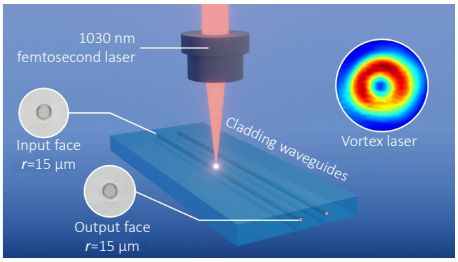
OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering 微纳光子学:结构与器件专题

Article

2026 年 7 月, 第 53 卷, 第 7 期

基于 Bi_2Se_3 的被动调 Q 波导脉冲涡旋激光器



王玺融，孙文青，孙晓莉*

山东大学物理学院，山东 济南 250100

摘要：采用飞秒激光直写技术在 Nd:YAG 晶体中制备圆形包层波导，以化学气相沉积法制备的拓扑绝缘体三硒化铋(Bi_2Se_3)作为可饱和吸收体，成功实现被动调 Q 涡旋激光的稳定运转。通过显微成像、微拉曼光谱及端面耦合测试，证实所制备圆形波导具有优良的几何形貌与导光性能。对 Bi_2Se_3 薄膜的非线性光学特性进行实验表征，测得其调制深度为 8.6%，饱和强度为 26.25 GW/cm^2。在 1 μm 波段系统研究并对比了连续波与调 Q 模式下的激光输出性能，结果表明，该圆形波导具备优异的热稳定性，在不同泵浦功率水平下均能维持高质量的涡旋光斑分布。当吸收泵浦功率为 850 mW 时，激光输出性能达到最优：最短脉冲宽度为 39 ns，最高重复频率为 9.1 MHz，最大单脉冲能量可达 4.42 nJ。

关键词：飞秒激光直写；波导激光；被动调 Q；Bi_2Se_3；涡旋激光

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.260082 | CSTR: 32245.14.oee.2026.260082 | 中图分类号：O436 | 文献标识码：A

王玺融，孙文青，孙晓莉. 基于 Bi_2Se_3 的被动调 Q 波导脉冲涡旋激光器 [J]. 光电工程，2026，**53**(7): 260082

Wang X R, Sun W Q, Sun X L. Passively Q-switched Nd:YAG waveguide vortex laser using Bi_2Se_3 saturable absorber[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(7): 260082

1 引　言

涡旋光束携带独特的轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)，具有螺旋型相位波前与相位奇点，其中相位奇点处相位不确定且光强为零，使得涡旋光束整体呈现环状光强分布[1-2]。其 OAM 模式所提供的无限正交态，为光场调控开辟了新维度，促使涡旋光在量子通信、OAM 复用、涡旋传感等前沿领域展现出广阔的应用前景[3-8]。目前，涡旋光束的生成主要通过腔外调控实现，常用器件包括螺旋相位板、空间光调制器、Q 波片等[9-11]。其中，将螺旋相位板作为输出镜是腔外生成涡旋光束的常用且有效的方法[12-14]。相较于连续波(continuous wave, CW)涡旋光，具有高峰值功率的脉冲涡旋激光在非线性光学频率转换、激光微加工等领域具有更高的应用价值。然而，传统脉冲涡旋激光器多依赖体积庞大的体块晶体、复杂的空间光路或较长的光纤结构，难以满足现代光子学对光源器件微型化、高度集成化及高稳定性的迫切需求[15-20]。

波导结构作为构建紧凑型光子集成电路的核心平台[21-22]，可有效限制光场传输，显著降低光束发散，延长光与物质的有效相互作用长度，进而实现低激光阈值、高斜效率的激光输出[23-26]。此外，微米级波导的几何结构赋予器件极高的表面积/体积比，大幅提升了系统的散热能力，可有效抑制高功率泵浦条件下的热透镜效应[27-28]。在各类波导制备技术中，飞秒激光直写(femtosecond laser direct writing, FsLDW)技术凭借其

收稿日期：2026-04-01；修回日期：2026-06-18；录用日期：2026-06-22；网络出版日期：2026-07-25

*通信作者：孙晓莉，xlsun@sdu.edu.cn

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

优异的三维空间加工能力和广泛的材料适用性脱颖而出[29-30]。其中，利用该技术制备的“包层波导”，光束主要在未受激光损伤的纤芯区域传输，可最大程度保留基质晶体原有的发光特性与晶格质量，在生成涡旋光等高质量结构光束方面具备独特优势[31-32]。

在波导激光器脉冲运转的实现方案中，基于可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 的被动调 Q 技术因设计简洁、结构紧凑等优势受到广泛关注[33]。近年来，二维材料凭借其宽带吸收特性与超快响应速度[34-35]，在 SA 领域引发了广泛研究热潮。拓扑绝缘体作为一类具有狄拉克锥形电子能带结构的新型量子材料，展现出优良的宽带非线性光学响应，而三硒化铋 (Bi_2Se_3) 作为拓扑绝缘体的典型代表，已成功实现 1 μm 波段的脉冲激光输出，成为脉冲激光产生领域极具竞争力的 SA 材料[36-37]。然而，目前关于将 FsLDW 技术定制的晶体波导与 Bi_2Se_3 薄膜相结合，探索微型化脉冲涡旋激光产生机制与输出特性的相关报道仍较为匮乏。

基于此，本文构建了一种以 Bi_2Se_3 薄膜为 SA 的 Nd:YAG 波导脉冲涡旋激光器。利用 FsLDW 技术制备 Nd:YAG 包层光波导，结合化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 法制备的 Bi_2Se_3 薄膜，在 1 μm 波段实现了高热稳定性的被动调 Q 涡旋光束输出。在 850 mW 吸收泵浦功率下，获得了最短脉宽 39 ns、最高重复频率 9.1 MHz、单脉冲能量 4.42 nJ 的稳定脉冲序列，且器件在高功率运转过程中，涡旋光斑未出现明显热畸变。

2 器件制备与特性表征

2.1 包层波导的制备与表征

本研究选用掺杂浓度为 1 at.% Nd^{3+}的 Nd:YAG 晶体作为基质材料，其尺寸为 20 mm (x)×10 mm (y)×2 mm (z)，所有光学表面均抛光至光学级标准，为波导制备及后续导光性能测试提供了良好的基础。采用 FsLDW 技术在该 Nd:YAG 晶体中制备横截面直径为 15 μm 的圆形包层波导，制备过程所用飞秒激光器 (Spitfire，Spectra Physics，Santa Clara) 的输出参数如下：中心波长 795 nm，输出重复频率 1 kHz，单脉冲能量 1 mJ，脉冲宽度 120 fs，输出脉冲为线偏振态。飞秒激光经 50×物镜 (数值孔径 NA=0.65) 聚焦于 Nd:YAG 晶体表面以下，最大聚焦深度可达 150 μm。实验中将晶体样品固定于由计算机控制的三维平移台上，通过精确调控平移台相对于飞秒激光束的移动速度，使其稳定保持在 500 μm/s，在晶体不同深度处写入平行排列的低折射率轨迹，从而构成圆形包层波导结构。FsLDW 技术制备包层光波导的示意如图 1(a) 所示。

