

# 半导体光源产生无衍射 Bessel 光束的研究进展

王涛<sup>1</sup>, 刘岚<sup>2</sup>, 吴逢铁<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 漯河医学高等专科学校, 河南 漯河 462002)

**摘要:** 通过对时间相干性、空间相干性产生无衍射光束的理论分析和实验对比研究, 证实产生无衍射光束的过程中, 空间相干性比时间相干性发挥更大的作用. 介绍绿光发光二极管(LED)、宽条形边发射半导体激光器和垂直腔面发射半导体激光器产生无衍射光束的国内外研究进展. 对比分析表明: 通过提高光源的空间相干性能够明显提高无衍射光束的质量.

**关键词:** 半导体光源; 时间相干性; 空间相干性; Bessel 光束

**中图分类号:** O 436.1

**文献标志码:** A

无衍射光束是由 Durnin 在 1987 年首次提出的, 由于其光场分布具有第一类零阶 Bessel 函数的形式, 它又称 Bessel 光束<sup>[1]</sup>. 在传播过程中, 无衍射光能保持光束横截面光强度随着距离的增加不发生变化, 并且中心光强极高, 遇到障碍物能够重建<sup>[2-4]</sup>, 通过光束变换可获得局域空心光束(bottle beams)<sup>[5-6]</sup>. 因此, 无衍射光被广泛应用在精确测量与准直、带电粒子和中性原子引导<sup>[7-8]</sup>、微操作实验<sup>[9-10]</sup>、生物细胞的成像和信息提取<sup>[11-12]</sup>、非线性光学<sup>[13-14]</sup>等领域. 理想的 Bessel 光束对应无限大的能量, 这在实际中是不可能得到的, 而实验中可以采用环缝法<sup>[15]</sup>、球差透镜<sup>[16]</sup>、计算机全息法<sup>[17]</sup>、轴棱锥法<sup>[18-21]</sup>等方法得到近似的无衍射 Bessel 光束. 由于产生 Bessel 光束需要光源具有较高的相干性, 所以传统上国内外学者大多使用气体激光器或固体激光器作为光源来产生 Bessel 光束. 近年来的研究表明, 在 Bessel 光束产生和传播的过程中, 空间相干性发挥了比时间相干性更重要的作用<sup>[22]</sup>, 国内外已有学者通过提高非相干光源的空间相干性来获得 Bessel 光束. 作为非相干光源的一种, 半导体光源的相干性介于白炽灯和气体、固体激光器之间, 具有功率输出大、效率高、尺寸小等性质, 可以大致分为发光二极管(LED)和半导体激光器(LD)两类. LED 是一种新型固态光源, 具有节能、环保、寿命长、可靠耐用、响应时间快和高显色性等诸多优点, 而且 LED 价格低廉、极易获得, 用它作为产生 Bessel 光束的光源具有良好的市场前景<sup>[23]</sup>. 半导体激光器的输出光强可以达到几百毫瓦<sup>[24]</sup>, 用它来产生高光强的 Bessel 光束, 可以更好地囚禁和操控粒子. 本文以绿光 LED 为重点、以宽条形边发射半导体激光器和垂直腔面发射半导体激光器作为代表, 介绍国内外半导体光源产生 Bessel 光束的最新进展.

## 1 相干性对 Bessel 光束产生和传播的影响

近几年, 国内外学者关于相干性对 Bessel 光束的影响作了很多研究. 这些研究为半导体光源产生 Bessel 光束奠定了基础. 2005 年, Fischer 等<sup>[25]</sup>系统地研究了时间相干性和空间相干性对 Bessel 光束的产生和传播的影响. 在时间相干性方面, 推导出无衍射区的临界半径  $r_{cr}$  为

$$\frac{r_{cr}}{\lambda} = \frac{1}{4(n-1)\gamma(\Delta\omega/\omega_0)} = \frac{1.67}{4(n-1)\gamma(\Delta\omega_{FWHM}/\omega_0)}, \quad (1)$$

