

ICP 刻蚀优化及在多波长分布反馈式激光器阵列中的应用

饶 岚¹, 忻向军¹, 李灯熬³, 王任凡³, 胡 海⁴

¹北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

²太原理工大学信息工程学院, 山西 太原 030024;

³武汉电信器件有限公司, 湖北 武汉 430074;

⁴深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518000

摘要 研究了 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ 感应耦合等离子体刻蚀技术中的关键工艺参数对刻蚀性能的影响。通过对 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ 气体流量及流量比的优化, 在自行设计的 InP/InGaAlAs 多量子阱结构的外延片上, 实现了一种高速低损耗、形貌良好的 Bragg 光栅制作方法。基于优化后的工艺参数制作了多周期结构的 $\lambda/4$ 相移光栅, 实现了单片集成的四波长 $1.3 \mu\text{m}$ 分布反馈式激光器阵列。该激光器阵列中激光器的阈值电流典型值为 11 mA, 外微分效率可达 0.40 W/A , 且实现了边模抑制比大于 46 dB 的稳定的单纵模激光输出。研究结果表明优化后的 ICP 光栅刻蚀工艺具有良好的刻蚀精度和可靠性。

关键词 激光器; 分布反馈式激光器阵列; 感应耦合等离子体刻蚀; InP/InGaAlAs; 片上集成

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.031405

Parameter Optimization of Inductively Coupled Plasma and Its Application on Multi-Wavelength DFB Laser Array

Rao Lan¹, Xin Xiangjun¹, Li Deng'ao², Wang Renfan³, Hu Hai⁴

¹School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

³Accelink Technologies Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430074, China;

⁴Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract The influence of the key process parameters of $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ inductively coupled plasma (ICP) on the etching performance was systematically investigated. The flow density and the ratio in $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ gas mixtures are optimized. Therefore, an effective method can be used for fabricating Bragg grating with high etching rate, low damage ICP etching and high quality surface on special designed InP/InGaAlAs multiple quantum well wafer. Combined with post-process, four wavelengths $1.3 \mu\text{m}$ distributed feedback laser array was fabricated based on multi-period $\lambda/4$ shifted Bragg grating. The typical threshold current and the external differential efficiency are about 11 mA and 0.40 W/A , respectively. And the side mode suppression ratio of each laser diode is more than 46 dB. It can be verified that ICP etching processing in Bragg grating has high quality and reliability.

Key words lasers; distributed feedback laser array; inductively coupled plasma; InP/InGaAlAs; on-chip integration

OCIS codes 140.2010; 220.4241; 130.5990

收稿日期: 2016-08-31; **收到修改稿日期:** 2016-11-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA016901)

作者简介: 饶 岚(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事通信光电子材料、器件与集成技术方面的研究。

E-mail: raolan@bupt.edu.cn

1 引言

近年来,随着光纤通信技术的迅猛发展,传输容量发生了巨大增长。多波长分布反馈式(DFB)半导体激光器阵列已经成为了光通信网络中的核心器件,在骨干网和接入网中均有着广泛的应用。单片集成 InP 基 4 通道 $1.3\ \mu\text{m}$ DFB 激光器阵列性能已经取得了重大研究进展^[1-3]。2010 年 IEEE802.3 所提出的 100GE 标准^[4]给出了 $1.3\ \mu\text{m}$ DFB 激光器阵列具体参数要求。分布反馈布拉格(Bragg)光栅结构是实现半导体激光器单纵模输出的有效技术方案。通过改变 DFB 激光器的模式折射率或者 Bragg 光栅的周期结构,可以调节 DFB 激光器的激射波长。为了进一步提高激光器的单纵模特性,通常在激光器光栅中引入一定的相移来破坏光栅的周期性,消除模式的简并。因此,光栅的好坏将直接影响到 DFB 激光器的特性,如边模抑制比和激光输出波长稳定性,同时对阈值电流、外微分量子效率也有一定的影响。在多波长激光器阵列中,为了实现多波长的激射,需要设计多周期光栅结构。因此,多周期结构非均匀 Bragg 光栅的制作成为了多波长激光器阵列的关键技术。目前主要的实现技术有电子束(E-Beam)曝光技术,采样光栅以及选择生长技术等^[5-8]。在刻蚀方面,感应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术是一种高密度、低气压的干法刻蚀技术,具有通过参数调节精确控制刻蚀等优势,可以用于制作垂直度和光洁度良好的高性能光栅,且具有低的刻蚀损伤,这对 DFB 激光器的制作尤为重要,因为 DFB 激光器光栅位置非常接近有源区。电子束光曝光结合 ICP 技术是实现多波长 DFB 激光器阵列的多周期非均匀光栅制作的关键技术之一。但是,ICP 刻蚀工艺参数如:气体的种类、气体流量比、刻蚀时间、掩模材料、ICP 功率(加载到 ICP 线圈上的电感耦合射频源功率)、射频(RF)功率(用于 RF 控制的功率)、温度、压强等因素对刻蚀的速率、形貌及损伤均有显著的影响^[9-12]。