图 1(b) 为所设计圆形包层波导的横截面结构示意图，其输入端面与输出端面的包层半径均为 15 μm，确保了波导结构的对称性与一致性。图 1(c, d) 分别为波导输入端面与输出端面的光学显微横截面图，从图中可清晰观察到包层的圆形轮廓，几何形貌规整，边缘清晰，表明所制备的包层波导具有良好的结构均匀性。

图 1(e) 是光波导输出端面的体材料、波导中心区域和激光损伤区域的微拉曼光谱图，图中测量了 781 cm^{-1} 附近峰的拉曼强度。结果表明，与体材料和波导中心区域相比，激光损伤区域的拉曼峰值强度分别降低了约 12% 和 8%，表明激光直写轨迹处的晶格结构受到破坏，产生缺陷，导致了该区域折射率的降低。图 1(f, g) 与图 1(h, i) 表明，该波导在 TE 和 TM 偏振态下均能较好地限制光场，且出射光斑呈现出良好的基模分布，证实了所制备的包层波导具有优异的模式限制能力。

2.2 Bi_2Se_3 饱和吸收体的特性分析

本实验所用 Bi_2Se_3 薄膜样品由深圳六碳科技有限公司提供，采用化学气相沉积法沉积于蓝宝石衬底上，为后续可饱和吸收特性测试及激光实验奠定了良好基础。Bi_2Se_3 薄膜的拉曼光谱测试结果如图 2(a) 所示，在 532 nm 激光激发条件下，可清晰观测到 70 cm^{-1}、130 cm^{-1} 和 174 cm^{-1} 处的三个特征峰，其峰位与先前相关报道一致[38]，证实了所提供 Bi_2Se_3 薄膜的晶体结构完整性。此外，光谱中 84 cm^{-1} 与 250 cm^{-1} 处出现的特征峰，源于激光照射过程中薄膜表面发生的轻微氧化反应。

采用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 对 Bi_2Se_3 薄膜的厚度进行精准表征，表征结果如图 2(b) 所示，经统计分析得出薄膜平均厚度约为 16 nm。结合 Bi_2Se_3 单层厚度约为 1 nm 的已知特性，可推测该样品的纳米片层数约为 16 层，为其可饱和吸收性能的评估提供了关键结构参数。此外，利用紫外/可见/红外分光光度计 (Cary 5000 UV Vis-NIR，Agilent Technologies) 对 Bi_2Se_3 薄膜的线性光学吸收特性进行测试，结果如图 2(c) 所示；在考虑蓝宝石衬底的菲涅耳反射损失后，计算得到该薄膜在 1064 nm 波长处的吸光度约为 0.38。

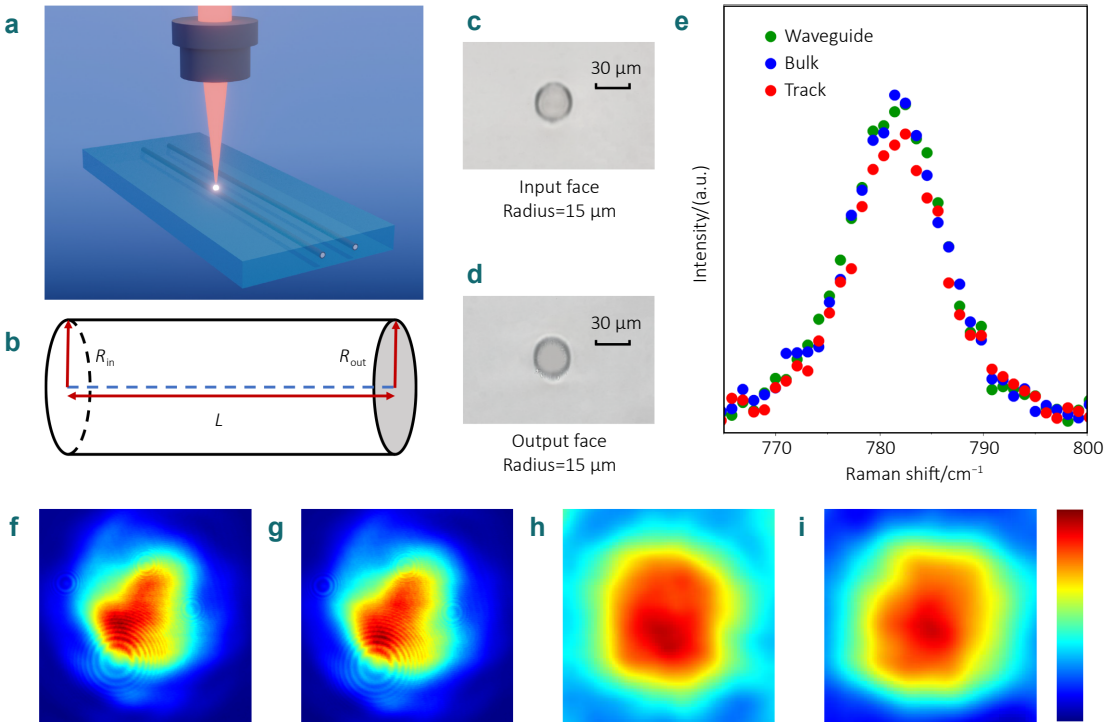


图 1 Nd:YAG 包层光波导的制备与表征。(a) 飞秒激光直写包层光波导示意图；(b) 波导几何结构示意图；(c) 输入端面光学显微横截面图；(d) 输出端面光学显微横截面图；(e) 光波导输出端面的体材料 (蓝色)、波导中心区域 (绿色) 与激光损伤区域 (红色) 的微拉曼光谱图；(f) TE 偏振下波导入射光的近场模式分布；(g) TM 偏振下波导入射光的近场模式分布；(h) TE 偏振下波导出射光的近场模式分布；(i) TM 偏振下波导出射光的近场模式分布