**收稿日期:** 2012-10-26

**通信作者:** 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学的研究. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61178015); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01278); 福建省泉州市科技计划重点项目(2011G9)

Bessel 光束的条纹数  $N_{fr}$  为

$$N_{fr} \approx \text{Int}(\frac{2k_r(0)r_c - \pi/2}{2\pi}) \approx \text{Int}(\frac{1.67(\Delta\omega_{FWHM}/\omega)^{-1} - 1/2}{2}). \tag{2}$$

由式(1)~(2)可以看出:光的时间相干性越好,无衍射区的临界半径越大,Bessel 光束的条纹数越多.

在实验上,Fischer 等<sup>[25]</sup>使用钛蓝宝石激光器产生 Bessel 光束. 钛蓝宝石激光器具有很高的空间相干性,由连续输出模式转变为锁模输出模式,光场的时间相干性降低. 随着时间相干性的降低,光场横截面的条纹数降低,无衍射区的临界半径减小,但是连续输出模式和锁模输出模式产生的 Bessel 光束的最大无衍射距离都与理论值符合得很好. 这说明锁模模式增加了光束的带宽,降低了时间相干性,但没有减小 Bessel 光束的传播范围.

在空间相干性方面,Fischer 又通过用卤灯作为光源的实验验证了空间相干性对 Bessel 光束的影响. Fischer 分别使白光通过单模光纤和不同孔径的光阑,通过比较产生的 Bessel 光束的质量,证实了空间相干性对产生 Bessel 光束有很大影响.

2012 年,程治明等<sup>[26]</sup>对此进行了进一步的实验研究,系统地研究了绿光 LED 产生 Bessel 光束,并取得了较好的结果. 根据空间相干性的反比例公式,即

$$\frac{bd}{D} \approx \lambda, \tag{3}$$

计算出光场的相干范围的横向线度,并在实验中采用绿光 LED 作为光源,用相干范围横向线度内的光场得到了较为理想的 Bessel 光束.

绿光 LED 的发光横向线度  $b=1\text{ mm}$ ,波长  $\lambda=531\text{ nm}$ ,光源与光阑间距  $D=320\text{ mm}$ ,由式(3)计算可得  $d=0.169\text{ mm}$ . 即在距光源  $320\text{ mm}$  处用一直径为  $0.1\text{ mm}(<0.169\text{ mm})$  的光阑限制,以确保通过光阑后入射轴棱锥的光场具有一定的相干性. 实验结果表明:所得到的 Bessel 光束截面图中光强亮暗对比度随光阑孔径的增大而降低,当光阑的孔径超过  $0.169\text{ mm}$  时,Bessel 光束截面图的亮暗对比度降到更低,甚至不能产生 Bessel 光束.

综上所述,当光源具有较好的空间相干性时,时间相干性的改变对 Bessel 光束的性质影响不大;当光源时间相干性不好时,可以提高其空间相干性来产生质量较好的 Bessel 光束;改变光源的空间相干性可以明显地改变 Bessel 光束的质量. 所以,上述理论与实验表明:在 Bessel 光束的产生和传播过程中,光源空间相干性发挥了比时间相干性更重要的作用.

## 2 绿光 LED 产生 Bessel 光束

2005 年,Fischer 等<sup>[25]</sup>利用相干长度为  $46\text{ }\mu\text{m}$  的超发光二极管,通过底角为  $5^\circ$  的轴棱锥得到了无衍射范围为  $21\text{ mm}$  的 Bessel 光束. 2008 年,Sokolovskii 等<sup>[22]</sup>利用 4 种相干长度相同但空间相干性不同的 LED,通过底角为  $1^\circ$  的轴棱锥得到不同的最大无衍射距离,并由此推断空间相干性是造成 LED 产生不同最大无衍射距离的原因.

