光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021122904

垂直腔面发射激光器 DBR 的生长优化

许晓芳，邓　军*，李建军，张令宇，任凯兵，冯媛媛，贺　鑫，宋　钊，聂　祥

（北京工业大学 信息学部 光电子技术教育部重点实验室，北京 100124）

摘　要： 基于能带理论和分布布拉格反射镜(DBR)的工作原理，分析了垂直腔面发射激光器(VCSEL)中 DBR 串联电阻较大的原因。采用组分渐变降低 DBR 结构中异质结界面处势垒，优化 DBR 的各层掺杂浓度，通过调控费米能级进一步降低 DBR 中的异质结势垒，从而有效降低 DBR 串联电阻。实验采用 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 作为生长 DBR 的两种材料，设计了 DBR 各层厚度，研究了 AlGaAs 材料的最佳生长温度，利用 MOCVD 外延技术完成了 795 nm VCSEL 突变 DBR 与渐变 DBR 的生长。经过工艺制备，测得突变 DBR 和渐变 DBR 的电阻分别为 6.6 和 5.3 Ω，优化生长后的 DBR 电阻得到有效降低。

关键词： 795 nm 垂直腔面发射激光器；分布布拉格反射镜；串联电阻；渐变生长；MOCVD

中图分类号： TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0332－05

Growth Optimization of Vertical Cavity Surface-Emitting Laser DBR

XU Xiaofang, DENG Jun, LI Jianjun, ZHANG Lingyu, REN Kaibing,
FENG Yuanyuan, HE Xin, SONG Zhao, NIE Xiang

(Key Lab. of Optoelectronics Technology of the Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, CHN)

Abstract: Based on the energy band theory and the principle of distributed Bragg mirror (DBR), the reason for the large DBR series resistance in VCSEL was analyzed. The potential barrier at the interface of heterojunction in DBR structure was reduced by component gradient, the doping concentration of each layer of DBR was optimized, and the heterojunction potential barrier in DBR was further reduced by regulating Fermi energy level, thus the series resistance of DBR was effectively reduced. $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ was used as two materials for DBR growth. The thickness of each layer of DBR was designed and the optimum growth temperature of AlGaAs material was studied. The 795 nm VCSEL mutation DBR and gradual DBR were grown by MOCVD epitaxy. The resistance of mutant DBR and gradient DBR was 6.6 and 5.3 Ω, respectively. The resistance of DBR after optimized growth was effectively reduced.

Key words: 795 nm VCSEL; DBR; series resistance; gradual growth; MOCVD

0　引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有体积小、圆形对称光斑、单纵模输出、低阈值电流激射、易集成为大面积阵列等优点，被广泛应用于图像识别、光学感测、工业照明、激光测距、激光雷达、光纤通信等领域[1-3]。

VCSEL 主要由有源区和上下两个分布布拉格反射镜(DBR)构成。由于 VCSEL 有源区非常薄，谐振腔体积小，单程增益仅约为 1%，为实现激射需要，利用 DBR 结构形成高反射谐振腔来减小光散射损耗[4-5]。根据传输矩阵理论计算[6]，DBR 结构的反射率随 DBR 对数的增加而增大，但随着 DBR 对数的增加，器件的串联电阻也随之增加[7-8]。由于自

收稿日期：2021－12－29.

*通信作者：邓　军　E-mail：dengsu@bjut.edu.cn

生热效应[9]，且器件结构限制了散热，器件内部温度很容易升高，使光电性能下降。因此降低 DBR 的串联电阻，减少发热是提高 VCSEL 器件性能的关键问题之一[10-12]。

本文从能带结构出发分析 DBR 结构中电阻产生的主要原因。设计了渐变组分 DBR 结构，并通过掺杂调控，降低 DBR 结构中的异质结势垒，进而降低了 DBR 的串联电阻。利用 MOCVD 进行了 DBR 结构的外延制备，优化了 DBR 材料的生长温度。*I-V* 测试结果表明，优化后的 DBR 结构串联电阻得到有效降低。