Fig. 1 Preparation and characterization of the Nd:YAG cladding optical waveguide. (a) Schematic of femtosecond laser direct writing of the cladding waveguide; (b) Schematic of the waveguide geometric structure; (c) Optical microscope cross-sectional image of the input facet; (d) Optical microscope cross-sectional image of the output facet; (e) Micro-Raman spectra of the bulk material (blue), waveguide central region (green), and laser damage region (red) at the waveguide output facet; (f) Near-field mode distribution of the incident light under TE polarization; (g) Near-field mode distribution of the incident light under TM polarization; (h) Near-field mode distribution of the output light under TE polarization; (i) Near-field mode distribution of the output light under TM polarization

为评估所制备的 Bi_2Se_3 薄膜在 1 μm 波段调 Q 激光产生中的应用潜力，搭建了 Z 扫描测试光路，装置示意如图 2(d) 所示。测试所用激发光源为 1030 nm 掺镱飞秒光纤激光器 (FemtoYL-10，YSL Photonics，China)，该激光器输出脉冲的重复频率为 25 kHz，脉冲宽度为 400 fs，焦点处束腰半径为 40 μm，可视为高斯光束，通过调节光路中的衰减片可灵活改变激发脉冲能量。图 2(e) 展示了激发脉冲能量分别为 20 nJ、40 nJ、50 nJ 和 58 nJ 时的开孔 Z 扫描实验结果及相应的拟合曲线。可以看出，所有曲线在焦平面附近均呈现尖锐且高度对称的峰值，表明 Bi_2Se_3 薄膜具有优异的饱和吸收效应，具有作为可饱和吸收体应用于 1 μm 波段调 Q 激光产生的潜力。采用三能级非线性吸收模型对归一化透过率曲线进行拟合，其拟合如式 (1) 所示：

$$T=\left[1-\frac{\Delta R\times I_s}{I_s+\dfrac{I_0}{1+(Z/Z_0)^2}}\right]\cdot\frac{1}{(1-\Delta R)}, \tag{1}$$

式中：T 是归一化透射率，Z 是样品的 Z 轴位置，Z_0 是激发光束的瑞利长度，I_0 是激发脉冲峰值强度，I_s 是饱和强度，ΔR 是调制深度。拟合得出 Bi_2Se_3 薄膜的调制深度为 8.6%，饱和强度为 26.25 GW/cm^2。实验过程中，测得 SA 损伤阈值为 3.18 mJ/cm^2，对应的功率密度为 7.95 GW/cm^2。58 nJ 引起的饱和吸收十分接近调制深度，此时对应的峰值功率密度为 5.77 GW/cm^2，仍小于损伤阈值对应的功率密度 (7.95 GW/cm^2)。对于 Bi_2Se_3 薄膜而言，增加材料厚度可增大调制深度并降低饱和强度，从而更有利于调 Q 脉冲的产生。但与此同时，厚度的增加也会使体态占据主导，导致由光散射和晶体缺陷引发

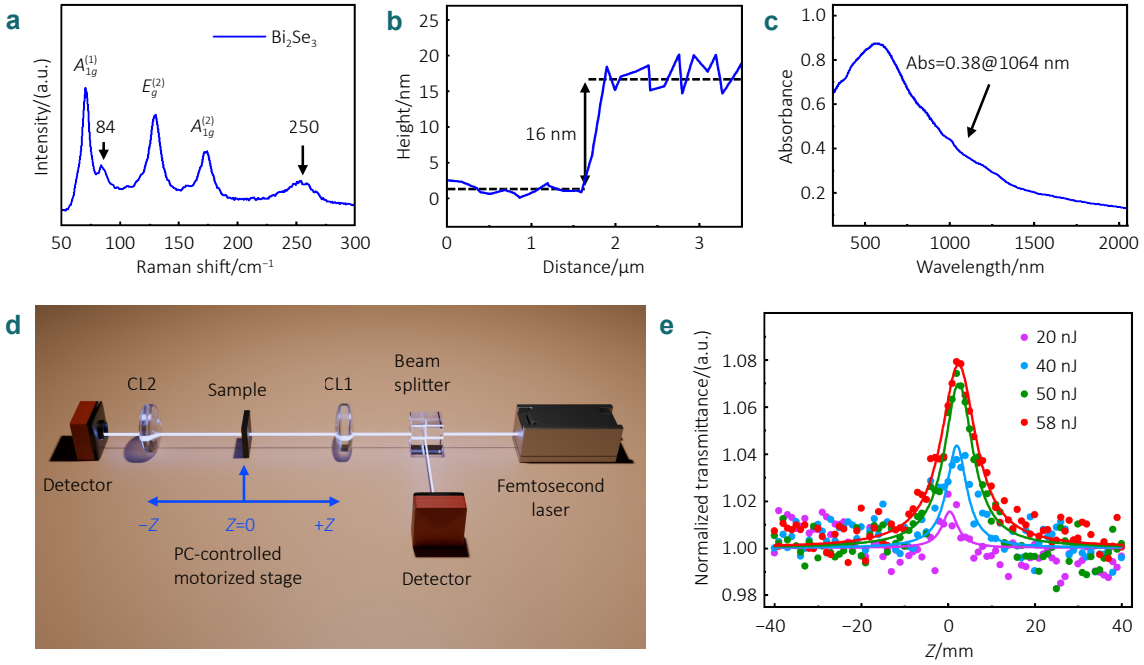


图 2 Bi_2Se_3 薄膜的特性及可饱和吸收性表征。(a) 拉曼光谱图；(b) AFM 图；(c) 线性吸收光谱图；(d) *Z* 扫描测试光路示意图；(e) 开孔 *Z* 扫描测试结果

Fig. 2 Properties and saturable absorption characterization of the Bi_2Se_3 film. (a) Raman spectrum; (b) AFM image; (c) Linear absorption spectrum; (d) Schematic of the *Z*-scan experimental setup; (e) Open-aperture *Z*-scan results

的非饱和损耗增加。综合权衡，本文所采用的厚度为 16 nm 的 Bi_2Se_3 薄膜兼具较大的调制深度，较低的饱和强度与较小的非饱和损耗，是实现 1 μm 波段调 Q 激光输出的理想 SA。

3 实验装置

图 3(a) 展示了基于 Bi_2Se_3 可饱和吸收体的 Nd:YAG 脉冲涡旋激光的光路示意图。实验所用泵浦源为可调谐钛蓝宝石激光器，其输出光为线偏振态，中心波长精确调谐至 808 nm，以匹配 Nd:YAG 晶体中 Nd^{3+}的吸收峰，提高泵浦效率。泵浦光经焦距为 30 mm 的球面平凸透镜 CL1 聚焦后，耦合进圆形包层波导。Nd:YAG 圆形包层波导固定于五维调整架上，通过灵活调节波导空间位置，优化波导耦合效率。

