

全息光刻制备 808 nm 分布反馈半导体激光器的光栅

刘丹丹 王 勇 叶镇 高占琦 张 屿 王晓华

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 实验优化设计了 808 nm 分布反馈(DFB)半导体激光器的二级布拉格光栅结构,介绍了 808 nm DFB 半导体激光器光栅制备的工艺流程。采用全息光刻方法和湿法腐蚀技术在 GaAs 衬底片上制备了周期为 240 nm 的光栅图形,全息光刻系统采用条纹锁定技术降低条纹抖动和提高干涉稳定性,腐蚀液中 H_3PO_4 、 H_2O_2 和 H_2O 的体积比为 1:1:10,腐蚀时间为 30 s。光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)测试显示,光栅周期为 240 nm,占空比为 0.25,深度为 80 nm,具有完美的表面形貌及良好的连续性和均匀性。

关键词 激光器; 半导体激光器; 分布反馈; 光栅; 全息光刻

中图分类号 O469

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202008

Grating Fabrication of 808 nm Distributed Feedback Semiconductor Laser by Holographic Photolithography

Liu Dandan Wang Yong Ye Zhen Gao Zhanqi Zhang Yu Wang Xiaohua

National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Second-order Bragg grating structure of 808 nm distributed feedback (DFB) semiconductor laser is designed and optimized. The grating fabrication process of 808 nm DFB semiconductor laser is introduced. The grating with a period of 240 nm is fabricated on GaAs substrate by holographic photolithography and wet etching. In the holographic photolithography system, mole grating and piezoelectric ceramic are used as fringe locked-in system to control optical path and lock fringes. Wet etching solution with 1:1:10 volume ratio of H_3PO_4 , H_2O_2 and H_2O is adopted to etch the grating for 30 s. Images of optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) show that the grating has a period of 240 nm, duty cycle of 0.25, depth of 80 nm, with perfect surface morphology, good fringe continuity and uniformity.

Key words lasers; semiconductor laser; distributed feedback; grating; holographic photolithography

OCIS codes 050.2770; 110.4235; 140.3490

1 引 言

808 nm 半导体激光器作为固体激光器的抽运源,被广泛应用于航空、通信和军事等领域^[1-2]。但是,半导体激光器的光谱线宽比较宽,光谱随温度和工作电流的变化比较大,限制了它在抽运固体激光器等领域的应用。分布反馈(DFB)半导体激光器是在激光器的外延结构中集成布拉格光栅,利用折射率周期变化的结构实现谐振腔反馈功能的半导体激光器。DFB 半导体激光器具有高的发射波长稳定性、窄的光谱线宽、宽的工作温度范围,具有广泛的应用前景和无可比拟的优越性。在 DFB 半导体激光器的制作过程中,光栅的制备是最关键的工艺技术。目前,制备光栅常用的光刻技术主要有纳米压印技术^[3]、电子束光刻技术^[4]和全息光刻技术^[5]。全息光刻技术,也叫双光束激光干涉法,是将全息照相与微电子光刻相结合的技术^[6]。激光

收稿日期: 2014-07-15; 收到修改稿日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(11474036)

作者简介: 刘丹丹(1989—),女,硕士研究生,主要从事半导体激光器工艺方面的研究。E-mail: liudandan1030@163.com

导师简介: 王 勇(1978—),男,副研究员,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: eeywang@gmail.com(通信联系人)

干涉形成的条纹明暗对比度为 1:1,且不存在焦深的问题,这十分有利于光刻形成良好周期性的干涉条纹。全息光刻技术曝光区域大,制作过程简单,生产效率高,周期性好,适合于大批量生产^[17-81]。Schmahl 采用全息光刻技术制作出了第一块全息光栅^[9]。全息光栅,是指将两束平行且相干的光按一定夹角,在特定相干长度范围内相交,将由此产生的稳定的干涉条纹记录在涂有光刻胶的基片上,然后再经显影、定影等工艺就可得到全息光栅^[10]。通过优化全息曝光条件,光栅的表面形貌得到改善,并成功制备了各种不同波长的DFB半导体激光器^[11-16]。然而全息光刻技术对环境的要求十分高,在曝光过程中由于空气流动等环境干扰非常严重,很难得到稳定衍射条纹^[17-22]。

