文章编号: 1000-7032(2015)08-0930-05

透明导电薄膜 ITO 对浅面浮雕 VCSEL 的影响

李秀山[1,2], 宁永强[1*], 张 星[1], 贾 鹏[1,2], 秦 莉[1], 刘 云[1], 王立军[1]
(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对于顶面出光的浅面浮雕 VCSEL 结构,有源区的电流密度分布的不均性制约着单模稳定性的提高。为此,提出了一种新型结构: 氧化铟锡透明导电薄膜(ITO)浅面浮雕 VCSEL。该结构不仅能够增大高阶模式的阈值增益,还能够提高基模的增益,实现基模对高阶模式的稳定抑制。研究了 ITO 的厚度对阈值增益的影响及 ITO 对 VCSEL 有源区电流密度分布的影响。研究结果表明: 在 ITO 的厚度为半波长的整数倍时, 基模对高阶模式的限制作用最强; ITO 通过改善 VCSEL 有源区的电流密度分布,达到了增大基模的增益和降低高阶模式增益的目的,同时还降低了串联电阻和外电压。

关 键 词: 垂直腔面发射半导体激光器; 透明导电薄膜; 浅面浮雕; 单模
中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20153608.0930

Effect of Indium Tin Oxide as Transparent Conductive Layer on Shallow Surface Relief VCSEL

LI Xiu-shan[1,2], NING Yong-qiang[1*], ZHANG Xing[1],
JIA Peng[1,2], QIN Li[1], LIU Yun[1], WANG Li-jun[1]
(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn*

Abstract: The mode stability of shallow surface relief vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) is constrained by the nonuniform current density distribution in the active region. In order to solve this problem, a new type of structure was put forward, in which indium tin oxide (ITO) transparent conductive layer was employed in shallow surface relief VCSEL. This structure not only can increase the threshold gain of the higher-order modes but also can improve the gain of fundamental model and strengthen the suppressive effect of fundamental mode on higher order mode. The influence of the ITO thickness on the threshold gain and the effect of ITO on the current density distribution in active region are studied. It is found that the suppressive effect of fundamental mode on higher order mode is strongest when the thickness of ITO is integral multiples of the half wavelength. The gain of fundamental mode increases and the gain of higher order decreases with the improving of the current density distribution in the active region of VCSEL, and at the same time, the series resistance and the voltage are also reduced.

Key words: VCSEL; ITO film; surface relief; single mode

收稿日期: 2015-03-07; **修订日期:** 2015-04-12
基金项目: 国家自然科学基金(61234004,51172225,61204056,61376070,61474118,61176045,61204055); 吉林省科技厅项目(20140101172JC, 20130206006GX); 吉林省科技发展计划(20150203011GX); 长春市科技发展计划(14KG006)资助项目

1 引　言

相比于边发射激光器，垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有发散角小、阈值电流低、光斑对称、工艺简单、测试方便、列阵集成高、制造成本低等优点，广泛应用于短距离光传输、光储存、激光打印和光谱分析等方面[1-4]。VCSEL 的谐振腔很短，约为 1 μm，很容易实现单纵模激射[5]。然而，相比于短的腔长，VCSEL 的横向尺寸很大，所以其激射通常是多横模激射[6]，导致光谱线宽和远场发散角增大，这些缺点阻碍了 VCSEL 应用领域的拓展。

氧化孔直径小于 4 μm 的 VCSEL 容易实现单模，但是大的微分电阻和高电流密度限制了其使用寿命，并且小的有源区面积也限制着光功率的提高，使其难以在远距离通讯和红外探测等高功率方面获得应用[5]。为了增大 VCSEL 的输出功率，通常采用的方式是增大有源区面积。采用以下几种结构可以在有源区直径大于 4 μm 的 VCSEL 中实现基模对高阶模式的抑制：光子晶体结构[7]、外腔结构[8]、多氧化层散射结构[9]、延长谐振腔结构[10]、反相光波导结构[11]以及 Zn 无序诱导掺杂结构[12]等。由于电流在有源区分布不均匀的原因，上述结构只适用于氧化孔直径小于 20 μm 的情况。当氧化孔直径大于 20 μm 时，由于电流注入的不均匀，高阶模式的增益相对于基模更有竞争力[13]。可见，电流密度分布的均匀性对模式的输出有重要影响。