由于绿光 LED 发出的光是非单色光,可将非单色光分解成不同频率的单色光的线性组合,并将各波长产生的 Bessel 光场作相应的非相干叠加,即可得到轴棱锥后的总光强分布. 光束通过轴棱锥后的光场分布为

$$E(r_2,z,\lambda) = (-\frac{ik(\lambda)}{z})\exp[ik(\lambda)(z + \frac{r_2^2}{2z})] \times \int_0^R J_0(\frac{k(\lambda)r_1r_2}{z})\exp\{\frac{ik(\lambda)r_1^2}{2z} - ik(\lambda)[n(\lambda) - 1]\gamma r_1\}r_1dr_1. \tag{4}$$

将各波长对应的光强分布进行叠加,可得到多波长光波入射轴棱锥的光强分布为

$$I(r_2,z) = \sum_{l=1}^{20} A_l |E(r_2,z,\lambda_l)|^2. \tag{5}$$

根据式(4),(5),可以理论模拟出 Bessel 光束在不同位置的光强截面图,如图 1 所示.

在实验中,使 LED 灯珠发出的光经聚光筒聚光再通过光阑后进入准直扩束系统,得到光强分布较为均匀的平行光;然后,透过轴棱锥得到近似无衍射 Bessel 光束. 用体视显微镜进行观察得到的不同距

离处的光强分布图,如图 2 所示.对比图 1 与图 2 可以看出,实验与理论较为符合.

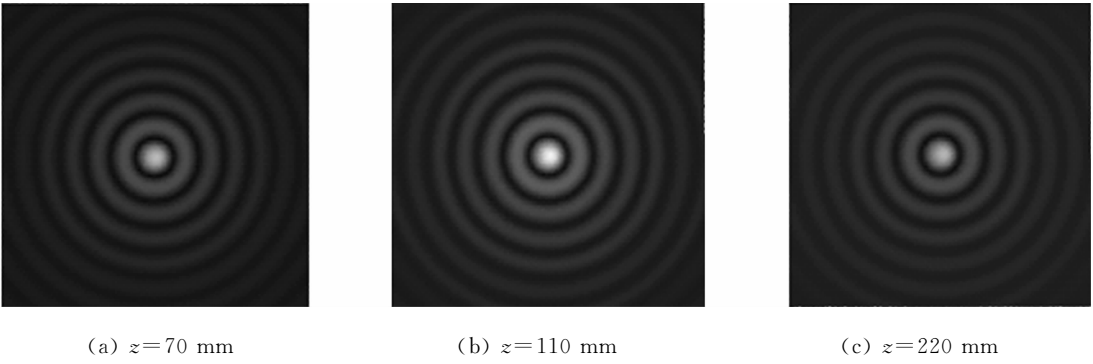


图 1 绿光 LED 产生的 Bessel 光束在不同位置的模拟光强截面图

Fig. 1 Cross section intensity by simulation of the Bessel beam generated by green LED in different position

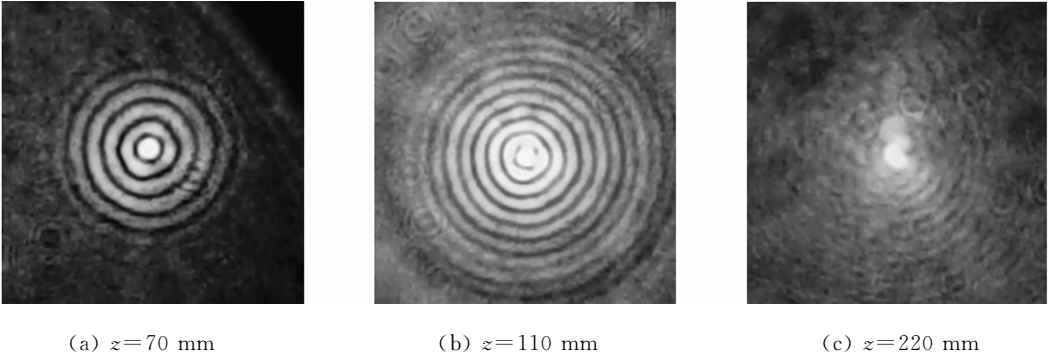


图 2 绿光 LED 产生的 Bessel 光束在不同位置的实验光强截面图

Fig. 2 Cross section intensity by experiment of the Bessel beam generated by green LED in different position