平面镜 IM 作为谐振腔输入镜，在 808 nm 泵浦光波段的透过率为 99.9%，可保证泵浦光高效入射；在 1064 nm 激光振荡波段的反射率大于 99.9%，可减少腔内激光损耗，实现激光的高效振荡。螺旋相位板 (Spiral phase plate, SPP) 的拓扑荷数设为 1，透过率为 99%，同时作为谐振腔输出镜和相位调控元件，直接对腔内激光进行相位调控，实现涡旋光输出。涡旋激光的模式分布与输出功率分别采用相机式电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 光束质量分析仪和功率计 (Thorlabs, S145C) 进行精准测量。未插入 Bi_2Se_3 薄膜时，激光器处于 CW 运转状态；Bi_2Se_3 薄膜插入谐振腔后，实现脉冲激光输出。调 Q 脉冲序列通过低噪声 InGaAs 光电探测器 (Thorlabs，PDA10D2) 进行探测，并且使用实时数字示波器 (Tektronix，MSO71604DX) 记录脉冲波形及相关参数。

值得注意的是，得益于实验所用波导的较高增益，谐振腔仅需 1% 的输出反射率即可实现激光起振，因此可直接将螺旋相位板复用为输出镜。相比于采用独立的螺旋相位板，该一体化设计有效缩短了腔外光程，降低了插入损耗，进而提升了激光器的输出效率。这一低损耗、高集成度的方案，为构建紧凑型涡旋波导激光器提供了有利条件。

4 实验结果与讨论

图 3(b) 与图 3(c) 分别展示了波导脉冲涡旋激光器在 CW 模式与被动调 Q 脉冲模式下，输出功率随吸收

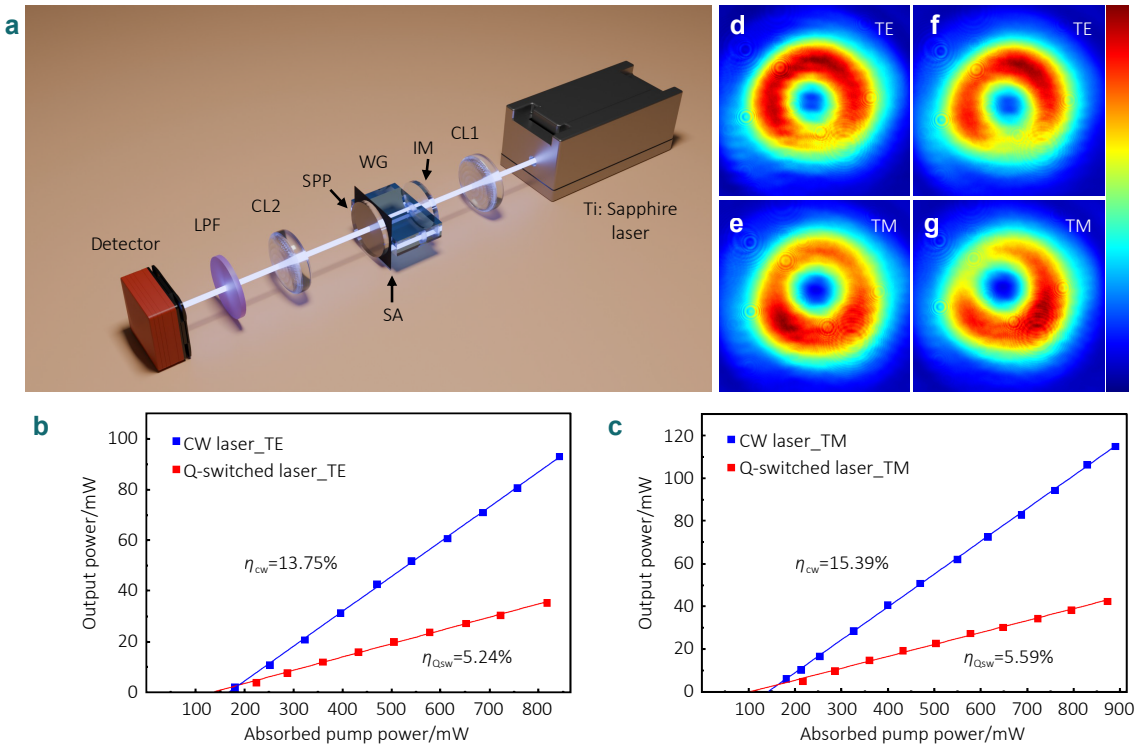


图 3 Nd:YAG 波导脉冲涡旋激光器实验装置与输出特性。(a) 激光器光路示意图 (其中，CL1 和 CL2 为透镜，IM 为输入镜，WG 为波导，SA 为可饱和吸收体，SPP 为螺旋相位板，LPF 为长通滤波片)；(b) TE 偏振光与 (c)TM 偏振光泵浦下，连续与脉冲模式输出功率随吸收泵浦功率的变化；(d) 低功率下 TE 模近场模式分布；(e) 低功率下 TM 模近场模式分布；(f) 高功率下 TE 模近场模式分布；(g) 高功率下 TM 模近场模式分布

Fig. 3 Experimental setup and output characteristics of the Nd:YAG waveguide pulsed vortex laser. (a) Schematic of the laser optical path (CL1, CL2: lenses; IM: input mirror; WG: waveguide; SA: saturable absorber; SPP: spiral phase plate; LPF: long-pass filter); Output power of continuous-wave and pulsed modes versus absorbed pump power under (b) TE-polarized and (c) TM-polarized pumping; (d) Near-field mode distribution of TE mode at low power; (e) Near-field mode distribution of TM mode at low power; (f) Near-field mode distribution of TE mode at high power; (g) Near-field mode distribution of TM mode at high power

泵浦功率的变化规律。输出激光的中心波长均稳定在 1064 nm，该波长对应于 Nd^{3+}从$^4F_{3/2}$ 能级到$^4I_{11/2}$ 能级的主要荧光跃迁。