环形电极结构[14]和透明导电薄膜电极结构[15-16]能够改善电流密度分布的均匀性，但是这两种结构只增加了基模与有源区电流分布的重叠，增大了基模的增益，却没有降低高阶模式的增益。为此本文设计了一种新型的透明导电薄膜浅面浮雕 VCSEL 结构来解决以上问题。该结构通过改善电流在有源区的分布来增加基模的增益并降低高阶模式的增益，在不影响基模阈值的前提下，通过增加高阶模式的端面反射增大了高阶模式的阈值，从而实现了基模对高阶模式的稳定抑制。

2 理论模拟

器件的结构如图 1 所示。在普通 VCSEL 器件的出光孔表面生长一层绝缘介质膜 SiO_2，腐蚀掉位于出光孔中心的介质膜 SiO_2 后，在 VCSEL 出光面生长一层 ITO，使电流从 VCSEL 的电极区和出光孔中心注入。

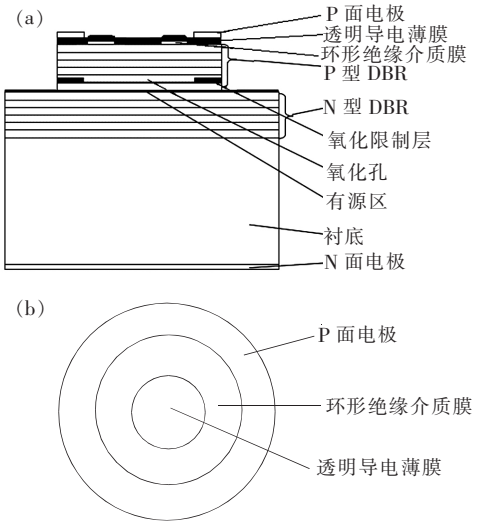


图 1　ITO 浅面浮雕 VCSEL 的结构示意图(a)和俯视图(b)

Fig. 1　Schematic illustration of our device sectional (a) and top view (b)

在 VCSEL 表面刻蚀出浅面浮雕形成反相层，能够通过增大高阶模式的端面损耗来增大高阶模式的阈值，从而实现对高阶模式的抑制[17]。在 VCSEL 表面制作介质膜 SiO_2 作为浅面浮雕结构，其抑制高阶模式的原理与在 VCSEL 表面刻蚀浅面浮雕是相同的，本文将不再做重复研究。根据文献[17]，介质膜 SiO_2 的厚度应为出射波长的 1/4，介质膜 SiO_2 中间被刻蚀部分的直径应为氧化孔直径的 55%。由于 VCSEL 表面电极的需要，介质膜 SiO_2 的外环直径等于出光孔直径。采用 SiO_2 的原因是在 VCSEL 器件制作过程中，在生长 P 面电极之前，需要在外延片的 P 面大面积生长绝缘层 SiO_2 以防止 P 面电极短路。采用 SiO_2 介质膜避免了增加工艺步骤。

ITO 的厚度会影响端面光的相位，进而对端面反射率产生一定的影响，最终影响到模式的阈值增益。为了简化运算，我们假设只有端面反射损耗，P 面的反射率为 R_1，N 面的反射率 $R_2=1$，则阈值增益表达式简化为

$$G=-\frac{1}{2LT_x}\ln R_1R_2, \tag{1}$$

根据该公式可以计算 ITO 的厚度对阈值增益的影响。材料的参数如下：波长 $\lambda=850$ nm；腔长 $L=2\,550$ nm；纵向限制因子 $T_x=0.021$；P 面反射率