理论计算得到的最大无衍射距离为 225.18 mm,而对照图 2 可知,实验所得最大无衍射距离与理论基本符合.理论计算最大光斑半径为 25.43  $\mu\text{m}$ ,实验测得中心光斑直径约为 50.1  $\mu\text{m}$ ,与理论计算十分吻合.

绿光 LED 的相干长度只有 7.8  $\mu\text{m}$ ,时间相干性明显弱于超发光二极管.但是通过使用光阑提高空间相干性,使用底角更小的轴棱锥获得了更大的无衍射距离,这对今后利用 LED 作为光源产生 Bessel 光束具有指导意义.

3 宽条形边发射半导体激光器产生 Bessel 光束

2009 年,Sokolovskii 等<sup>[27]</sup>利用宽条形外腔激光器作为光源,通过底角为 10°的轴棱锥产生 Bessel 光束.宽条形外腔激光器产生 Bessel 光束的实验装置<sup>[28]</sup>,如图 3 所示.

实验使用光谱半高宽度( $W_{\text{HM}}$ )分别为 0.6, 1.2 nm 的光源,在总输出功率为 450 mW 和高斯光斑直径为 2 mm 的情况下,对应的中心光斑功率分别为 7.0,5.5 mW.在这两种条件下,Bessel 光束的传播距离同样是在 3~4 mm,如图 4 所示.但是这个数值远小于平行光入射轴棱锥的最大无衍射距离(23 mm).造成这个差别的原因,可能是半导体激光器的较差的空间相干性导致的多模输出及像散.

为了解决空间相干性差的问题,Sokolovskii 等<sup>[29]</sup>使用宽条形弯曲凹槽分布式布拉格反射(c-DBR)激光器产生 Bessel 光束.宽条形 c-DBR 激光器产