本文优化了 808 nm DFB 半导体激光器的二级布拉格光栅结构。采用全息光刻和湿法腐蚀技术在 GaAs 衬底上制备 808 nm DFB 半导体激光器的光栅图形。全息光刻系统采用干涉稳定控制(条纹锁定)技术降低条纹抖动和提高干涉稳定性。通过优化全息曝光条件,并进行湿法腐蚀,在 GaAs 衬底上制备了周期为 240 nm 的光栅图形。利用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对光栅的周期、占空比、深度和表面形貌进行了测试。

2 实 验

实验优化了 808 nm DFB 半导体激光器布拉格光栅的周期、占空比、深度。光栅的周期满足如下布拉格公式:

$$\Lambda = \frac{m\lambda_B}{2n_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中 Λ 是光栅的周期, λ_B 是入射波长, n_{eff} 是有效折射率, m 是衍射级次。对于 808 nm GaAs 基 DFB 半导体激光器,有效折射率为 3.255,计算出一级布拉格光栅的周期为 120 nm,二级布拉格光栅的周期为 240 nm。一级布拉格光栅的周期小,制作工艺十分复杂,对微细图形的精确控制也比较困难,因此实验采用二级布拉格光栅来代替一级布拉格光栅。

对于矩形薄光栅,纯折射率耦合的情况下,耦合系数表达式近似为

$$k = k_0 \cdot \Delta n \cdot \Gamma_g \cdot \frac{\sin(2\pi\sigma)}{2\pi}, \quad (2)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, $\Delta n = n_g - n_c$, 其中 n_g 和 n_c 分别为波导层和限制层的折射率, Γ_g 为光栅的限制因子,它与布拉格光栅的深度(d_g)成正比, σ 代表占空比,满足 $\sigma = L_g/\Lambda$, 其中 L_g 代表光栅的宽度。

图 1 给出了纯折射率耦合下 808 nm DFB 半导体激光器内置布拉格光栅耦合系数与占空比的关系。由图 1 可以看出耦合系数随着占空比的增大先是增大,增大到一定值时开始减小,在占空比 $\sigma = 0.25$ 处耦合系数 k 取得最大值,此时的光反馈最强,耦合系数最大;而在占空比 $\sigma = 0$ 和 $\sigma = 0.5$ 处,此时的耦合系数 k 为 0,没有光反馈形成,不会产生激光,并且占空比在 $\sigma = 0$ 和 $\sigma = 0.5$ 附近的位置,光的反馈也都非常弱,都很难会有激光产生。因此,808 nm DFB 半导体激光器二级布拉格光栅占空比设计为 0.25。图 2 为 808 nm DFB 半

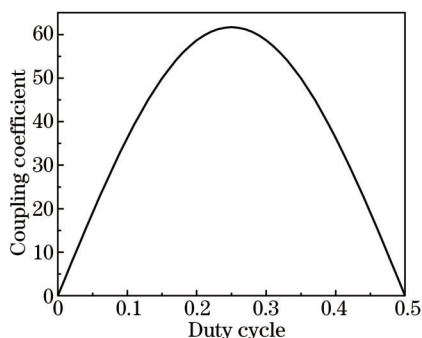


图 1 二级布拉格光栅耦合系数与占空比的关系
Fig.1 Relationship between coupling coefficient and duty cycle of second-order Bragg grating