1　理论分析与模拟

DBR 结构是由光学厚度为 1/4 波长的两种高、低折射率材料交替生长构成的，两种材料的折射率差越大，DBR 结构越容易得到高反射率[13]。在 GaAs/AlGaAs 材料体系中，折射率差最大的材料为 GaAs/AlAs。在 VCSEL 器件中通常采用 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 材料制备氧化限制孔，因此在 DBR 结构中，低折射率材料一般选择 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$。高折射率材料主要决定于器件的激射波长，材料的禁带宽度要大于激射波长的光子能量。

在 DBR 结构中，两种折射率的材料交替生长形成同型异质结，根据异质结 Anderson 模型[14]，由于结两侧材料的费米能级不同，界面处会产生电荷转移，直到形成统一的费米能级。图 1 为 n 型 DBR 中两种材料形成统一费米能级时的能带图。由于材料禁带宽度不同，能带在界面上产生断续。在异质结宽带隙材料一侧产生向上的势垒尖峰 A，在窄带隙材料一侧产生向下的势阱 B。对于电子来说，势阱 B 处能量较低，将形成电子积累，其对电子迁移的阻

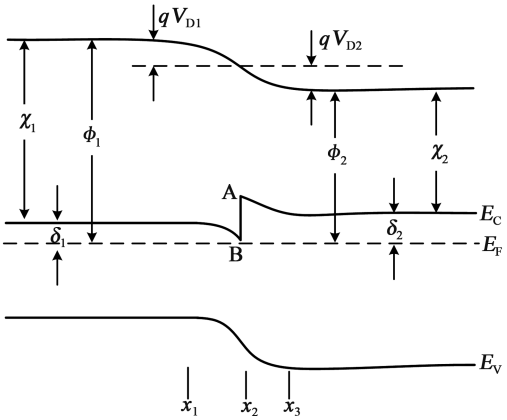


图 1　典型 n 同型异质结的能带图

碍很小，而尖峰 A 处形成的是电子耗尽区，当电子由窄带隙材料向宽带隙材料输运时对电子形成势垒，阻碍了电子的输运，形成电阻[15]。因此降低界面势垒是降低串联电阻最有效的方法。根据半导体理论，降低界面势垒可以从平滑势垒高度和调控两侧掺杂入手。

在异质结界面插入组分渐变层形成渐变异质结，可以平滑界面的势垒尖峰，降低界面势垒[16-18]。根据文献[19]，当在半导体异质结缓变结引入一个参量 $L_c=\left[\frac{2\Delta\chi\varepsilon}{3\sqrt{3q^2N_D}}\right]^{\frac{1}{2}}$，且渐变层厚度远小于 L_c 时，材料有类突变结的能带，两种材料结的界面处会有尖峰存在，当渐变层厚度增加时，尖峰降低，当渐变层厚度大于 L_c 时，尖峰消失。据此，我们计算了 n 型 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 异质结在不同渐变层厚度下界面势垒的变化情况。如图 2 所示，加入组分渐变层后，界面势垒降低，当渐变层厚度为 10 nm 时，界面仍存在较大势垒，随着渐变层厚度的增加，势垒尖峰逐渐被拉平，当渐变层厚度达到 30 nm 以上时，势垒尖峰接近消失。但有结果表明，渐变层厚度较大时会导致 DBR 高低折射率差减小，造成 DBR 结构反射率下降以及反射谱带宽减小[20]，折中考虑采用 20 nm 厚的渐变层能更好地平衡 DBR 结构的各项特性。这与 Oldham 等[21]和 Cheung 等[22]的研究结果一致。

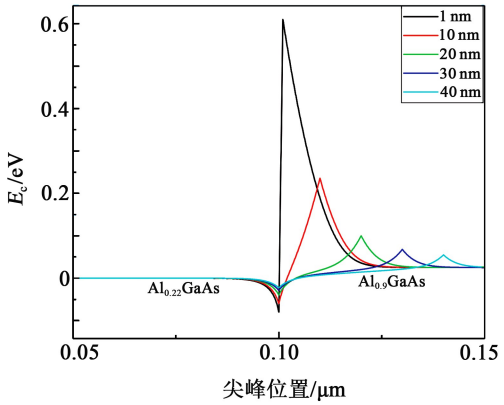


图 2　不同渐变层厚度对界面势垒尖峰的影响

当渐变层厚度为 20 nm 时 DBR 结构中界面势垒尖峰已不明显，此时构成势垒的主要原因是两侧材料的导带差。两种半导体材料形成结后会有统一的费米能级，材料导带底与费米能级间的距离决定于半导体材料中的掺杂浓度。n 型半导体中，掺杂浓度越高，导带底与费米能级越接近，因此，通过调

控两侧材料的掺杂浓度，有可能使结两侧材料的导带底对齐，从而进一步减小界面势垒。图 3 是当渐变区厚度设定为 20 nm 时，不同掺杂条件下，DBR 结构界面势垒的仿真计算结果。由图可见，当两侧材料掺杂浓度为 5×10^{17}，1×10^{18} 和 2×10^{18} cm^{-3} 时，界面势垒高度随掺杂浓度的提高而降低，当掺杂浓度达到 3×10^{18} cm^{-3} 后，界面势垒的降低就不太明显了。进一步提高掺杂虽然会降低 DBR 结构的串联电阻，但同时也加剧了材料晶体质量的下降，尤其是窄带隙材料一侧，高掺杂使材料简并、禁带收缩，材料的吸收损耗增加。采用不均匀掺杂的 DBR 结构是解决问题的方法之一。模拟结果显示，当窄带隙材料一侧掺杂浓度为 1×10^{18} cm^{-3}，宽带隙材料一侧掺杂浓度为 3×10^{18} cm^{-3} 时，结构具有比均匀掺杂更低的势垒，见图 3。

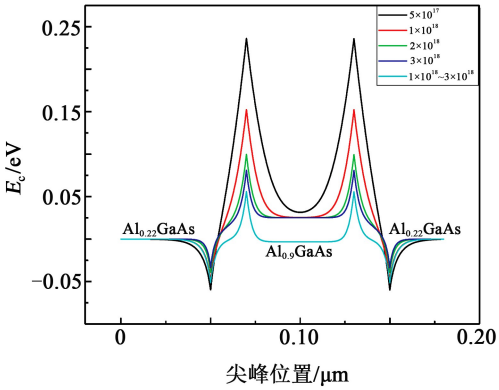


图 3 不同掺杂浓度对 DBR 结构势垒的影响

综合考虑上述原因，最终确定采用 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 作为 795 nm VCSEL 中 DBR 结构的两种生长材料。$Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ 材料一侧掺杂浓度为 $1\times10^{18}cm^{-3}$，$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 材料一侧掺杂浓度为 3×10^{18} cm^{-3}，中间插入组分渐变区，厚度为 20 nm，渐变区掺杂浓度也采用渐变的生长方式。

2 DBR 结构设计与生长优化

2.1 DBR 各层生长厚度计算

DBR 结构中高低折射率材料的光学厚度均应为中心波长的 1/4。室温下 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As$，$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 在 795 nm 波长的折射率分别为 3.496 0 和 3.151 5，从而计算得到 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As$，$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 材料的物理厚度分别为 56.850 7 和 63.065 2 nm。对于渐变 DBR 结构，设计时要保证每个 DBR 周期中高、低折射率材料和渐变层的光学厚度之和分别为中心波长的 1/4。按照渐变层厚度为 20 nm 计算，则 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As$，$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 层的物理厚度分别变为 37.835 8 和 41.971 8 nm，具体结构如表 1 所示。同时，表 2 给出了对应的突变 DBR 结构。

表 1 渐变 DBR 结构的结构参数

材料	厚度/nm	掺杂/cm^{-3}
$Al_{0.22}GaAs$	37.835 8	Si:1×10^{18}
$Al_{0.22\sim0.9}GaAs$	20	Si:$1\times10^{18}\rightarrow3\times10^{18}$
$Al_{0.9}GaAs$	41.971 8	Si:3×10^{18}
$Al_{0.9\sim0.2}GaAs$	20	Si:$3\times10^{18}\rightarrow1\times10^{18}$

表 2 突变 DBR 结构的结构参数

材料	厚度/nm	掺杂/cm^{-3}
$Al_{0.22}GaAs$	56.850 7	Si:1×10^{18}
$Al_{0.9}GaAs$	63.065 2	Si:3×10^{18}

2.2 DBR 生长温度优化

除了结构设计，材料质量对 DBR 结构的光电特性同样有至关重要的影响。材料的晶体质量与外延生长温度直接相关。为此，我们利用 MOCVD 系统在(100)晶向的 GaAs 衬底上制备了一系列不同生长温度（575，600，625 和 650 ℃）的非故意掺杂 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.22}Ga_{0.78}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 双异质结结构，用以研究 MOCVD 生长 AlGaAs 材料的最佳生长温度。

图 4 为不同生长温度下制备的 AlGaAs 双异质结样品的光致发光谱(PL)曲线。如图所示，不同生长温度下制备的样品发光峰位均为 730 nm 左右，对应 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ 材料的带隙，说明在一个宽的温区内，AlGaAs 材料的组分不受生长温度的影响。随着生长温度的升高，PL 峰值强度先升高再降低，600 ℃下生长的样品有最高的 PL 峰值强度。PL 峰值强度越低，表明AlGaAs材料中非辐射复合中心

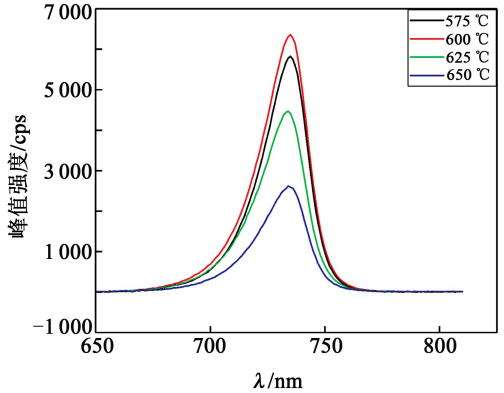


图 4 双异质结 PL 谱随生长温度变化图

和载流子俘获中心越多[23]，说明外延层存在较高的晶体缺陷，这些缺陷会降低载流子迁移率，在 DBR 的制备中造成串联电阻的增大。因此，DBR 结构的最佳外延生长温度为 600 ℃。

3　MOCVD 外延生长与测试

利用 MOCVD 外延技术，以(100)晶向 GaAs 为衬底，在 600 ℃的生长温度下，以 H_2 作为载气，AsH_3 作为 As 源，TMAl 和 TMGa 分别作为 Al 源和 Ga 源，SiH_4 作为 n 型掺杂源，生长制备渐变型和突变型 n 型 DBR。具体方法为在 GaAs 衬底上生长 500 nm 的重掺杂 GaAs 作为缓冲层，然后分别周期性重复生长 15 对不同组分 AlGaAs 材料，生长结构如表 1 和表 2 所示。之后生长 60 nm n^+ 型 GaAs 帽层，防止 AlGaAs 材料氧化，同时也作为上电极欧姆接触层。利用 Philip PLM-100 光荧光谱系统对外延生长的两种 DBR 结构进行白光反射谱测试，测试结果如图 5 所示。从图中可以看出，两种 DBR 的峰值反射率 R 相差很小且都达到 90%以上，中心波长为 795 nm，满足设计要求。渐变 DBR 反射区带宽略小于突变 DBR，这是由于 DBR 反射区的带宽与构成 DBR 的高低折射率材料的折射率差有关，折射率差越大，带宽越宽。渐变层的引入使得 DBR 高低折射率差减小，导致渐变 DBR 带宽减小。

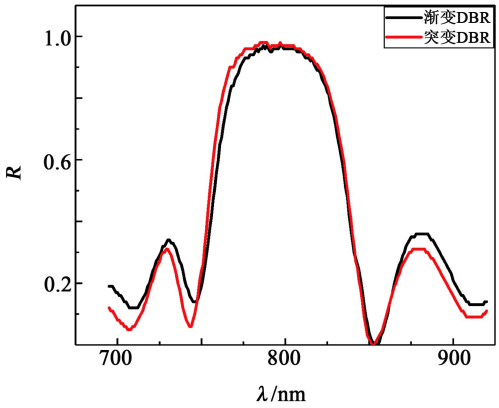


图 5　不同 DBR 结构的白光反射谱

通过光刻、溅射工艺分别在外延片正反两面制备金属电极，其中正面电极大小为 100 μm × 100 μm，退火处理后利用 Keysight B1500A 半导体参数分析仪测试 DBR 结构的 I-V 特性，结果如图 6 所示。突变 DBR 结构电阻约为 6.6 Ω，渐变 DBR 结构电阻约为 5.3 Ω。可见，采用优化渐变生长方式，DBR 结构的串联电阻得到有效降低。

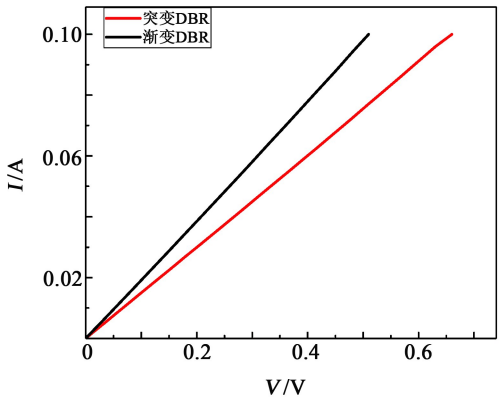


图 6　不同 DBR 结构的 I-V 特性曲线

4　结论

基于能带理论分析了垂直腔面发射激光器中 DBR 结构串联电阻较大的原因。设计了 795 nm VCSEL 渐变组分 DBR 结构，优化了结构的掺杂。确定 $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 作为 795 nm VCSEL 中 DBR 结构的两种生长材料，模拟了不同渐变层厚度以及不同掺杂浓度对 DBR 势垒的影响，计算了 DBR 各层生长厚度。采用 MOCVD 外延技术完成突变 DBR 与渐变 DBR 测试结构的外延生长，测得 DBR 反射光谱中心波长为 795 nm，15 对测试结构 DBR 反射率达到 90%以上。测得突变 DBR 结构的电阻为 6.6 Ω，渐变 DBR 结构的电阻为 5.3 Ω，结果表明采用插入渐变层和掺杂优化的方法能有效降低 DBR 结构的串联电阻，确定了 AlGaAs 材料最佳生长温度为 600 ℃，为设计 795 nm 垂直腔面发射激光器奠定了基础。

参考文献：

[1] Xu Y, Li M, Zhao G, et al. Small-sized lithographic single-mode VCSELs with high-power conversion efficiency[J]. Proc. of SPIE, 2015, 9381: 93810R.

[2] Jewell J L, Cherer A, Mccall S L, et al. Low-threshold electrically pumps vertical-cavity surface-emitting microlasers [J]. Electron. Lett., 1989, 25(17): 1123-1124.