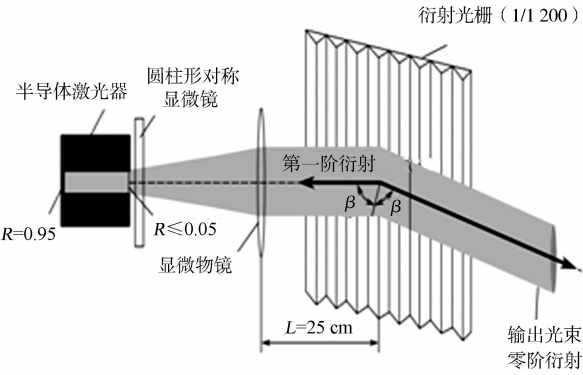


图 3 宽条形外腔激光器装置图  
Fig. 3 Schematic diagram of an external-cavity laser

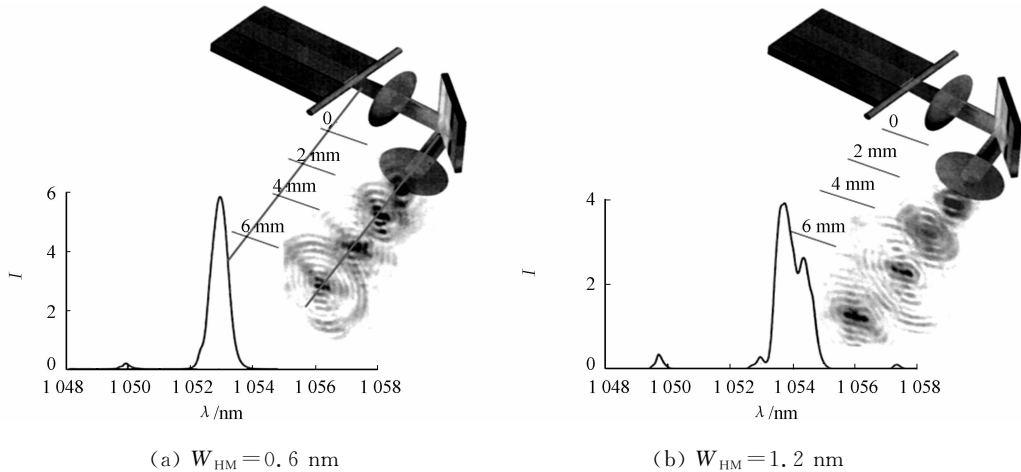


图 4 宽条形外腔激光器产生 Bessel 光束在不同位置的光强截面图

Fig. 4 Patterns of intensity distribution in the cross section of a Bessel beam at various distances from the broad-stripe external-cavity laser

生 Bessel 光束的实验装置<sup>[30]</sup>, 如图 5 所示. 由于 c-DBR 激光器的谐振腔是圆柱型对称的, 保证了激光产生所有模式的几何结构相同. 这种结构可以减少激光发射的多模和像散的负面影响. 以宽条形 c-DBR 激光器作为光源, 通过底角为  $10^\circ$  的轴棱锥产生 Bessel 光束的传播距离可以达到 15 mm, 如图 6 所示.

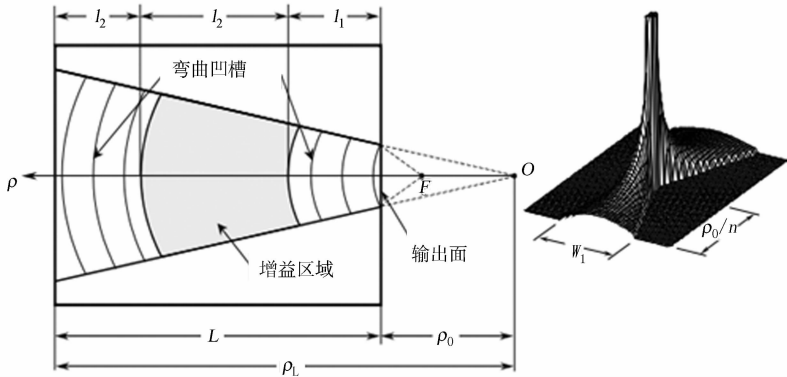


图 5 宽条形 c-DBR 激光器装置图及焦点处的光强分布

Fig. 5 Simplified schematic of the c-DBR laser and the intensity distribution near the focal point

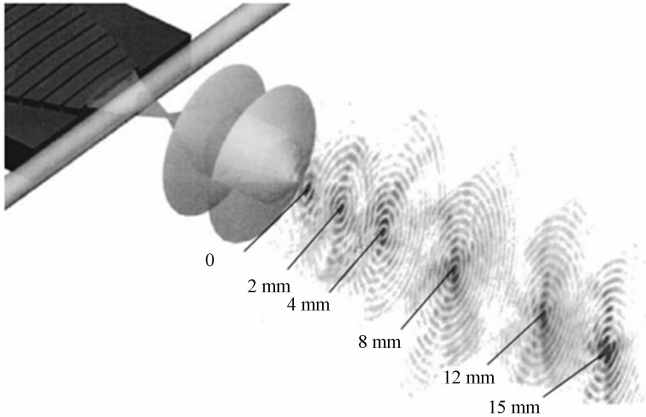


图 6 宽条形 c-DBR 激光器产生 Bessel 光束在不同位置处的光强截面图

Fig. 6 Intensity distributions in various transverse cross sections of a Bessel beam formed using a c-DBR laser

通过对比线性谐振腔(图 3)和圆柱型对称谐振腔(图 5), 可以证明多模发射和像散在半导体光源产生 Bessel 光束的过程中产生了很大的负面影响. 因此, 可以通过改进谐振腔的结构, 提高输出光的空间相干性来减小这些负面影响.