$R_1 = 0.994\ 5$; SiO_2 的折射率 $n_{SiO_2} = 1.452$; ITO 的折射率 $n_{ITO} = 1.764$。

注入有源区的电流分布会对 VCSEL 的输出模式产生重要的影响[13]。为了研究该结构中有源区的电流分布对光模式的改善，首先需要研究 VCSEL 波导中的光场分布。圆形台面 VCSEL 属于圆柱形波导结构，圆柱形波导结构的折射率为分布布拉格反射镜(DBR)和氧化限制层的平均折射率。根据文献[8]，VCSEL 波导层的折射率为 3.26，包层折射率为 3.16，折射率差近似为 0.1。

为了简化求解，我们选择波导内一个偏振方向稳定的光来计算。假设偏振光的横向电矢量为 E_y，根据标量波动方程

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n^2 E_y = 0, \tag{2}$$

式中，∇^2 是拉普拉斯算子。在圆形波导中，∇^2 表示为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \tag{3}$$

其中 z 是光的传播方向。

采用 COMSOL 有限元分析法得到 VCSEL 波导中的模式分布后，为了使注入有源区中的电流能够更好地提高基模的增益，需优化有源区中的电流密度分布。VCSEL 具体材料的参数如表 1 所示。

表 1 VCSEL 各层的电导率

Table 1 Conductivity of each layer

类型	厚度/μm	内径/μm	外径/μm	电导率/(S·m^{-1})
P 面电极	0.3	30	60	6×10^7
P 型 DBR	2.8		60	2.76×10^2
氧化限制层	0.1	30	60	1×10^{-5}
环形绝缘介质膜	0.15	15	30	1×10^{-5}
透明导电薄膜	0.28		60	7.3×10^4
有源区	0.23	截面为边长 1 000 μm 的正方形		590
N 型 DBR	5.78	截面为边长 1 000 μm 的正方形		5.9×10^3
衬底	5	截面为边长 1 000 μm 的正方形		4.5×10^4
N 面电极	0.3	截面为边长 1 000 μm 的正方形		6×10^7

3 结果与讨论

3.1 ITO 厚度对端面损耗的影响

根据阈值增益的表达式(1)，在生长 ITO 的过程中，只有反射率 R_2 随 ITO 厚度发生变化。运用 MATLAB 软件计算得出的阈值增益与 ITO 厚度的关系如图 2 所示。阈值增益随着 ITO 厚度的变化呈现周期性的增大和减小，周期大小等于 ITO 中光的半波长。对于 VCSEL 表面生长有 SiO_2 反相层的部分，当 ITO 的厚度为 850 nm 波长光的半波长的 n 倍时，反射损耗引起的阈值损耗最小；当 ITO 的厚度为 850 nm 波长光的半波长的 $(n+0.25)$ 倍时，反射损耗引起的阈值损耗最大。而 VCSEL 表面未生长 SiO_2 反相层部分的阈值增益受 ITO 厚度的影响则正好相反。根据文献[7]，在 ITO 的厚度为半波长的 n 倍时，端面损耗引起的基模对高阶模式的限制作用最强。

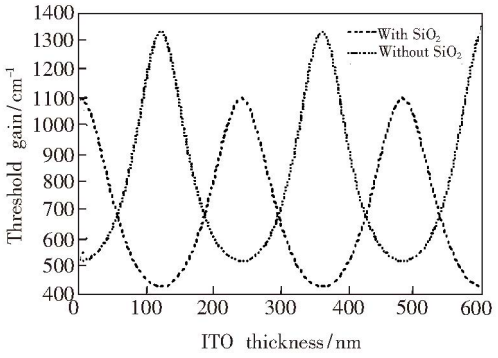


图 2 ITO 厚度对阈值增益的影响

Fig. 2 Effect of ITO thickness on threshold gain

3.2 ITO 对模式增益的影响

首先，我们采用 COMSOL 有限元分析法仿真得到有源区中的光场模式，为了简化运算，选取 LP_{01}、LP_{11}、LP_{21} 模式，图 3 为与其光场分布对应的能量二维图及曲线图。图 3(b)中，基模 LP_{01} 与 LP_{11}、LP_{21} 模式存在一定的交叠，基模 LP_{01} 的主要光场能量分布于波导的中心区域，而高阶模式