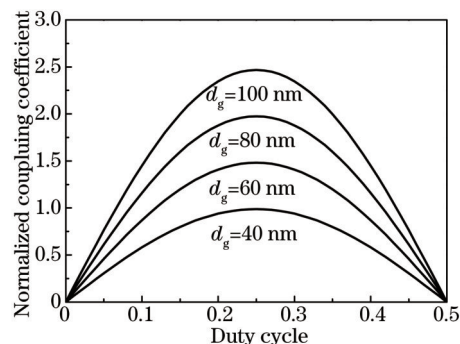


图 2 不同深度情况下二级布拉格光栅归一化耦合系数与占空比之间关系曲线
Fig.2 Relationship between normalized coupling coefficient and duty cycle of second-order Bragg grating with different depths

体激光器在不同光栅深度 d_g 的情况下,计算得到的二级布拉格光栅归一化耦合系数 kL 与占空比 σ 之间的关系曲线。归一化耦合系数是耦合系数 k 与DFB半导体激光器腔长 L 的乘积,按照图2,二级布拉格光栅可以通过增加光栅的深度来增加归一化耦合系数,而且当归一化耦合系数为2时^[23],DFB半导体激光器会有很好的性能,因此光栅的深度设计为80 nm。通过对二级布拉格光栅的优化,808 nm DFB半导体激光器的周期设计为240 nm,占空比设计为0.25,深度设计为80 nm。

实验采用全息光刻和湿法腐蚀技术制备808 nm DFB半导体激光器的光栅图形。全息光刻系统采用干涉稳定控制(条纹锁定)技术降低条纹抖动和提高干涉稳定性。通过制作莫尔光栅获得莫尔条纹,通过引入压电陶瓷和条纹识别软件控制压电陶瓷位移,从而实现对光程进行补偿、降低环境干扰和条纹锁定的目的。

全息光刻系统的光路图如图3所示。全息光刻系统的光源(1)采用功率为50 mW、波长为325 nm的He-Cd激光器。He-Cd激光器发出的波长为325 nm的激光经过取样反射镜(3),其中的1%传输到功率探测器(4)用来实时监测功率,余下的99%传输到半透半反镜(5),半透半反镜(5)把光分成两束,一束传输到压电陶瓷反射镜(6),一束传输到全反射镜(7),并分别都经过紫外扩束镜(8)和准直透镜(9)后再打到工件支架(10)上涂有光刻胶的基片(11)上,形成光栅条纹。曝光过程中使用光闸(2)作为曝光的控制开关,CCD探头(12)实时探测莫尔条纹漂移并反馈给电脑(13)中条纹锁定系统。

入射激光波长 λ 、干涉条纹周期 Λ 、激光束与法线的夹角(半角 θ)之间满足如下关系式:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} . \quad (3)$$

对于入射激光的波长 λ 为325 nm,干涉条纹周期 Λ 为240 nm的光路,通过计算得到双光束与法线的夹角(半角 θ)为42.6°。按计算得到的参数搭建全息光刻系统的光路。

在GaAs衬底上制备布拉格光栅之前,先在一块玻璃板上制作莫尔光栅。把莫尔光栅在光路上复位,调节光栅的位置,就会在莫尔光栅上观察到莫尔条纹。在实验中通过锁定莫尔条纹来控制激光干涉条纹,通过条纹锁定软件控制压电陶瓷位移,使得干涉条纹的位置保持不变,从而实现对光程进行补偿、降低环境干扰和条纹锁定的目的。

实验所采用的衬底片为GaAs(100)衬底。GaAs衬底片经过清洗、前烘、匀胶、后烘、全息曝光、显影、坚膜、刻蚀、去胶等过程后得到808 nm DFB半导体激光器所需的二级布拉格光栅。二级布拉格光栅设计成周期为240 nm,深度为80 nm。实验主要对匀胶、曝光、显影时间进行优化。光刻胶采用AZ系列,经过稀释得到大约为120 nm的胶厚。通过对全息光刻条件进行优化,曝光时间采用180 s,显影时间采用7 s,腐蚀液中 H_3PO_4 、 H_2O_2 和 H_2O 的体积比为1:1:10,腐蚀时间为30 s。对腐蚀得到的光栅进行表面形貌、周期和深度的测试。