4 垂直腔面发射半导体激光器产生 Bessel 光束

2008 年, Sokolovskii 等<sup>[22]</sup>使用垂直腔面发射激光器来产生 Bessel 光束, 在泵浦电流为 1 mA 时得到了清晰的 Bessel 光束图像. 但是当电流增大到 3 mA 时, 激光器开始产生多模, 导致了相干长度和空间相干性的降低, 从而导致 Bessel 光束的对比度和环数的明显减少.

2011 年, Sokolovskii 等分析在光束质量不好的情况下, 限制 Bessel 光最大无衍射距离的主要因素可能是光束的发散而不是轴棱锥的孔径和底角. 因此, Sokolovskii 首次利用电泵浦的垂直外腔面发射激光器(EP-VECSELs)作为光源产生 Bessel 光束<sup>[31-32]</sup>. EP-VECSELs 产生 Bessel 光束的实验装置, 如图 7 所示.

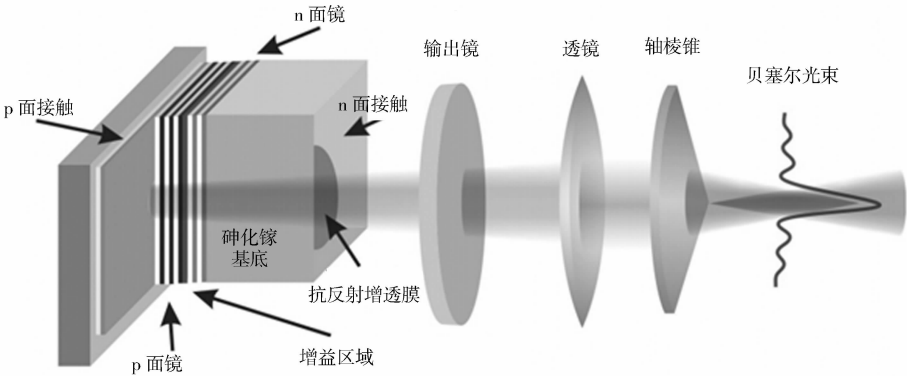
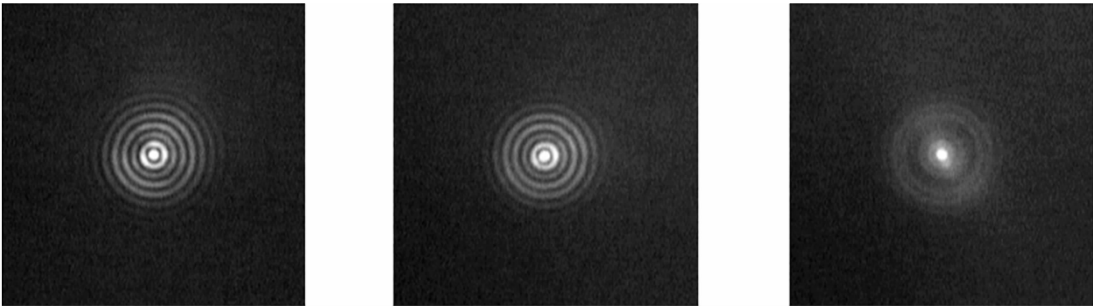


图 7 EP-VECSELs 产生 Bessel 光束的装置图

Fig. 7 Simplified optical scheme of the electrically pumped vertical external cavity surface emitting laser for generation of bessel beam

EP-VECSELs 有 1 个复合光学外腔, 可以控制输出光的模式和波长, 因而它输出的光可以同时拥有高功率和高光束质量. 在连续输出模式下, EP-VECSELs 光谱半高宽度小于 0.2 nm, 在注入电流为 1.4 A 时, 在 10% 透射率输出镜的输出功率可以达到 550 mW. 在距离轴棱锥 120 mm 处不同输出功率下 Bessel 光的光强截面图, 如图 8 所示.

