到扫描共焦法布里-珀罗(F-P)干涉仪,同时监视输出激光的纵模模式。

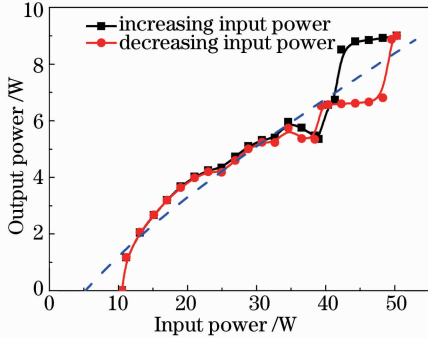


图2 连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光器的输出功率曲线  
Fig. 2 Output power curves of continuous-wave single-frequency 1.34  $\mu\text{m}$  laser

图2中的红色圆点和黑色方块点分别为抽运功率逐步升高和逐步降低过程中实验测量得到的结果。可以看出,在抽运功率为 45 W 附近,随着抽运功率升高和降低,激光器的输出功率出现类似于双稳特性的现象。当抽运功率从 40 W 增加到 48 W 时,激光器的输出功率增加得非常缓慢,然后突然增加到高的输出功率点;当抽运功率从 48 W 减小到 42 W 时,激光器的输出功率减小得非常缓慢,然后突然减小到低的输出功率点。在输出功率骤然上升和下降时,实验观察到激光器的输出模式出现跳变,不再为单纵模运转;但是随着抽运功率的继续升高或降低,激光器仍为单纵模运转。该现象可以在实验上稳定重复观察到,可能是在上述抽运功率区间,随着抽运功率的升高或降低,激光晶体的热效应不同,导致激光谐振腔的结构发生变化,进而影响激光器的输出功率。图2中的蓝色虚线为基于四能级激光系统空间速率方程、并考虑到热致衍射损耗的理论模型<sup>[16]</sup>,理论计算得到的激光器输出功率随抽运功率变化曲线,实验结果和理论计算基本吻合。在激光器阈值附近,两者差异比较大,是由于在理论计算中没有考虑激光晶体的热透镜效应以及激光谐振腔能否处于稳定运转区域而产生激光振荡。

图3是在抽运功率为 48.5 W、连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光器的输出功率为 8.7 W 时,用激光功率计测量的激光器的长期功率稳定性曲线。可以看

出,激光器在 4 h 内稳定运转,功率波动小于  $\pm 1\%$ 。

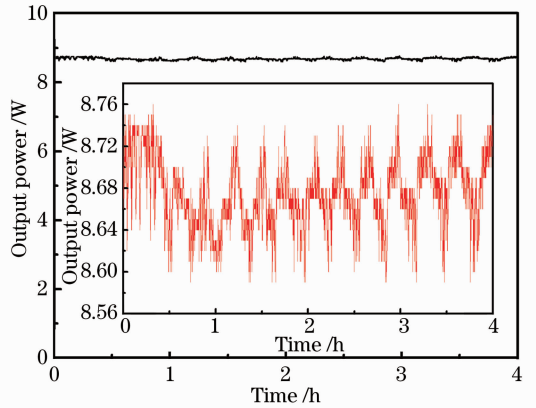


图3 连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光器的功率稳定性  
Fig. 3 Measured power stability of continuous-wave single-frequency 1.34  $\mu\text{m}$  laser

图4是用扫描共焦 F-P 干涉仪(自由光谱区: 750 MHz,精细度: 200)监视、用数字示波器(Tektronix DPO 4054)采集记录的激光器纵模模式的透射曲线。可以看出,激光器稳定地单频运转,激光器在自由运转 1 min 内的透射峰漂移值为 0.077 ms,可计算得出相应的频率漂移为 8.5 MHz。

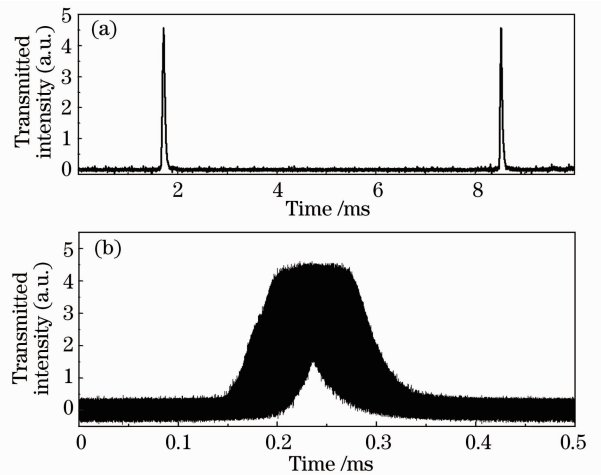


图4 (a)扫描共焦 F-P 干涉仪的透射强度及 (b)激光器自由运转 1 min 内的透射峰漂移值  
Fig. 4 (a) Transmission intensity of the scanning confocal F-P interferometer and (b) transmission peak shift value in 1 min under free operation

连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光器输出激光的光束质量用光束质量分析仪(型号:DataRay, BMS2-4XY)测量。图5是连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光输出功率为 8.7 W 时,实验测量的输出激光的光束质量。可以看出激光光斑在水平方向和垂直方向的强度分布均呈标准的高斯分布,实验测得的两个方向的光束质量  $M^2$  因子均为 1.03,1.34  $\mu\text{m}$  激光器输出激光的