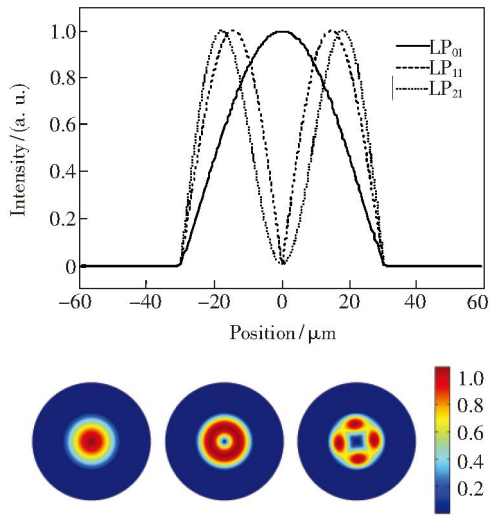


图 3　LP_{01}、LP_{11}、LP_{21} 模式沿半径方向的分布情况(a)及二维分布图(b)。

Fig. 3　LP_{01}, LP_{11}, LP_{21} pattern mode of distribution along the radius (a) and in two dimension (b).

LP_{11}、LP_{21} 的主要能量却分布于有源区的边缘。

当有源区的边缘电流密度分布较高时，有利于高阶模式的激射[13]。相比于基模 LP_{01} 的增益变化，次高阶模 LP_{11} 的竞争更为明显。并且随着注入有源区的电流密度分布向边缘扩散，边缘模式 LP_{21} 模的竞争力将越来越强。图 4 为应用 COMSOL 有限元分析软件模拟的 ITO 浅面浮雕 VCSEL 有源区的电流密度分布。为了说明本结构对电流分布的改善，我们和普通结构 VCSEL 做了对比，普通顶面出光 VCSEL 的结构不包括 ITO 和环形绝缘介质层。从图中可以看出，相比于普通 VCSEL 结构，ITO 浅面浮雕 VCSEL 的有源区中心部分的电流分布增多。随着与有源区中心距离的增大，电流密度减小，但在有源区边缘突然增大。这是因为电流不仅从台面的中心注入有源区，还从台面的电极边缘注入有源区。但是相比于普通顶面出光 VCSEL，ITO 浅面浮雕 VCSEL 在有源区边缘的电流密度下降了很多。可见，ITO 浅面浮雕 VCSEL 不仅增大了基模的增益，还降低了高阶模式的增益。ITO 不仅和台面的边缘有欧姆接触，还与台面的中心有欧姆接触，而电极与 VCSEL 表面欧姆接触面积的增大有利于串联电阻和外电压的降低。

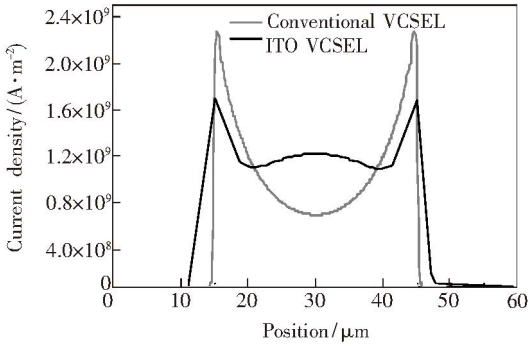


图 4　ITO 浅面浮雕 VCSEL 与普通 VCSEL 在有源区的电流密度分布图

Fig. 4　Current density of active area of ITO surface relief VCSEL and conventional VCSEL

4　结　　论

提出了一种新型的透明导电薄膜浅面浮雕 VCSEL 结构，不仅能够提高高阶模式的阈值增益，其最大的优势还在于能够改善 VCSE 有源区的电流密度分布，提高基模的增益并降低串联电阻和外电压。该结构的关键工艺是精确控制浅面浮雕和透明导电薄膜的厚度，可以预见的是该结构能够很好地提高基模对高阶模式的抑制效果，得到稳定的单基模输出。

参　考　文　献：

[1] Zhang J S, Liu X L, Cui J J, *et al*. High peak power 808 nm vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(9): 1098-1103 (in Chinese).