从图 8 可以发现: 随着功率的增加, Bessel 光束的光束质量不断下降. 这是由于功率增加导致多模输出, 以及像散等因素对 Bessel 光束产生影响. 但是, 可以看到 EP-VECSELs 产生功率达到几百毫瓦并且传播距离达到十几厘米时, 依然存在无衍射特性的 Bessel 光. 这是目前半导体激光器产生 Bessel 光束所能达到的最好结果.



(a)  $P=3\text{ mW}$  (b)  $P=40\text{ mW}$  (c)  $P=288\text{ mW}$

图 8 无衍射距离在 120 mm 处不同输出功率下 Bessel 的光强截面图

Fig. 8 Intensity distribution of the cross section at distance 120 mm with different output power

5 结论

绿光 LED、宽条形 c-DBR 半导体激光器和 EP-VECSELs 半导体光源在产生 Bessel 光束的过程中, 分别采用了不同的方法来提高光源的空间相干性. 与之前同类光源相比, 它们分别显著提高了产生

Bessel 光束的质量. 这些研究对未来提高半导体光源产生 Bessel 光束的光束质量具有指导意义.

通过对比时间相干性和空间相干性对产生 Bessel 光束的影响的最新研究,证实了空间相干性在产生 Bessel 光束的过程中发挥了更大的作用. 与之前半导体光源产生 Bessel 光束实验的对比,可以发现提高光源的空间相干性可以明显地提高产生的 Bessel 光束的光束质量. 绿光 LED、宽条形边发射激光器、垂直腔面发射激光器作为光源产生 Bessel 光束的研究,对使用 Bessel 光束进行需要高功率的光学微操作,以及降低光学微操作的成本,提高它的灵活性具有重要意义.

### 参考文献:

- [1] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 651-654.
- [2] CHAVEZ-CERDA S, NEW G H C. Evolution of focused Hankel waves and Bessel beams[J]. *Optics Communications*, 2000, 181(4/5/6): 369-377.
- [3] 张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(10): 1131-1137.
- [4] FAHRBACH F O, SIMON P, ROHRBACH A. Microscopy with self-reconstructing beams[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11): 780-785.
- [5] ZENG Xia-hui, WU Feng-tie. The analytical description and experiments of the optical bottle generated by an axicon and a lens[J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55(18/19/20): 3071-3081.
- [6] 程治明, 吴逢铁, 张前安, 等. 自成像局域空心光束产生的新方法 & 粒子俘获[J]. *物理学报*, 2012, 61(9): 094201.
- [7] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [8] SUMMERS M D, REID J P, MCGLOIN D. Optical guiding of aerosol droplets[J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6373-6380.
- [9] ARLT J, GARCES-CHAVEZ V, SIBBETT W, et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam[J]. *Optics Communication*, 2001, 197(4/5/6): 239-245.
- [10] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, PADGETT M J, et al. Observation of the transfer of the local angular momentum density of a multiringed light beam to an optically trapped particle[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(9): 093602.
- [11] PLANCHON T A, LIANG G, MILKIE D E, et al. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination[J]. *Nature Methods*, 2011, 8(5): 417-423.
- [12] KELLER P J, SCHMIDT A D, SANTELLA A, et al. Fast, high-contrast imaging of animal development with scanned light sheet-based structured-illumination microscopy[J]. *Nature Methods*, 2010, 7(8): 637-642.
- [13] NIGGL L, MAIER M. Efficient conical emission of stimulated Raman stokes light generated by a Bessel pump beam[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 910-912.
- [14] KLEWITZ S, LEIDERER P, HERMINGHAUS S, et al. Tunable stimulated Raman scattering by pumping with Bessel beams[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(4): 248-250.
- [15] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [16] TURUNEN J, VASARA A, FRIBERG A T. Holographic generation of diffraction-free beams[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(19): 3959-3962.
- [17] VASARA A, TURUNE J, FRIBERG A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1989, 6(11): 1748-1757.
- [18] GUTIERREZ-VEGA C J, RODRIGUEZ-MASEGOSA R, CHAVEZ-CERDA S. Bessel-Gauss resonator with spherical output mirror: Geometrical-and wave-optics analysis[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(11): 2113-2122.
- [19] 吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 轴棱锥产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3125-3129.
- [20] 马宝田, 吴逢铁, 马亮. 非稳腔主动式直接获取纳秒近似无衍射贝塞尔绿光[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6213-6218.
- [21] 程治明, 吴逢铁, 张前安, 等. 热光源产生 Bessel 光束的理论与实验[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0726001.