在连续波模式运行时，当采用 TE 偏振光泵浦时，涡旋波导激光器的吸收阈值功率为 169.7 mW，随着吸收泵浦功率的增加，输出功率逐渐提升，最大输出功率达到 92.8 mW，对应的斜效率为 13.75%；当采用 TM 偏振光泵浦时，器件的吸收阈值功率降至 143.9 mW，最大输出功率提升至 114.8 mW，斜效率达到 15.39%，表明 TM 偏振泵浦条件下波导激光器性能更优。产生上述性能差异的主要原因在于所制备圆形包层波导的损伤轨迹截面并非理想圆形，而是长轴平行于 TM 偏振方向的椭圆形。这种椭圆形轨迹在构成波导包层时，于 TM 方向上排列更为致密，形成了更厚的低折射率包层，从而有效增强了光场限制作用并提升了传输效率；相反，在 TE 方向上则排列相对稀疏，低折射率包层更薄，导致轻微的模式漏光与能量损耗，进而制约了该偏振态下的器件整体输出性能。将 Bi_2Se_3 薄膜插入谐振腔后，实现被动调 Q 脉冲激光输出。在 TE 偏振光泵浦下，激光吸收阈值功率为 138.6 mW，斜效率为 5.24%，最大输出功率为 35.1 mW；在 TM 偏振光泵浦下，吸收阈值功率为 107.4 mW，斜效率为 5.59%，最大输出功率为 42.3 mW。

波导涡旋激光器在低泵浦功率下工作时，TE 模和 TM 模的近场模式分布如图 3(d, e) 所示。随着泵浦功率提高，TE 模和 TM 模的输出光斑始终保持典型的环形中空分布，与涡旋光束的特征光斑形态一致，如图 3(f, g) 所示。对比低功率与高功率条件下的光斑形态可见，光斑轮廓未因泵浦功率的提升而发生明显畸变或扩散，表明包层波导结构降低了高功率泵浦下的热透镜效应，具备优异的热稳定性。

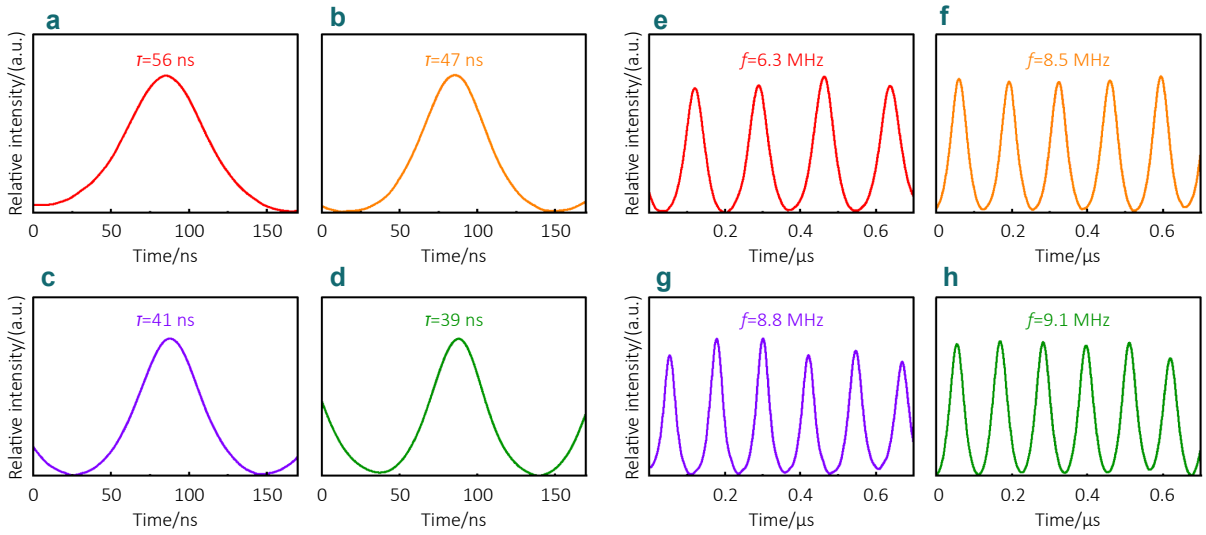


图 4 不同吸收泵浦功率下的单脉冲包络与调 Q 脉冲序列。(a) 450 mW，(b) 650 mW，(c) 750 mW，(d) 850 mW 吸收泵浦功率下的单脉冲包络；(e) 450 mW，(f) 650 mW，(g) 750 mW，(h) 850 mW 吸收泵浦功率下的调 Q 脉冲序列

Fig. 4 Single pulse envelopes and Q-switched pulse trains under different absorbed pump powers. Single pulse envelopes at absorbed pump powers of (a) 450 mW, (b) 650 mW, (c) 750 mW, and (d) 850 mW; Q-switched pulse trains at absorbed pump powers of (e) 450 mW, (f) 650 mW, (g) 750 mW, and (h) 850 mW

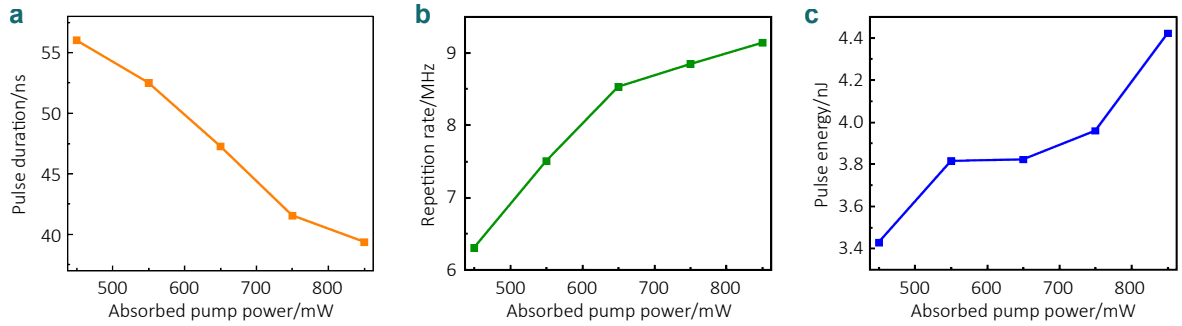


图 5 调 Q 涡旋激光器的脉冲参数随吸收泵浦功率的变化。(a) 脉冲宽度；(b) 重复频率；(c) 单脉冲能量

Fig. 5 Pulse parameters of the Q-switched vortex laser versus absorbed pump power. (a) Pulse width; (b) Repetition rate; (c) Single pulse energy