本文对 ICP 关键工艺参数进行了全面系统的研究。通过对 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ 气体流量比的优化,获得了实现高速低损耗、形貌良好的多周期结构非均匀光栅的刻蚀参数。基于优化后的参数,制作了波长间隔约为 $4.5\ \text{nm}$ 的四波长 DFB 激光器阵列,且每个激光器均为单纵模输出,边模抑制比均大于 $46\ \text{dB}$ 。研究表明,通过参数优化,基于电子束的低损耗 ICP 刻蚀技术是实现 InP 基多波长 DFB 激光器阵列片上集成的有效方法。

2 实验

实验选用仪器设备是 Oxford Plasma System 100 ICP 刻蚀设备,该 ICP 系统有两套相互独立的 RF 源,它们的工作频率均在 $13.56\ \text{MHz}$ 。其中,一个 RF 源加载到 ICP 线圈用于产生高密度等离子体,另一个 RF 源用于 RF 的控制。通过增加 ICP 功率,可以提高腔内等离子体的密度,增加参加反应的离子数目,从而增强化学反应的效果。但是,由于等离子体数量的增加会导致刻蚀的方向性变差,即各项同性的刻蚀效果增强。RF 控制的作用是在垂直方向上构建一个交流电场,腔内的等离子体在电场的作用下对样品的表面进行高速轰击,达到刻蚀的效果。通过增加 RF 功率,对等离子体进行加速,增加定向刻蚀性能,增加各项异性的刻蚀能力。但是离子对表面轰击的过程中会对表面产生一定的损伤。ICP 系统提供的主要气体源有 CH_4 、 H_2 、 Cl_2 、 SiCl_4 、 BCl_3 、 N_2 等。对于 InP 材料而言,针对不同的掩模材料需要选择不同的气体配方,不同的流量和流量比,以获得良好的刻蚀速率、刻蚀形貌以及高的刻蚀选择比。除上述参数,腔内压强以及腔内温度对刻蚀的速率和方向性均有影响。

实验样品为采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)生长的多层 InGaAlAs 量子阱结构的一次外延片。在 ICP 干法刻蚀工艺中,掩模层的选择非常重要^[13]。通常固体掩模的选择和制备需要考虑以下三点:1) 选择掩模板图形容容易生成且边缘整齐、侧壁垂直光滑;2) 掩模和被刻蚀材料之间的选择比较高;3) 完成刻蚀后,掩模容易去除,且对材料表面的影响较小。由于 SiO_2 抗蚀性强,可以使用 IF 腐蚀液轻易去除,而且对 InP 材料干法刻蚀具有较高的选择比,所以 SiO_2 是 InP 刻蚀工艺中最为普遍的掩模材料。在实验样品上,利用等离子增强化学气相沉积(PECVD)生长制作 SiO_2 掩模板。在 ICP 干法刻蚀过程中,通过光刻首先将图形转移到光刻胶上,再采用 ICP 干法刻蚀将图案转移到掩模 SiO_2 层上,然后再用干法刻蚀对量子阱波导进行刻蚀,形成分布反馈式光栅。ICP 干法刻蚀制作光栅的流程图如图 1 所示。