[22] SOKOLOVSKII G S, DUDELEV V V, LOSEV S N, et al. Generation of propagation-invariant light beams from semiconductor light sources[J]. Technical Physics Letters, 2008, 34(12): 1075-1078.

[23] 范丹丹, 刘岚, 程治明, 等. 非相干光源产生无衍射光束的进展研究[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2012, 33(2): 138-142.

[24] VINOKUROV D A, ZORINA S A, KAPITONOV V A, et al. High-power laser diodes based on asymmetric separate-confinement heterostructures[J]. Semiconductors, 2005, 39(3): 370-373.

[25] FISCHER P, BROWN C T A, MORRIS J E, et al. White light propagation invariant beams[J]. Optics Express, 2005, 13(17): 6657-6666.

[26] 程治明, 吴逢铁, 范丹丹, 等. 绿光 LED 产生无衍射 Bessel 光束[J]. 中国科学, 2012, 42(8): 805-811.

[27] SOKOLOVSKII G S, DUDELEV V V, LOSEV S N, et al. Study of non-diffracting light beams from broad-stripe edge-emitting semiconductor lasers[J]. Technical Physics Letters, 2010, 36(1): 9-12.

[28] VINOKUROV D A, DERYAGIN A G, DUDELEV V V, et al. High-power external-cavity AlGaAs/GaAs/InGaAs quantum-dimensional heterolasers ( $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$ )[J]. Technical Physics Letters, 2008, 34(3): 187-189.

[29] SOKOLOVSKII G S, DUDELEV V V, GADZHIEV I M, et al. Output radiation focusing in curved-grating distributed bragg reflector laser[J]. Technical Physics Letters, 2005, 31(10): 824-826.

[30] BOUCHER Y G, DERYANGIN A G, KUCHINSKII V I, et al. Threshold crossing and spectral properties of a curved-grating distributed bragg reflector quantum-well laser (c-DBR)[J]. Semiconductor Science and Technology, 2004, 19(8): 1010-1014.

[31] SOKOLOVSKII G S, ZOLOTOVSKAYA S A, LOSEV S N, et al. High power Bessel beams from EP-VECSELs [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7919(1): 79190J.

[32] SOKOLOVSKII G S, BUTKUS M, LOSEV S N, et al. Non-diffracting beams from surface-emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8242(1): 82420T.

Semiconductor Light Source Generating  
Non-Diffracting Bessel Beams

WANG Tao<sup>1</sup>, LIU Lan<sup>2</sup>, WU Feng-tie<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Luohe Medical College, Luohe 462002, China)

**Abstract:** According to the theory analysis and experimental research of the Bessel beam with different degree of temporal coherence and spatial coherence, we can conclude that spatial coherence plays more important role than that of temporal coherence on the generation and propagation of Bessel beam. The green light-emitting diodes, broad-stripe edge-emitting semiconductor lasers and vertical-cavity surface-emitting lasers are presented as the light source of generating Bessel beam. Compared with former results, we find that the quality of Bessel beam can be significantly enhanced by improving the spatial coherence of light sources.

**Keywords:** semiconductor light sources; temporal coherence; spatial coherence; Bessel beam

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 吴逢铁)