图 4 展示了在不同泵浦功率下的调 Q 脉冲序列和单脉冲包络。可以看出，脉冲序列整齐且稳定，验证了 Bi_2Se_3 薄膜可饱和吸收体优异的光学性能与热稳定性。图 5(a) 与图 5(b) 分别展示了调 Q 涡旋激光器的脉冲宽度和重复频率随吸收泵浦功率的变化情况。随着吸收泵浦功率的增加，脉冲宽度从 56 ns 减小到 39 ns，而重复频率则从 6.3 MHz 增加到 9.1 MHz。进一步计算得出了调 Q 涡旋激光器单脉冲能量与吸收泵浦功率的关系，如图 5(c) 所示。结果表明，单脉冲能量随泵浦功率逐渐增加，在 850 mW 的吸收泵浦功率下，记录到的最高脉冲能量为 4.42 nJ。值得注意的是，计算表明腔内最高单脉冲能量密度为 1.3 mJ/cm^2，未超过 Bi_2Se_3 的损伤阈值 (3.18 mJ/cm^2)。导致该器件具备高重频特性的物理机制可归结为两点：一是波导结构相较于体块晶体能更有效地紧密束缚光场，结合晶体自身的高增益，使得在低泵浦功率下即可实现极高的腔内功率密度；二是 Bi_2Se_3 可饱和吸收体的调制深度较低，仅 8.6%，易于实现快速饱和与恢复。上述低阈值的高功率密度与低调制深度的耦合效应，共同驱动了 MHz 量级高重频脉冲的激发。此类密集型脉冲序列在高速光通信、光时钟生成及光信号处理等领域具有不可替代的优势。结合波导结构的紧凑性与二维材料的易集成特性，该器件在未来微型化、低功耗光子集成回路中展现出巨大的应用前景。

为进一步定量表征所产生的涡旋光束，分别采用柱透镜聚焦法与正三角形光阑衍射法对其进行测量，并利用 CCD 相机记录相应的光强分布。理论上，拓扑荷数

为|*N*|的涡旋光束经柱透镜聚焦后，会在焦平面处演化为|*N*|+1 条亮纹；当 *N*=+1 时，亮纹沿反对角线方向排列，当 *N*=−1 时则沿对角线方向排列。实验中，涡旋光束在通过长通滤波片后，被焦距为 3 cm 的柱透镜聚焦，CCD 记录的焦点处光强分布如图 6(a) 所示。图中清晰可见两条沿反对角线方向排列的亮纹，表明输出涡旋光束的拓扑荷数为+1。此外，涡旋光束穿过三角形光阑后会形成特殊的夫琅禾费衍射图样，其三角形轮廓的每条边上将呈现|*N*|+1 个光斑。在 CCD 前方放置一个高为 0.8 mm 的正三角形光阑，所得衍射光强分布如图 6(b) 所示。该图样特征与理论高度吻合，进一步证实了该涡旋光束的拓扑荷数确为+1。

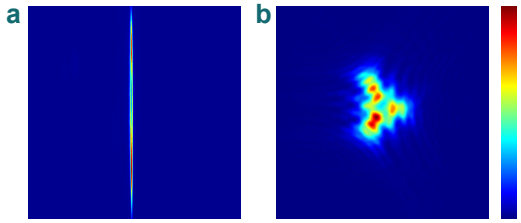


图 6 涡旋光束的拓扑荷数测量结果。(a) 经柱透镜聚焦后的光强分布；(b) 经正三角形光阑衍射后的光强分布

Fig. 6 Measurement results of the topological charge of the vortex beam. (a) Intensity distribution after focusing by a cylindrical lens; (b) Diffraction intensity distribution after an equilateral triangular aperture

5 结 论

本文使用飞秒激光直写技术在 Nd:YAG 晶体中制备了半径为 15 μm 的包层波导，并利用 CVD 制备的 Bi_2Se_3 薄膜作为可饱和吸收体，实现了稳定的被动调 Q 涡旋激光输出。结合开孔 Z 扫描 Bi_2Se_3 薄膜的三阶非线性光学效应进行表征，其调制深度为 8.6%，饱和强度为 26.25 GW/cm^2。实验结果表明，当吸收泵浦功率为 850 mW 时，脉冲激光的脉宽为 39 ns，重复频率为 9.1 MHz，单脉冲能量为 4.42 nJ。该研究验证了 Bi_2Se_3 优异的三阶非线性光学效应和包层波导的导波特性，为实现结构紧凑、热稳定性优异的 Nd:YAG 波导脉冲涡旋激光器提供了实验依据。

作者贡献

王玺融，孙文青：研究资料的收集、分析，实验的设计与完成，论文写作；孙晓莉：指导论文选题、论文修改。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. Liang X F, Li H, Wang Y L, et al. Research progress of the generation of vortex beams[J]. *Laser J*, 2024, **45** (6): 1−12.
梁晓峰, 李航, 王雅兰, 等. 涡旋光束的产生研究进展[J]. 激光杂志, 2024, **45** (6): 1−12.
2. Hu J Q, Eriksson M, Gigan S, et al. Generalized angle–orbital angular momentum Talbot effect and modulo mode sorting[J]. *Nat Photonics*, 2025, **19** (4): 392−399.
3. Gao X Y, Yu Z P, Yao J, et al. Discontinuous orbital angular momentum metasurface holography[J]. *Nat Commun*, 2025, **16** (1): 10688.
4. Liu J Y, Mo S Q, Xu Z Q, et al. High spectral-efficiency, ultra-low MIMO SDM transmission over a field-deployed multi-core OAM fiber[J]. *Photonics Res*, 2025, **13** (1): 18−30.
5. Cheng M J, Jiang W J, Guo L X, et al. Metrology with a twist: probing and sensing with vortex light[J]. *Light Sci Appl*, 2025, **14** (1): 4.
6. Wan Z Y, Tang Z Y, Zhang X, et al. Compact and reciprocal probe-signal-integrated rotational Doppler velocimetry with fiber-sculpted light[J]. *Light Sci Appl*, 2025, **14** (1): 88.
7. Wan Z S, Shen Y J, Wang Z Y, et al. Divergence-degenerate spatial multiplexing towards future ultrahigh capacity, low error-rate optical communications[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11** (1): 144.
8. Xie C, Liu T Y. Applications of vector vortex beams in laser micro-/nanomachining[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51** (8): 240089.
谢辰, 刘彤炎. 矢量涡旋光场在激光微纳加工中的应用[J]. 光电工程, 2024, **51** (8): 240089.
9. Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Opt Express*, 2004, **12** (22): 5448−5456.
10. JJ Nivas J, He S T, Rubano A, et al. Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q-plate[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 17929.
11. Ma Z Y, Tian T, Liao Y X, et al. Electrically switchable 2^N-channel wave-front control for certain functionalities with N cascaded polarization-dependent metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2024, **15** (1): 8370.
12. Wang Y B, Shen Y J, Meng Y, et al. Generation of 1535-nm pulsed vortex beam in a diode-pumped Er, Yb: glass microchip laser[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2018, **30** (10): 891−894.
13. Sun W Q, Liu Y, Romero C, et al. Q-switched vortex waveguide laser generation based on LNOI thin films with implanted Ag nanoparticles[J]. *Opt Express*, 2023, **31** (22): 36725−36735.
14. Sun W Q, Liu F Q, Guan J, et al. Femtosecond laser fabricated semi-tapered waveguide for Q-switched vortex laser generation[J]. *Opt Express*, 2025, **33** (2): 1749−1759.
15. Lian T H, Ji X Y, Xing J H, et al. Characteristics of *Q*-switched vortex solid-state laser with spiral chirality controlled by injection seeding[J]. *Acta Phys Sin*, 2025, **74** (17): 174204.
连天虹, 纪馨雅, 邢俊红, 等. 种子注入螺旋手性控制的调 Q 涡旋固体激光器特性[J]. 物理学报, 2025, **74** (17): 174204.
16. Zhang W D, Wei K Y, Mao D, et al. Generation of femtosecond optical vortex pulse in fiber based on an acoustically induced fiber grating[J]. *Opt Lett*, 2017, **42** (3): 454−457.