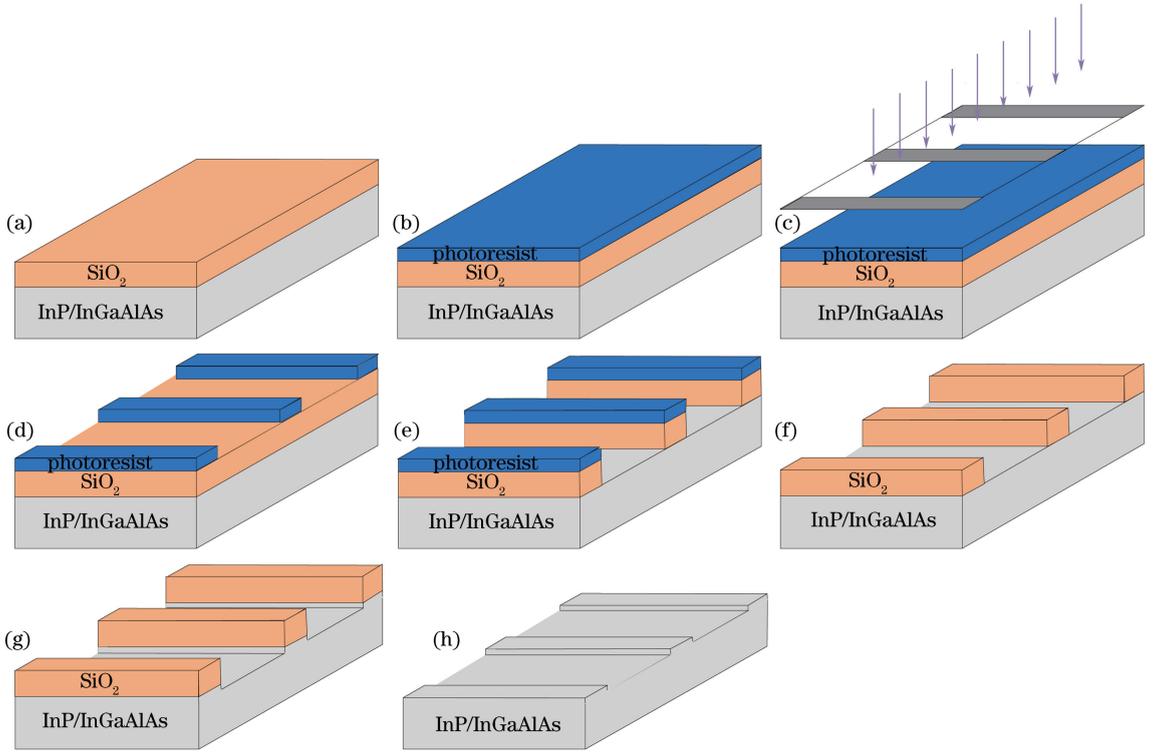


图 1 工艺流程示意图。(a)生长 SiO_2 ; (b)甩光刻胶; (c)曝光; (d)显影; (e)刻蚀 SiO_2 ; (f)去除光刻胶; (g) ICP 刻蚀; (h)去除 SiO_2

Fig. 1 Schematic of the process flow. (a) InP with Silicon dioxide layer; (b) coat with photoresist; (c) expose photoresist with a patterned reticle; (d) develop photoresist; (e) etch SiO_2 ; (f) strip photoresist; (g) ICP etch; (h) strip SiO_2

3 结果及分析

由于 ICP 刻蚀的效果是物理刻蚀和化学刻蚀的动态平衡结果, 制约刻蚀效果的因素也很多, 包括气体的组分选择、流量的控制、ICP/RF 功率的选择和真空腔的压强及温度控制等, 因此, 目前无法通过建模来实现最佳配方的计算, 大多数都是根据具体实验条件来确定刻蚀的配方参数。虽然无法通过建模来进行定量分析, 但是实验的定性分析可以为刻蚀配方参数的优化提供一种有效途径。