[2] Chang-Hasnain C J, Zhou Y, Huang M, *et al*. High-contrast grating VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, 15(3): 869-878.

[3] Debernardi P, Ostermann J M, Feneberg M, *et al*. Reliable polarization control of VCSELs through monolithically integrated surface gratings: A comparative theoretical and experimental study [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2005, 11(1): 107-116.

[4] Ostermann J M, Debernardi P, Jalics C, *et al*. Shallow surface gratings for high-power VCSELs with one preferred polarization for all modes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(8): 1593-1595.

[5] Unold H J, Mahmoud S W Z, Jager R, *et al*. Large-area single-mode VCSELs and the self-aligned surface relief [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2001, 7(2): 386-392.

[6] Haglund A, Gustavsson J S, Vukusic J, *et al*. Single fundamental-mode output power exceeding 6 mW from VCSELs with a shallow surface relief [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(2): 368-370.

[7] Alias M S, Shaari S, Leisher P O, *et al*. Single transverse mode control of VCSEL by photonic crystal and trench patterning [J]. *Photon. Nanostruct. Fund. Appl.*, 2010, 8(1): 38-46.

[8] Yang Z H, Leger J R, Shchegrov A V. Three-mirror resonator with aspheric feedback mirror for laser spatial mode selection and mode shaping [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2004, 40(9): 1258-1269.

[9] Al-Omari A N, Lear K L. High-speed 980 nm vertical cavity surface emitting lasers with a multi-oxide layer structure for single-mode operation [J]. *IET Optoelectron.*, 2011, 5(2): 57-61.

[10] Unold H J, Mahmoud S W Z, Jager R, *et al*. Improving single-mode VCSEL performance by introducing a long monolithic cavity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(8): 939-941.

[11] Zhou D, Mawst L J. High-power single-mode antiresonant reflecting optical waveguide-type vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, 38(12): 1599-1606.

[12] Shi J W, Chen C C, Wu Y S, *et al*. High-power and high-speed Zn-diffusion single fundamental-mode vertical-cavity surface-emitting lasers at 850-nm wavelength [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(13): 1121-1123.

[13] Yang H, Guo X, Guan B L, *et al*. The influence of injection current on transverse mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Acta Phys. Sinica* (**物理学报**), 2008, 57(5): 2959-2065 (in Chinese).

[14] Hao Y Q, Luo Y, Feng Y, *et al*. Large aperture vertical cavity surface emitting laser with distributed ring contact [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(7): 1034-1037.

[15] Xun M, Xu C, Wang J, *et al*. The effect of indium tin oxide as transparent conductive layer for oxide-confined VCSELs [C]//Optoelectronic Devices and Integration, Wuhan: Optical Society of America, 2014: OTh4C-1-5.

[16] Camps T, Bardinal V, Havard E, *et al*. Management of the electrical injection uniformity in broad-area top-emitting VCSELs [J]. *Eur. Phys. J.* D, 2010, 59(1): 53-57.

[17] Li X S, Ning Y Q, Jia P, *et al*. Rectangular mesa shaped vertical cavity surface emitting laser with shallow surface relief [J]. *Chin. J. Lasers* (**中国激光**), 2014, 41(12): 1202005-1-6 (in Chinese).

[18] Lear K L, Choquette K D, Jr Schneider R P, *et al*. Modal analysis of a small surface emitting laser with a selectively oxidized waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66(20): 2616-2618.



李秀山(1986 -),**男,山西静乐人,博士研究生,2009 年于山西师范大学获得学士学位,主要从事半导体光电子器件的结构设计和制备方面的研究。**

E-mail: jinglexiushan@163.com



宁永强(1965 -),**男,吉林图门人,研究员,1999 年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电器件方面的研究。**

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn