

# 半导体/超晶格分布布拉格反射镜(DBR) 的分子束外延生长

晏长岭<sup>1</sup> 赵英杰<sup>2</sup> 钟景昌<sup>2</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械物理研究所, 长春 130021)

(2 长春光学精密机械学院半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 用分子束外延技术(MBE)生长了以 GaAs/AlAs 超晶格替代 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 所形成的 P 型半导体/超晶格分布布拉格反射镜(DBR)。此分布布拉格反射镜的反射谱中心波长为 850nm。由实验表明, 19 个周期的反射镜获得了高达 99% 以上的高反射率。与此同时, 采取自行设计的二次钨丝掩膜质子注入法制成 15μm × 15μm 的正方形电流注入区, 以此测定 P 型反射镜的串联电阻, 克服了湿化学腐蚀法中腐蚀深度不易控制及侧面同时被腐蚀的缺点, 实验得出此 P 型反射镜的串联电阻仅为 50Ω 左右。在生长过程中, 发现在只含一个铝源的分子束外延生长系统中, 生长这种半导体/超晶格反射镜相对其他半导体/半导体反射镜要节省很多外延生长时间, 因此较适合应用于多层结构的光电器件中。

**关键词:** 分布布拉格反射镜(DBR); 超晶格; 分子束外延(MBE); 反射谱; 串联电阻

**EEACC:** 0510D

中图分类号: TN 304. 054

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)04-0446-05

## 1 引言

由周期性厚度为 1/4 波长的低、高折射率组份不同的半导体材料构成的分布布拉格反射镜(DBR), 在很多光电器件中都有很好的应用<sup>[1,2]</sup>, 尤其是在垂直腔面发射激光器件(VCSEL's)中, 发挥着非常重要的作用<sup>[3,4]</sup>。VCSEL's 以其发散角小、易于与光纤偶合、适合于二维列阵, 以及容易实现单纵模激光、阈值电流低等优点, 非常有利于在光通讯、光互联、以及光信号传输等领域的应用<sup>[5-7]</sup>。随着分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)等晶体外延生长技术的不断发展, 越来越多地显示出垂直腔面发射激光器件可以取代传统激光器件而实现其应用价值的优势<sup>[8-10]</sup>。基于对垂直腔面发射激光器件的重视, 人们对作为这种器件结构重要组成部分的分布布拉格反射镜进行了深入的研究。一方面, 努力提高反射镜的反射率, 以获得较高的光反馈, 补偿谐振腔短带来的光增益小的不

足; 另一方面, 采用各种不同的结构来降低 DBR 的串联电阻, 如在半导体异质结界面中间加上各种结构的过渡层如, 组分突变型、缓变型、周期性掺杂界面型等<sup>[11,12]</sup>, 从而降低由于反射镜的串联电阻引起的焦耳热, 以优化激光器件的特性。这样一来, 就产生出多种结构各异、性能优良的分布布拉格反射镜, 以适合不同器件的应用。

本文中以 18.5 个周期的 GaAs(3nm)/AlAs(0.7nm) 短周期超晶格替代 AlAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As DBR 中的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, 从而形成 AlAs/[GaAs(3nm)/AlAs(0.7nm)] 半导体/超晶格型 DBR, 并在实验上由 V80H 型分子束外延生长系统在 n-GaAs 衬底上生长了 P 型反射镜, 其反射谱中心波长为 850nm, 此 19 个周期反射镜的反射率可达 99% 以上。经由自行设计的二次钨丝掩膜质子注入法替代常用的湿化学腐蚀法形成 15μm × 15μm 的电流注入区域, 测定了此 P 型反射镜的串联电阻仅为 50Ω 左右。由此可见, 此反射镜既可获得高反射率, 同时具有较低的串联电阻。与此同时, 还发现在

晏长岭 男, 1971 年出生, 博士研究生, 研究方向包括长波长半导体激光器、垂直腔面发射激光器以及分子束外延晶体生长技术。

2000-07-01 收到, 2000-11-15 定稿

©2001 中国电子学会

单一铝源的分子束外延生长系统中, 生长这种反射镜可以节约生长时间, 从而减少因生长速率的漂移引起的结构变化, 因此适合于垂直腔面发射激光器件等需要多层结构的光电器件的应用。