3.1 ICP 功率和 RF 功率对刻蚀速度的影响

实验中, 分别选取 RF 功率为 100 W 和 200 W 对光栅结构进行刻蚀, 结果表明, RF 功率对刻蚀速度的影响不明显。但是, 在相同 RF 功率(200 W)条件下, 分别测试了 ICP 功率为 100, 200, 300 W 时刻蚀光栅所需要的时间。随着 ICP 功率的增加, 其刻蚀速率明显增加。这是因为随着 ICP 功率的增加, 电感耦合所产生的等离子体密度增加, 从而使得参加刻蚀反应的离子浓度增加, 加速了化学刻蚀速度, 从而缩短了刻蚀的时间。ICP 除了对刻蚀的速度产生影响以外, 还会对脊形波导的垂直特性和表面光洁度产生影响。在 RF 作用下, 耦合电离产生的离子将获得动能, 在外加电场的作用下轰击样品的表面, 产生物理刻蚀, 使得刻蚀产生各项异性。在相同 RF 功率条件下, 离子获得的平均动能与浓度成反比关系, 即随着浓度的增加, 刻蚀的方向性减弱, 从而造成了刻蚀光栅侧壁的垂直度下降。但是在相同的 ICP 功率条件下, 即离子浓度一定条件下, 离子获得的动能随着 RF 功率的增加而增加。当 RF 功率过大时, 高能粒子轰击底部反弹会造成靠近底部光栅侧壁内切的现象。基于上述实验结果, 在物理刻蚀和化学刻蚀效应的联合作用下, 选择合适的 ICP 功率来保证刻蚀速率, 并通过优化 RF 功率和 ICP 功率的比值获得良好的光栅侧壁垂直度。

3.2 CH_4/H_2 对刻蚀的影响

在恒定 ICP 功率和 RF 功率的前提下, 分析 CH_4/H_2 对刻蚀性能的影响。 H_2 在与 InP 材料相互作用时, 既可以作为刻蚀气体, 也可以起到辅助去沉积的效果。当 CH_4 引入到 CH_4/H_2 刻蚀配方中后, 随着 CH_4 浓度的增加, 刻蚀的速度并非单调递增, 这是因为 CH_4 在刻蚀过程中会引入大量碳氢聚合物的沉积。

然而,引入的沉积物恰好可以被 H_2 去除。由此可以看出, CH_4/H_2 的气体流量比的有效控制能在保证刻蚀速度的情况下,使刻蚀表面具有一定的光洁度。在实验中 CH_4/H_2 的气体流量比从 5:1 减小到 1:1。研究表明,当 CH_4/H_2 的气体流量比为 2:1 时获得最优刻蚀效果。图 2 为优化 CH_4/H_2 气体流量比后的 ICP 刻蚀结果的扫描电子显微镜(SEM)图片。

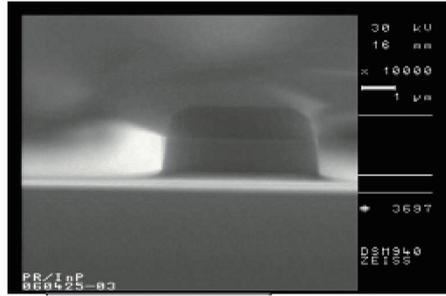


图 2 优化 CH_4/H_2 气体流量比后的 ICP 刻蚀结果的 SEM 图片

Fig. 2 SEM image of the ICP etching results after optimizing the ratio between CH_4 and H_2