17. Feng Z Y, Gao Y X, Zhao T X, et al. Wavelength and pulse-number tunable ultrafast vortex fiber laser[J]. *Opt Laser Technol*, 2023, **159**: 108970.
18. Liu H Y, Yan L S, Chen H S, et al. High-order femtosecond vortices up to the 30th order generated from a powerful mode-locked Hermite-Gaussian laser[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12** (1): 207.
19. Aadhi A, Samanta G K. High-power, high repetition rate, tunable, ultrafast vortex beam in the near-infrared[J]. *J Opt*, 2018, **20** (1): 01LT01.
20. Kim D J, Kim J W, Clarkson W A. Q-switched Nd: YAG optical vortex lasers[J]. *Opt Express*, 2013, **21** (24): 29449−29454.
21. Sun X L, Jia Y C, Chen F. Thin-film lithium niobate-based detector: recent advances and perspectives[J]. *Opto-Electron Sci*, 2025, **4** (12): 250028.
22. Grivas C. Optically pumped planar waveguide lasers: Part II: gain media, laser systems, and applications[J]. *Prog Quantum Electron*, 2016, **45-46**: 3-160.
23. Grivas C. Optically pumped planar waveguide lasers, part I: fundamentals and fabrication techniques[J]. *Prog Quantum Electron*, 2011, **35** (6): 159−239.
24. Jia Y C, Chen F. Advances in dielectric crystal waveguides produced by direct femtosecond laser writing[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2016, **53** (1): 010001.
贾曰辰, 陈峰. 飞秒激光直写介电晶体光波导的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, **53** (1): 010001.
25. Yang X, Fan W Z, Xiao K H, et al. Femtosecond laser direct writing of single-mode short-wavelength sapphire optical waveguides (invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2025, **54** (9): 20250267.
杨鑫, 范文卓, 肖凯恒, 等. 飞秒激光直写单模短波长蓝宝石光波导 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2025, **54** (9): 20250267.
26. Sun X Y, Chen Z, Wang Y Y, et al. Femtosecond laser direct-writing optical waveguide amplifiers and lasers (invited)[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2024, **61** (3): 0314003.
孙翔宇, 陈智, 王宇莹, 等. 飞秒激光直写光波导放大器与激光器 (特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, **61** (3): 0314003.
27. Sun Y X, Li Z Y, Li M Y, et al. Advances in Raman lasers: from bulk crystals to fibers and on-chip platforms (Invited)[J]. *Chin J Lasers*, 2025, **52**(16): 1603002.
孙玉祥, 李振阳, 李牧野, 等. 拉曼激光研究进展: 晶体、光纤到片上[J]. 中国激光, 2025, **52**(16): 1603002.
28. Jiang N. Controllable fabrication and property optimization of composite structured ytterbium doped garnet structure laser ceramics[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences), 2019. https://doi.org/10.27970/d.cnki.gksgs.2019.000039.
姜楠. 复合结构镱掺杂石榴石基激光陶瓷的可控制备与性能优化[D]. 上海: 中国科学院大学 (中国科学院上海硅酸盐研究所), 2019. https://doi.org/10.27970/d.cnki.gksgs.2019.000039.
29. Yin S Y, Guo Q, Liu S R, et al. Three-dimensional multichannel waveguide grating filters[J]. *Opto-Electron Sci*, 2024, **3** (12): 240003.
30. Yin J B, Lin Z Y, Ji L F, et al. Femtosecond laser micro/nano-processing via multiple pulses incubation[J]. *Opto-Electron Technol*, 2025, **1** (2): 250003.
31. Jia Y C, Wang S X, Chen F. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: fabrication and application[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3** (10): 190042.
32. Chen F, de Aldana J R V. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, **8** (2): 251−275.
33. Jia Y C, Chen F. Compact solid-state waveguide lasers operating in the pulsed regime: a review [Invited][J]. *Chin Opt Lett*, 2019, **17** (1): 012302.
34. Liu X, Gao Q, Zheng Y, et al. Recent progress of pulsed fiber lasers based on transition-metal dichalcogenides and black phosphorus saturable absorbers[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9** (8): 2215−2231.
35. Zhao G, Han S, Wang A Z, et al. “Chemical weathering” exfoliation of atom-thick transition metal dichalcogenides and their ultrafast saturable absorption properties[J]. *Adv Funct Mater*, 2015, **25** (33): 5292−5299.
36. Jia F Q, Chen H, Liu P, et al. Nanosecond-pulsed, dual-wavelength passively Q-switched c-Cut Nd: YVO_4 laser using a few-layer Bi_2Se_3 saturable absorber[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2015, **21** (1): 1601806.
37. Xu B, Wang Y, Peng J, et al. Topological insulator Bi_2Se_3 based Q-switched Nd: $LiYF_4$ nanosecond laser at 1313 nm[J]. *Opt Express*, 2015, **23** (6): 7674−7680.
38. Lin H Y, Li W S, Lan J L, et al. All-fiber passively Q-switched 604 nm praseodymium laser with a Bi_2Se_3 saturable absorber[J]. *Appl Opt*, 2017, **56** (4): 802−805.