## 2 分子束外延生长半导体/超晶格分布布拉格反射镜

由 18.5 个周期  $\text{GaAs}(3\text{nm})/\text{AlAs}(0.7\text{nm})$  构成的短周期超晶格替代  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  而形成的  $\text{AlAs}/[\text{GaAs}(3\text{nm})/\text{AlAs}(0.7\text{nm})]_{18.5}$  半导体/超晶格分布布拉格反射镜, 其反射谱中心波长为 850nm。它的导带结构示意图如图 1 所示。以文献[13]所给出的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料的折射率为依据, 从 Al 组分来看, 超晶格  $[\text{GaAs}(3\text{nm})/\text{AlAs}(0.7\text{nm})]$  近似对应  $\text{Al}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$  的 Al 组分, 因此, 计算中以  $\text{AlGaAs}$  的折射率替代  $[\text{GaAs}(3\text{nm})/\text{AlAs}(0.7\text{nm})]$  超晶格的折射率, 通过文献[14]中求分布布拉格反射镜的反射率的方法, 计算了 19 个周期这种反射镜对波长为 850nm 的光的反射率, 在 99.2% 左右。

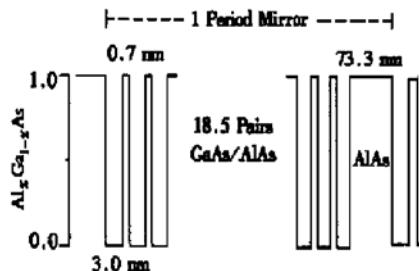


图 1 一个周期 DBR 反射镜的结构示意图

FIG. 1 Schematic Diagram of 1-Period DBR Structure

实验中, 为了获得这种分布布拉格反射镜, 我们采用 V80H 型分子束外延生长系统生长了 P 型这种反射镜。外延结构图如图 2 所示: 外延层生长在  $n\text{-GaAs}$  衬底 ( $\text{Si}: 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 上, 其上依次是 40nm 的  $n\text{-GaAs}$  缓冲层 ( $\text{Si}: 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )、50nm 的  $p\text{-GaAs}$  缓冲层 ( $\text{Be}: 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )、19 个周期的  $\text{AlAs}(73.3\text{nm})/[\text{GaAs}(3\text{nm})/\text{AlAs}(0.7\text{nm})]_{18.5}$  分布布拉格反射镜。此 P 型反射镜是均匀掺杂的, 掺杂浓度为 ( $\text{Be}: 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )。最后是高掺杂浓度的欧姆接触层  $\text{P}^+\text{-GaAs}(\text{Be}: 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})$ , 以便与上面的  $\text{Au-Zn}$  合金接触良好, 避免形成金属肖特基结。

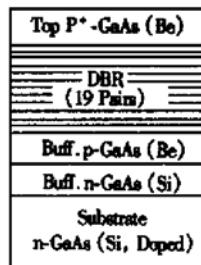


图 2 外延结构示意图

FIG. 2 Structure of Epitaxial Layers

生长前对材料的生长速率及杂质的掺杂浓度进行了严格的标定。生长开始时, 先高温脱去衬底表面的氧化膜, 并用俄歇电子能谱仪对衬底表面进行在位观测, 测定氧峰的变化, 以确定衬底表面的氧化膜是否已经被完全脱去。而且, 在生长过程中, 用高能电子衍射仪在位监测生长的外延层晶体的表面形貌, 避免有多晶体产生, 同时, 为了外延片生长的均匀性, 在生长过程中衬底不停地旋转。

生长后的外延片经过解理、染色后, 在扫描电镜 (SEM) 下观察, 生长的结构与设计的完全一致, 由图 3 所示的外延片断面扫描电镜的显微照片可见, 各界面平直, 结构完好。

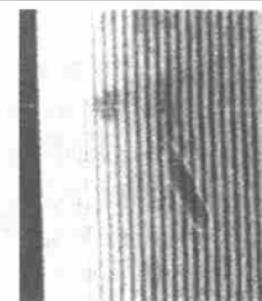


图 3 DBR 反射镜的扫描电镜图片

FIG. 3 SEM Microphotograph of DBR

我们采用北京光学仪器厂 WDH3 型宽波段扫描单色仪对所生长的分布布拉格反射镜的反射谱进行了测量。图 4 是实验测量获得的反射谱。从中可见其反射中心波长在 847nm 左右, 与 850nm 基本相符, 其最高反射率为 99.5% 左右。实验测量值比理论计算值略高, 可能是由于在理论计算中使用  $\text{Al}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$  的折射率替代  $[\text{GaAs}(3\text{nm})/\text{AlAs}(0.7\text{nm})]$  超晶格的折射率进行理论计算的结果。这样高的反射率可以满足垂直腔面发射激光器件等需求较高光反馈的光电器件的要求。

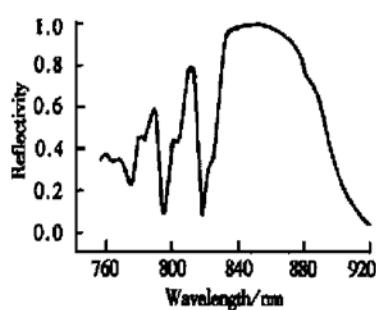


图 4 实验测得的 19 个周期 DBR 反射镜的反射谱

FIG. 4 Measured Reflectivity Spectrum of 19-Period DBR

### 3 P 型反射镜串联电阻的测定

在以往测定 P 型分布布拉格反射镜的串联电阻的实验<sup>[15, 16]</sup>中, 都采用化学湿法腐蚀形成四方形台面电流注入区域, 对串联电阻进行测量。实验中我们发现, 这种化学湿法腐蚀, 一方面, 腐蚀深度不易控制; 另一方面, 在向下腐蚀的过程中, 必然会对台基的侧面进行腐蚀, 从而造成测量结果的不精确。为了改善, 我们自行设计了一种简易的二次钨丝掩膜质子注入法, 替代以往的化学湿法腐蚀, 形成四方形电流注入区域, 测定了此 P 型反射镜的串联电阻。这种方法, 一方面, 质子注入的深度容易把握; 另一方面, 避免了台基的侧面同时被腐蚀的现象。

实验中, 首先用直径为  $15\mu\text{m}$  的钨丝压在外延片的正面做掩膜, 随后用质子注入法, 使除了钨丝下面的其它区域变成高阻电流隔离区, 然后, 表面做 Au-Zn 合金; 取下钨丝后, 旋转  $90^\circ$  后, 做第二次掩膜, 方法与第一次相同。在质子注入中, 为了很好地把握轰击深度与轰击能量的关系, 我们分别用 100、200、300、400keV 的注入能量进行实验, 经过解理显结染色测定其注入深度。图 5 是轰击能量与轰击深度的关系实验曲线, 从中可见, 100keV 的轰击能量对应轰击深度  $1\mu\text{m}$ 。注入质子的剂量、注入时间以及质子注入后片子的退火温度、退火时间对注入的效果也有影响。表 1 是我们在实验中选用的实验数据。质子注入后, 经过解理、显结、染色发现, 注入深度与设计要求的深度一致。反射镜的正面形成了一个  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$  方形的电流注入区。外延片的背面被减薄后, 做 Au-Ge-Ni n 型欧姆接触, 以利于进行电学测量。

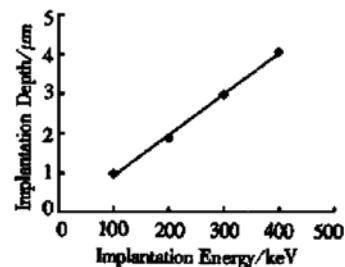


图 5 质子注入的深度与注入能量的关系曲线

FIG. 5 Implantation Energy Versus Depth

表 1 质子注入中的实验数据

Table 1 Experimental Data in Implantation

离子	注入深度	注入能量	注入剂量	注入时间	退火温度	退火时间
H <sup>+</sup>	$2.0\mu\text{m}$	200keV	$3 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$	1.5h	400—420°C	1—2min

图 6 是随机选取的 50 次串联电阻测量结果的分布图, 由此可见, 接近一半的反射镜的串联电阻在  $50\Omega$  左右。分析串联电阻低的原因为超晶格的引入, 超晶格的周期与电子的德布洛意波长相近, 使得载流子的隧道效应增强, 隧道电流增加导致串联电阻的降低<sup>[17]</sup>。

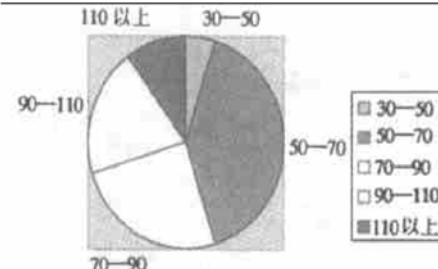


图 6 分布布拉格反射镜串联电阻的分布图

FIG. 6 Distribution of Series Resistance of DBR

### 4 掺杂浓度对反射镜的串联电阻的影响

分布布拉格反射镜的掺杂浓度对其串联电阻的影响一直被人们所重视<sup>[15, 16]</sup>。为了讨论掺杂浓度对串联电阻的影响, 我们用与上面相同的方法分别外延生长了三种不同掺杂浓度的反射镜, 掺杂浓度分别为:  $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。使用相同的工艺过程, 测定了它们的串联电阻。实验结果发现, 串联电阻随掺杂浓度的增大而减小。分析认为, 其主要原因是分布布拉格反射镜中较高的掺杂浓度会引起过渡层厚度的减小所致<sup>[17]</sup>。与此同时,

我们考虑到提高反射镜中的掺杂浓度的负效应, 随着掺杂浓度的增加, 必然引起自由载流子吸收的增大, 从而导致分布布拉格反射镜的反射率有所下降, 使分布布拉格反射镜的光反馈降低, 影响器件的激光特性。因此, 分布布拉格反射镜的掺杂浓度不应过高。为了缓解这一矛盾, 我们在界面区域采用较高的掺杂浓度, 而在其它区域适当降低掺杂浓度。实验结果表明, 这种方法对问题的缓解起到了一定的效果。

## 5 结语

由短周期超晶格替代而形成的半导体/超晶格分布布拉格反射镜由分子束外延生长。实验测得, 其反射谱中心波长为 850 nm 左右, 19 个周期反射镜可获得高达 99.5% 的反射率。与此同时, 由自行设计的二次钨丝掩膜质子注入法替代通常使用的化学湿法腐蚀形成  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$  方形的电流注入区域, 测定了反射镜的串联电阻仅为  $50\Omega$  左右。由此可见, 这种半导体/超晶格分布布拉格反射镜在可获得较高的反射率的同时, 还具有较低的串联电阻。与以往的分布布拉格反射镜<sup>[17]</sup>相比, 这种半导体/超晶格型反射镜在具有高反射率和较低的串联电阻的同时, 在分布布拉格反射镜的结构上, 免去了为降低反射镜的串联电阻而设计夹在两种半导体界面间的过渡层, 从而简化了反射镜结构设计以及反射镜的外延生长过程, 节省了分子束外延的生长时间, 减少了外延生长系统由于长时间生长而引起的系统生长速率的漂移对生长质量的影响, 从而有望被应用到如垂直腔面发射激光器件等需求光反馈较高且结构比较复杂的光电器件中。与此同时, 二次钨丝掩膜质子注入替代湿化学腐蚀法形成电流注入区域来测定反射镜的串联电阻, 克服了后者腐蚀深度不易把握以及侧面同时被腐蚀的不足, 使测量结果更精确。在此我们对半导体/超晶格分布布拉格反射镜进行了初步的研究, 对其特性及其在垂直腔面发射激光器件等光电器件中的应用还需进一步的研究。

**致谢** 在分子束外延生长分布布拉格反射镜的过程中, 得到了中国科学院物理研究所 MBE 课题组的周均铭等老师及孙甲明博士后的悉心指导, 在此深表感谢。同时, 对中国科学院半导体研究所离子注入实验组的老师的大力支持表示谢意。

## 参考文献

- [ 1 ] S. Y. Hu, E. R. Hegblom and L. A. Coldren, Multiple-Wavelength Top-Emitting Vertical-Cavity Photonic Integrated Emitter Arrays for Direct-Coupled Wavelength-Division Multiplexing Applications, *Electron. Lett.*, 1998, **34**( 2): 189—190.
- [ 2 ] M. H. MacDougal, S. G. Hummel and P. D. Dapkus, Epitaxial (Al, Ga) InP-Oxide Distributed Bragg Reflectors for Use in Visible-Wavelength Optical Devices, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1995, **17**: 385—387.
- [ 3 ] Weng W. Chow, Kent D. Choquette and Mary H. Crawford, Design, fabrication and Performance of Infrared and Visible Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**( 10): 1810—1824.
- [ 4 ] C. Lei, T. J. Rogers and D. G. Deppe, ZnSe/CaF<sub>2</sub> Quarter-Wave Bragg Reflector for the Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**: 7430—7434.
- [ 5 ] Hideo Kosaka, Smart Integration and Packaging of 2-D VCSEL's for High-Speed Parallel Links, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**( 2): 184—193.
- [ 6 ] U. F. Iedler, G. Reiner and P. Schnitzer, Top Surface-Emitting Vertical-Cavity Laser Diodes for 10Gb/s Data Transmission, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1996, **9**: 746—748.
- [ 7 ] H. Kosaka, VCSEL-Array Module and its Applications for Optical Interconnection and Switch, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**: 1394—1399.
- [ 8 ] M. Kajita, H. Kosaka and M. Yamada, 1Gb/s Modulation Characteristics of a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array Module, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, **9**: 146—148.
- [ 9 ] Du Guotong, Jiang Xiuying and Liu Suping, Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with Metal Reflection Film Fabricated by Twice Tungsten Filament Mask and Proton Implantation, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995, **16**( 5): 350—353(in Chinese)[ 杜国同, 姜秀英, 刘素平, 具有金属反射膜的钨丝掩蔽两次质子轰击垂直腔面发射激光器, 半导体学报, 1995, **16**( 5): 350—353].
- [ 10 ] Zhao Yiguang, Zhang Yusheng and Huang Xianling, Electrical, Thermal, and Wave Guide Characteristics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, **20**( 11): 963—970(in Chinese)[ 赵一广, 张宇生, 黄显玲, 垂直腔面发射半导体激光器的电、热和光波导特性, 半导体学报, 1999, **20**( 11), 963—970].
- [ 11 ] K. Tai, L. Yang and Y. H. Wang, Drastic Reduction of Series Resistance in Doped Semiconductor Distributed Bragg Reflectors for Surface-Emitting Lasers, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 2496—2498.
- [ 12 ] Ralph E. Sherriff, Stewart A. Feld and John P. Loehr, Com-