光束质量接近衍射极限。

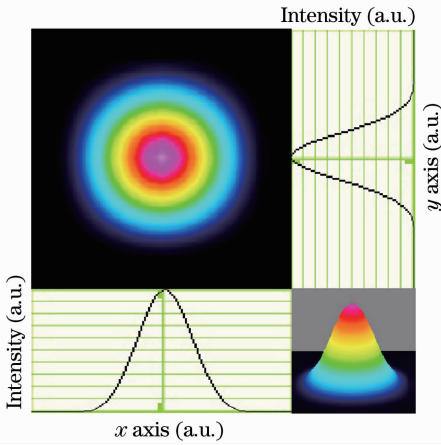


图 5 激光器输出光斑强度分布

Fig. 5 Intensity distribution of the output beam

## 4 结 论

报道了 LD 双端端面偏振抽运的连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器的实验研究。考虑到在连续波 1.34  $\mu\text{m}$  激光器研制中量子亏损相对较大以及激光晶体热效应更为严重的情况,在设计出双端端面偏振抽运耦合方式的基础上,采用 880 nm LD 直接抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,通过腔镜镀膜抑制 1.06  $\mu\text{m}$  激光振荡、设计优化环形激光谐振腔使激光器稳定单向行波运转,实验获得了输出功率达 9 W 的连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光输出,光-光转换效率达 18%,激光器在 4 h 内的功率稳定性优于  $\pm 1\%$ ,输出激光的光束质量接近衍射极限。研制的高性能连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  激光器,一方面可以应用在光纤传感、光纤通信及量子信息领域;另一方面可以通过内腔倍频和外腔谐振倍频获得高性能连续单频 671 nm 红光激光,在激光显示、激光医学等领域有着重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Cheng Shuying, Shen Hongyuan, Zhang Ge *et al.*. Measurement of the refractive indices of biological tissues at 1341.4 nm laser wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 18~21  
程树英, 沈鸿元, 张戈等. 在 1341.4 nm 激光波长对生物组织折射率的测量[J]. *光子学报*, 2003, **32**(1): 18~21
- 2 Jia Fang, Wang Xiuqi, Ma Junzhong. Report on 45 patients with digestive diseases who were treated by the Nd:YAP laser with endoscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(11): 1054~1056

- 贾方, 王修齐, 马军忠. 1341.4 nm Nd:YAP 激光内镜下治疗消化道疾病 45 例报告[J]. *中国激光*, 2001, **28**(11): 1054~1056
- 3 Lü Yanfei, Zhang Xihe, Xia Jing *et al.*. High-efficiency direct-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO laser operating at 671 nm[J]. *Opt. & Laser Technology*, 2010, **42**(3): 522~525
- 4 Xiuwei Fan, Haitao Huang, Jijian Jiang *et al.*. Generation of UV radiation at 335.5 nm based on frequency-quadrupling of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 192~194
- 5 Aiyun Yao, Wei Hou, Yupeng Kong *et al.*. Double-end-pumped 11 W Nd:YVO<sub>4</sub> CW laser at 1342 nm[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(10): 2129~2133
- 6 F. Lenhardt, M. Nittmann, T. Bauer *et al.*. High-power 888 nm-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> 1342 nm oscillator operating in the TEM<sub>00</sub> mode[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **96**(4): 803~807
- 7 Wang Jiaxian, Wang Yanfei. Semiconductor film passively Q-switching for dual-wavelength lasers at 1064 nm and 1342 nm in Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202008  
王加贤, 王燕飞. 半导体薄膜实现 Nd:YVO<sub>4</sub> 1064 nm 和 1342 nm 双波长激光被动调 Q[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202008
- 8 R. S. Conroy, A. J. Kemp, G. L. Friel *et al.*. Microchip Nd:vanadate lasers at 1342 nm and 671 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23): 1781~1783
- 9 F. A. Camargo, T. Z. Willette, T. Badr *et al.*. Tunable single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub>/BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> ring laser at 671 nm[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(5): 804~809
- 10 Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO<sub>4</sub> pumped by 808 nm and 888 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **38**(4): 0402001  
艾庆康, 常亮, 陈檬等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 热效应分析[J]. *中国激光*, 2012, **38**(4): 0402001
- 11 V. Lupeia, N. Pavela, T. Tairab. Highly efficient laser emission in concentrated Nd:YVO<sub>4</sub> components under direct pumping into the emitting level[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(4-6): 431~435
- 12 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunch. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO laser with output power of 21.5 W [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602011  
郑耀辉, 王雅君, 彭堃墀. 输出功率为 21.5 W 的单端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 单频激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602011
- 13 L. McDonagh, R. Wallenstein, R. Knappe *et al.*. High-efficiency 60 W TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator pumped at 888 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3297~3299
- 14 Jianli Liu, Zhiyong Wang, Hong Li *et al.*. Stable, 12 W, continuous-wave single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> green laser polarized and dual-end pumped at 880 nm[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(7): 6777~6782
- 15 Jia Jianxun, Wang Chunxiang, Feng Jinxia *et al.*. 12 W all-solid-state CW Nd:YVO<sub>4</sub> TEM<sub>00</sub> laser at 1.34  $\mu\text{m}$  [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2012, **18**(1): 97~101  
贾建勋, 王春香, 冯晋霞等. 输出功率 12 W 的全固态连续单模 1.34  $\mu\text{m}$  激光器[J]. *量子光学学报*, 2012, **18**(1): 97~101
- 16 Xi Wenqiang, Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. A high-power continuous-wave laser-diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser of single-frequency operation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(5): 1144~1147

栏目编辑: 宋梅梅