作者简介



王玺融 (2005-)，男，山东大学基地班 24 级本科生，研究方向为飞秒激光直写光波导器件。

E-mail：wxr112905@outlook.com



孙文青 (2000-)，女，博士研究生，研究方向为离子束材料改性及其光子与光电器件研究。

E-mail：15169831710@163.com



【通信作者】孙晓莉 (1993-)，女，教授，博士研究生导师，研究方向为离子束材料光学改性、低维光电子及光子器件、超快激光技术。

E-mail：xlsun@sdu.edu.cn

Passively Q-switched Nd:YAG waveguide vortex laser using Bi_2Se_3 saturable absorber

Wang Xirong, Sun Wenqing, Sun Xiaoli*

School of Physics, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract

Objective Vortex beams, characterized by a spiral phase wavefront and a central phase singularity, carry orbital angular momentum (OAM). The infinite orthogonal states provided by OAM offer a new degree of freedom for manipulating optical fields, showing tremendous potential in high-capacity spatial division multiplexing communications, optical micromanipulation, and quantum information processing. Compared to continuous-wave (CW) vortex beams, pulsed vortex lasers with high peak power hold significantly greater application value in nonlinear optical frequency conversion and laser micromachining. However, traditional pulsed vortex lasers generally rely on bulky solid-state crystal resonators or complex spatial optical paths, making it difficult to meet the urgent demands of modern photonics for device miniaturization and high stability. Furthermore, high-power pumping in bulk crystals induces severe thermal lensing effects, which drastically distort the fragile spatial phase of vortex beams. To achieve compact and highly stable pulsed vortex sources, dielectric optical waveguides act as an ideal platform. The micrometer-scale geometric structure of the waveguide endows the device with an extremely high surface-to-volume ratio, which significantly enhances the heat dissipation capability of the system. In terms of pulse generation, passive Q-switching using two-dimensional saturable absorbers (SAs) is highly favored due to its compact footprint. Topological insulators, particularly bismuth selenide (Bi_2Se_3), feature a Dirac-cone electronic band structure and exhibit remarkable broadband nonlinear optical responses with large modulation depths. This study aims to propose and demonstrate a highly stable, compact passively Q-switched waveguide vortex laser by combining a femtosecond laser direct written (FsLDW) Nd:YAG waveguide with a high-quality Bi_2Se_3 SA grown by chemical vapor deposition (CVD).

Methods A circular depressed-cladding waveguide was fabricated in a 1 at.% Nd^{3+}-doped YAG crystal using the FsLDW technique. The fabrication utilized a Ti:sapphire regenerative amplifier delivering 120 fs pulses at a central wavelength of 795 nm with a repetition rate of 1 kHz. Parallel low-refractive-index damage tracks were inscribed to form a circular cladding boundary with a radius of 15 μm, perfectly preserving the original luminescence properties and lattice quality of the crystalline core. The geometric morphology and guiding characteristics were verified via optical microscopy and micro-Raman spectroscopy. Concurrently, a high-quality Bi_2Se_3 thin film was synthesized on a CVD method. Atomic force microscopy (AFM) and Raman spectroscopy were employed to characterize its morphology and structural properties. The nonlinear optical absorption parameters of the Bi_2Se_3 film were quantitatively evaluated using an open-aperture *Z*-scan technique driven by a 1030 nm femtosecond fiber laser. A compact laser resonator was subsequently constructed. An 808 nm continuous-wave Ti:sapphire laser served as the pump source, coupled into the waveguide via a spherical plano-convex lens. The Bi_2Se_3 film was inserted into the cavity as the SA. Notably, a spiral phase plate (SPP) with a topological charge of 1 was utilized as the output coupler. Compared to spatial light modulators or liquid crystal q-plates, the pure dielectric SPP possesses an exceptionally high laser damage threshold, directly generating the vortex beam while ensuring the robustness of the cavity.

Results and Discussions The AFM measurements indicate that the average thickness of the synthesized Bi_2Se_3 film is approximately 16 nm. The Z-scan experimental results and subsequent nonlinear transmission fitting reveal that the Bi_2Se_3 SA exhibits an excellent modulation depth of 8.6% and a saturation intensity of 26.25 GW/cm^2 at 1 μm, indicating its strong capability for pulse modulation. In the laser performance evaluation, stable CW and passive Q-switching operations around 1064 nm were systematically compared under both TE and TM polarized pumping. After inserting the Bi_2Se_3 SA, stable Q-switched pulse trains were generated. The pulse temporal characteristics evolved typically with the increase of absorbed pump power. Specifically, at an absorbed pump power of 850 mW, the laser yielded the optimal pulsed performance: the shortest pulse width compressed to 39 ns, and the highest repetition rate reached 9.1 MHz. The corresponding maximum single-pulse energy was calculated to be 4.42 nJ. The recorded pulse trains exhibited uniform amplitude and high temporal stability without distinct amplitude fluctuations. Furthermore, the near-field intensity distributions captured by a CCD camera demonstrated a typical annular (donut-shaped) hollow profile, confirming the high generation quality of the vortex beam. More importantly, comparing the beam profiles at low and high pump powers, the annular contour showed no obvious distortion or degradation. This phenomenon provides strong evidence that the unique geometric structure of the circular waveguide effectively mitigates the thermal lensing effect through rapid transverse heat dissipation. Theoretical estimations further confirm that the maximum intracavity peak pulse energy fluence (1.3 mJ/cm^2) is well below the physical damage threshold of the Bi_2Se_3 film (3.18 mJ/cm^2).

*Correspondence: Sun X L, E-mail: xlsun@sdu.edu.cn

Conclusions A compact, highly thermally stable, passively Q-switched Nd:YAG waveguide vortex laser was successfully demonstrated. The integration of the FsLDW-customized circular depressed-cladding waveguide and the CVD-grown Bi_2Se_3 topological insulator effectively overcomes the thermal and physical bulkiness bottlenecks of traditional solid-state vortex lasers. The robust thermal management capability of the waveguide physically locks the high-order transverse mode, ensuring distortion-free annular vortex beam output even under intense pumping conditions. The experimental results verify the excellent nonlinear optical modulation properties and impressive thermal damage resistance of the Bi_2Se_3 film. This research provides a novel experimental paradigm and solid foundation for the development of miniaturized, highly stable all-solid-state pulsed vortex sources, paving the way for advanced on-chip photonic integrated circuits and optical manipulation systems.

Keywords: waveguide laser; Nd:YAG; passive Q-switching; Bi_2Se_3; vortex laser

Wang X R, Sun W Q, Sun X L. Passively Q-switched Nd:YAG waveguide vortex laser using Bi_2Se_3 saturable absorber[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(7): 260082; DOI: 10.12086/oee.2026.260082

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org

扫描二维码，获取 PDF 全文