- parison of Exact and Approximate Optical Designs for Graded-Interface Distributed Bragg Reflectors, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, **5**(3): 582—589.
- [13] D. E. Aspnes, S. M. Kelso and R. A. Logan, Optical Properties of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , J. Appl. Phys., 1986, **60**(2): 754—767.
- [14] R. S. Geels, S. W. Corzine and L. A. Coldren, InGaAs Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, IEEE J. Quantum Electron., 1991, **27**: 1359—1367.
- [15] S. A. Chalmers, K. L. Lear and K. P. Killeen, Low Resistance Wavelength-Reproducible p-Type ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) Distributed Bragg Reflectors Grown by Molecular Beam Epitaxy, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**: 1585—1587.
- [16] I. F. L. Dias, B. Nabet and A. Kohl, Electrical and Optical Characteristics of n-Type-Doped Distributed Bragg Mirrors on InP, IEEE Photonics Technol. Lett., 1998, **10**(6): 763—765.
- [17] K. Kurihara, T. Numai and I. Ogura, Reduction in the Series Resistance of the Distributed Bragg Reflector in Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers by Using Quasi-Graded Superlattices of the Heterointerfaces, J. Appl. Phys., 1993, **73**(1): 21—27.

## Semiconductor/Superlattice Distributed Bragg Reflector Grown by Molecular Beam Epitaxy

YAN Chang-hing<sup>1</sup>, ZHAO Ying-jie<sup>2</sup> and ZHONG Jing-chang<sup>2</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

(2 Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, National Key Laboralory of Semiconductor Lasers, Changchun 130022, China)

**Abstract:** By replacing the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  with GaAs/AlAs superlattice, the p type semiconductor/superlattice distributed Bragg reflector (DBR) has been grown by molecular beam epitaxy (MBE). The center wavelength of the DBR reflection spectrum is about 850nm; and the 19-period DBR has the high reflectivity of 99.5%. Using twice self-designed tungsten filament mask and proton implantation method, we fabricate a square current flowing area size of  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$  with which the series resistance of the p type DBR is measured about 50 Ohm. Therefore, the semiconductor/superlattice DBR has proved to be of low series resistance and high reflectivity, which applies to the optoelectronic devices such as vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL's), which need high optical feed back and low power consumption. Due to the omission of the interface structures between two semiconductor heterointerfaces for the purpose of decreasing the series resistance in DBR, the structure and the fabrication of the DBR are simplified and successfully applied in the optoelectronic devices with complicated structure. In this method the depth of implantation is controllable; and the side etching happened in wet chemical etching is avoided. In the process of growth, the MBE system with a single Al source is found to be of less growth time with this kind of semiconductor/superlattice DBR, so it is suitable for the optoelectronic devices with multiple-layer structures.

**Key words:** Distributed Bragg Reflector (DBR); superlattice; Molecular Beam Epitaxy (MBE); reflection spectrum; series resistance

**EEACC:** 0510D

**Article ID:** 0253-4177(2001)04-0446-05

YAN Chang-hing male, born in 1971, is pursuing the Ph. D degree. His research interests include long wavelength semiconductor lasers, vertical-cavity surface-emitting lasers, molecular beam epitaxy and the crystal growth technology.