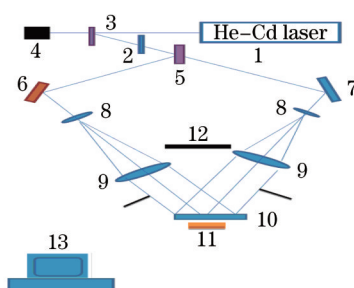


图3 全息光刻系统光路图

Fig.3 Optical path of holographic photolithography system

3 结果与讨论

通过对全息光刻条件进行优化制备得到了二级布拉格光栅。对光栅进行的光学显微镜测试和SEM测试照片如图4(a)、(b)所示。由图4(b)可以看出光栅的一个周期宽度为240 nm,说明全息光刻系统光路设计合理,符合808 nm DFB半导体激光器对二级布拉格光栅周期的要求。另外,从照片中也可以看出,光栅条纹均匀、平整且连续,具有非常完美的表面形貌,说明全息光刻条件合适,曝光时间、显影时间、腐蚀液配比、腐蚀速率等条件能够满足GaAs材料上制备光栅的需求。

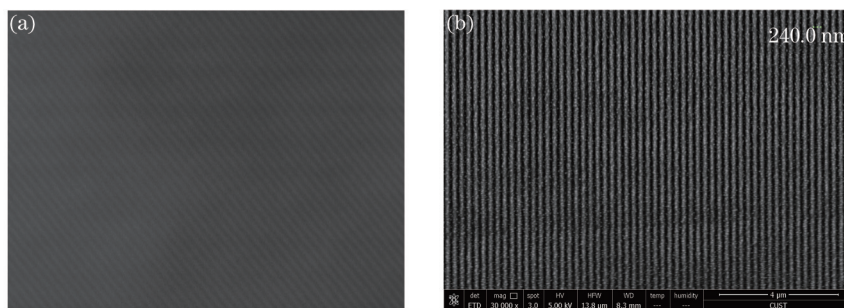


图4 光栅的(a)光学显微镜测试和(b)SEM测试照片

Fig.4 (a) Optical microscopy and (b) SEM image of grating

图5为光栅的AFM测试照片。从图中可以看出,占空比为0.25,深度为82.5 nm,近似为80 nm,光栅表面形貌完整,具有良好的连续性和均匀性。另外,从表面形貌曲线也可以看出,光栅的腐蚀图形为理想的正弦曲线,这样的光栅图形有利于进行二次外延生长。因此,所制备的光栅图形能够满足二次外延生长和808 nm DFB半导体激光器对二级布拉格光栅的要求。

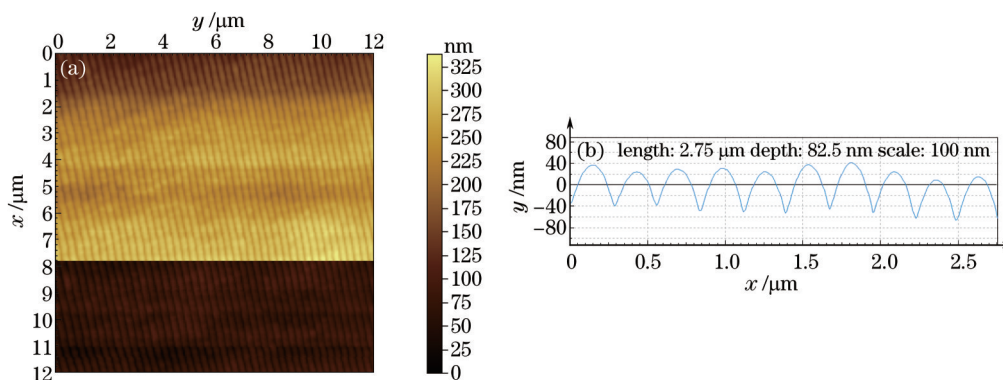


图5 光栅的AFM测试照片。(a)表面形貌;(b)表面形貌曲线

Fig.5 AFM image of grating. (a) Surface profile; (b) curve of surface profile

通过测试可以看出,光栅的周期为240 nm,占空比为0.25,深度为80 nm,图形为理想的正弦曲线,具有完美的表面形貌,及良好的连续性和均匀性。与传统的纳米压印技术在InP衬底上制备的周期为240 nm的布拉格光栅相比^[4],全息光刻技术不需要制作纳米压印模板,这就减少了纳米压印模板的制备工艺,减化了工艺流程,提高了光栅的制备效率,降低了光栅的制作成本,有利于光栅在器件中的应用。

4 结 论

采用全息光刻和湿法腐蚀技术在GaAs衬底上制备了808 nm DFB半导体激光器所需的二级布拉格光栅。对全息光刻条件进行了优化,曝光时间采用180 s,显影时间中7 s,腐蚀液中H₃PO₄、H₂O₂和H₂O的体积比为1:1:10,腐蚀时间为30 s。光学显微镜测试、SEM测试和AFM测试结果显示,光栅周期为240 nm,占空比为0.25,深度为80 nm,图形为理想的正弦曲线,具有完美的表面形貌及良好的连续性和均匀性,表明所制备的光栅能够满足二次外延生长和808 nm DFB半导体激光器对二级布拉格光栅的要求,这对二次外延制作DFB半导体激光器有着非常重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2191-2197.
王启明. 中国半导体激光器历次突破与发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2191-2197.
- 2 He Xingren. The status of development in diode lasers and its trends[J]. Optoelectronic Technology & Information, 1999, 12(4): 14-20.
何兴仁. 半导体激光器发展现状与趋势[J]. 光电子技术与信息, 1999, 12(4): 14-20.
- 3 Wang Dingli, Zhou Ning, Wang Lei, *et al.*. DFB gratings for semiconductor laser diodes by nanoimprint lithography[J]. Microscop Measurement Microfabrication & Equipment 2010, 47(1): 56-59.