[3] Shi J W, Chi K L, Chang J H, et al. Single-mode vertical-cavity surface-emitting laser array with high power and narrow far-field divergence angle[J]. IEEE Photonics J., 2013, 5(6): 1502508.

[4] Sale T E. Cavity and reflector design for vertical cavity surface emitting lasers[J]. IEEE Proc. Part Ⅰ, 1995, 142(1): 37-43.

[5] Iga K. Surface-emitting laser—Its birth and generation of new optoelectronics field[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2000, 6(6): 1201-1215.

[6] Ikhlef A, Hedara R, Chikh-Bled M. Uniform fiber Bragg grating modeling and simulation used matrix transfer method [J]. Inter. J. of Computer Science Issues, 2012, 9(1): 368-374.

[7] Winston W, Hayes R E. Optoelectronic device simulation of Bragg reflectors and their influence on surface-emitting laser characteristics[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1998, 34(4): 707-715.

[8] Piprek J, Troger T, Schroter B, et al. Thermal conductivity reduction in GaAs-AlAs distributed Bragg reflectors[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10(1): 81-83.

[9] Yang L, Ng W C, Choquette K D, et al. Numerical investigation of self-heating effects of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2005, 41(1): 15-25.

[10] Geels R S, Corzine S W. Low threshold planarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2(4): 234-236.

[11] Tai K, Yang L, Wang Y H, et al. Drastic reduction of series resistance in doped semiconductor distributed Bragg reflectors for surface-emitting lasers[J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56(25): 2496-2498.

[12] Sugimoto M, Kosaka H. Very low threshold current density in vertical-cavity surface-emitting laser diodes with periodically doped distributed Bragg reflectors[J]. Electron. Lett., 1992, 28(4): 385-387.

[13] Geels R S, Corzine S W. Low threshold planarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2(4): 234-236.

[14] Anderson R L. Germanium-gallium arsenide heterojunctions [Letter to the Editor] [J]. IBM J. of Research and Development, 1960, 4(3): 283-287.

[15] Lear K L, Schneider R P. Uniparabolic mirror grading for vertical cavity surface emitting lasers [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 68(5): 605-607.

[16] Chalmers S A, Lear K L, Killeen K P. Low resistance wavelength-reproducible p-type (Al,Ga)As distributed Bragg reflectors grown by molecular beam epitaxy[J]. Appl. Phys. Lett., 1993, 62(14): 1585-1587.

[17] Kang X, Chen L. Current transport mechanisms and *I-V* characteristics of Bragg reflectors in VCSEL[J]. Research & Progress of Solid State Electron., 2004, 24(1): 50-54, 59.

[18] Butte R, Feltin E, Dorsaz J, et al. Recent progress in the growth of highly reflective nitride-based distributed Bragg reflectors and their use in microcavities[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2005, 44(10): 7207-7216.

[19] 虞丽生. 半导体异质结物理[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 58.
Yu Lisheng. Physics of Semiconductor Heterojunction [M]. Beijing: Science Press, 2006: 58.

[20] Lear K L, Schneider R P. Uniparabolic mirror grading for vertical cavity surface emitting lasers [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 68(5): 605-607.

[21] Oldham W G, Milnes A G. n-n semiconductor heterojunctions[J]. Solid State Electron., 1963, 6(2): 121-132.

[22] Cheung D T, Chiang S Y, Pearson G L. A simplified model for graded-gap heterojunctions [J]. Solid State Electron., 1975, 18(3): 263-266.

[23] Han Y, Guo L, Huang Q, et al. Optical properties of LT-GaAs/AlGaAs multiple quantum wells grown at different As pressures[J]. Research & Progress of Solid State Electron., 2002, 22(2): 219-222.

作者简介:

许晓芳(1997—),男,河北省石家庄市人,硕士研究生,主要从事垂直腔面激光器 MOCVD 外延制备的研究;

邓　军(1969—),男,北京市人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光电探测器与材料外延制备相关研究。