- 王定理, 周 宁, 王 磊, 等. 纳米压印制作半导体激光器的分布反馈光栅[J]. 显微、测量、微细加工技术与设备, 2010, 47(1): 56-59.
- 4 Feng Junbo. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. 60-68.
冯俊波. 硅基微纳光栅耦合器件及其制备技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009. 60-68.
- 5 Li Yaoyao, Xu Gangyi, Zhang Yonggang, *et al.*. Fabrication of gratings in the distributed feedback quantum cascade lasers[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2009, 15(5): 471-476.
李耀耀, 徐刚毅, 张永刚, 等. 分布反馈量子级联激光器的光栅制备[J]. 功能材料与器件学报, 2009, 15(5): 471-476.
- 6 Gao liyan, Chen Guoying, Hua Jizhen, *et al.*. The wet etching study of the uniform grating DFB semiconductor laser[J]. Manufacturing Technology, 2005, 30(8): 41-48.
高丽艳, 陈国鹰, 花吉珍, 等. 湿法腐蚀DFB半导体激光器的均匀光栅的研究[J]. 制造技术, 2005, 30(8): 41-48.
- 7 Han Jian. The Research on the Lithography System Optimization and the Grating Mask Profile Parameters Controlling in the Fabrication of the Holographic Grating[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2012. 1-16.
韩 建. 全息光栅曝光光学系统优化及光栅掩模参数控制方法的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2012. 1-16.
- 8 Wang Chunwei. Research on Uniformity of Wet Etching[D]. Shanghai: Fudan University, 2012. 6-10.
王春伟. 湿法刻蚀均匀性的技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012. 6-10.
- 9 Schmahl G, Rudolph D, Schneider G, *et al.*. Diffraction optics for X-ray imaging[J]. Microelectronic Engineering, 1996, 32(1): 351-367
- 10 Benoit Deville, F Bonnemason, B Touzet. Holographically recorded ion-etched variable lines space gratings[C]. SPIE, 1998, 3450: 24-35.
- 11 Yang Guisheng, Dong Zhijiang, Yang Xinmin, *et al.*. High-quality 1.55 μm DFB lasers with first-order gratings[J]. Study on Optical Communications, 1994, 1: 105-110.
杨桂生, 董志江, 扬新民, 等. 高质量的一级光栅1.55 μm DFB激光器[J]. 光通讯研究, 1994, 1: 105-110.
- 12 Klehr A, Bugge F, Erbert G, *et al.*. High power broad area 808 nm DFB laser for pumping solid state lasers[C]. SPIE, 2006, 6133: 96-105.
- 13 Fu Shenghui, Zhong Yuan, Song Guofeng, *et al.*. High-power distributed feedback laser diodes emitting at 820 nm[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27: 966-969.
付生辉, 钟 源, 宋国峰, 等. 激射波长为820 nm的大功率分布反馈激光器[J]. 半导体学报, 2006, 27: 966-969.
- 14 Jang S J, Yeo C I, Yu J S, *et al.*. 1.55- μm DFB lasers with narrow ridge stripe and second-order metal surface gratings by holographic lithography[J]. Physica Status Solidi (A), 2010, 207(8): 1982-1987.
- 15 Shi Junxiu, Qin Li, Ye Shujuan, *et al.*. A 927 nm distributed feedback laser with surface second-order metal grating[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(10): 1488-1491.
仕均秀, 秦 莉, 叶淑娟, 等. 具有表面二阶金属光栅的927 nm分布反馈半导体激光器的研制[J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1488-1491.
- 16 Zhao Yihao, Wang Jun, Wang Cuiluan, *et al.*. Study of high-power broad area distributed-feedback laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802005.
赵懿昊, 王 俊, 王翠鸾, 等. 大功率宽条分布反馈激光器研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802005.
- 17 Chen Fen, Zhou Yaxun, Feng Boru, *et al.*. Factors of affecting patterning quality in holographic lithography[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(12): 1335-1339.
陈 芬, 周亚训, 冯伯儒, 等. 影响全息光刻图形质量的因素[J]. 半导体学报, 2003, 24(12): 1335-1339.
- 18 Li Ben, Wang Xiao. The fabrication of the locking device of interference fringes in holographic exposure[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(12): 1013-1018.
李 犇, 汪 啸. 全息曝光条纹锁定研究与装置设计[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(12): 1013-1018.
- 19 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Wavefront aberration analysis of the interference image according to different axis alignment errors in the grating exposure system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705002.
韩 建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息曝光系统轴向调节误差对光栅衍射波像差的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705002.
- 20 Hu Jin, Pu Donglin, Wei Guojun, *et al.*. A method of dot-matrix holography based on the diffraction grating and spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609006.

- 胡 进, 浦东林, 魏国军, 等. 基于衍射光栅和空间光调制器的点阵全息光刻方法[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609006.
- 21 Cai Sheng, Liang Shuang, Ding Zhenyong, *et al.*. Auto-collimation angular measurement method based on moire fringe[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2008, 19(10): 1375-1377.
- 蔡 胜, 梁 爽, 丁镇勇, 等. 基于莫尔条纹的自准直测角方法研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(10): 1375-1377.
- 22 Zhao Yihao, Wang Jun, Wang Cuiluan. Study of high-power broad area distributed-feedback laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802005.
- 赵懿昊, 王 俊, 王翠鸾. 大功率宽条分布反馈激光器研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802005.
- 23 Carroll J E, Whiteaway J, Pulumb D. Distributed Feedback Semiconductor Lasers[D]. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.

栏目编辑: 史 敏