3.3 $CH_4/H_2/Cl_2$ 气体对刻蚀的影响

对于 InP 材料, Cl_2 是一种腐蚀性较强的气体,因而也常常被引入到 CH_4/H_2 刻蚀配方中。形成 $CH_4/H_2/Cl_2$ 刻蚀配方。首先,研究了 Cl_2 气体的流量对刻蚀速率的影响。研究表明,当 Cl_2 气体的流量在 6 sccm(标准立方厘米每分)以下时,刻蚀的速率主要由 CH_4/H_2 的流量和流量比决定;随着 Cl_2 气体流量的增加, Cl_2 在刻蚀中起主导地位,刻蚀的速率大大增加,而且由于 Cl_2 对 SiO_2 的刻蚀效果也很明显,相比于 CH_4/H_2 配方具有更高的选择比,因此,实验中获得的优化参数为 Cl_2 的流量在 40 sccm 时, CH_4 的流量为 20 sccm, H_2 的流量为 10 sccm;较之前 Cl_2 气体的流量在 6 sccm 时, CH_4 和 H_2 流量均减小了一半。其次,研究了 $CH_4/H_2/Cl_2$ 刻蚀配方中 Cl_2 气体所占总气体的比例对刻蚀速度的影响。当 Cl_2 气体所占总气体的比例小于 10% 时,刻蚀速率主要由 CH_4/H_2 配方来决定; Cl_2 气体所占总气体的比例在 10%~60% 范围内时,刻蚀速率随着 Cl_2 气体所占总气体的比例增加呈现出超线性增长;当 Cl_2 气体所占总气体的比例超出 60% 以后,刻蚀的速率迅速增加。再次,分析了 $CH_4/H_2/Cl_2$ 配方中三种气体的流量比对刻蚀形貌的影响。 $CH_4/H_2/Cl_2$ 配方中, Cl_2 与 CH_4 、 H_2 混合一方面稀释了 Cl_2 的浓度,另一方面 H_2 与 InP 和 Cl_2 相互作用产生 $InCl_3$ 的化学反应弱化了 $InCl_3$ 的沉积效果,同时, Cl_2 也会弱化由于 CH_4 所引入碳氢聚合物的影响。因而, $CH_4/H_2/Cl_2$ 配方中,可以通过优化 $CH_4/H_2/Cl_2$ 气体流量比,使各种过程达到一个动态平衡。实验研究表明:当选择 $CH_4/H_2/Cl_2$ 配方中三种气体的流量比为 2:1:4 时,波导侧壁具有良好垂直度和表面粗糙度,且 H_2 的相对比例关系对侧壁的垂直度和粗糙度的影响较为明显,其刻蚀结果的 SEM 图如图 3 所示。其中图 3(a)为正面的 SEM 图,图 3(b)为斜侧面图。从图中可以看出波导侧壁具有良好的垂直度。

基于上述的分析和优化,在 InP/InGaAlAs 延片实验样品上制作了周期为 240 nm 的 $\lambda/4$ 相移光栅,刻蚀后光栅的 SEM 图如图 4 所示。刻蚀的条件为:采用 SiO_2 作为固体掩模板,在腔内温度为 90 °C,压强为 2.66 Pa 的环境下,RF 功率设定为 100 W,ICP 功率设定 300 W, Cl_2 的流量为 40 sccm, $CH_4/H_2/Cl_2$ 三种气体的流量比为 2:1:4,刻蚀时间为 15 s。结果表明,刻蚀的效果良好。

3.4 半导体激光器性能分析

为了进一步分析 ICP 刻蚀对器件性能的影响,在制作完光栅结构后,经过二次外延生长、低温沉积、化学腐蚀和欧姆接触制造,解理后制成 DFB 激光器,对激光器性能在常温条件下进行了测试。测试结果如图 5(a)所示。图 5(a)为 DFB 激光器典型的 $P-I-V$ 特性曲线,激光器的基本特性参数为:阈值电流为 11 mA,外微分效率为 0.443,开启电压为 1.16 V,电阻为 6.4 Ω 。输出功率最大值可以超过 30 mW。

为了进一步验证该刻蚀技术的可靠性和稳定性,对光栅周期稍有不同的阵列激光器芯片光栅进行了刻蚀,在相同的后续工艺条件下,制作了多波长 DFB 激光器阵列,对激光器阵列的光谱特性进行分析,测试结果如图 5(b)所示。四波长激光器输出均为单纵模,波长分别为 1295.0,1299.6,1304.1,1308.8 nm,且激光器的边模抑制比分别为 46.22,46.17,47.97,47.69 dB,光谱质量很好。因此,获得了波长间隔约为 4.5 nm 的四

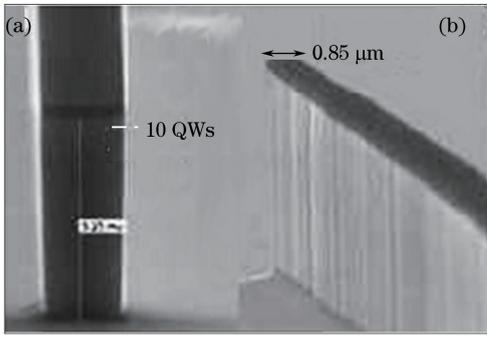


图3 优化 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ 气体的流量比后 ICP 刻蚀结果的 SEM 图。(a)正面图;(b)斜侧面图

Fig. 3 SEM image of ICP etching results after optimizing the flow ratio of $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$. (a) Front view; (b) side view

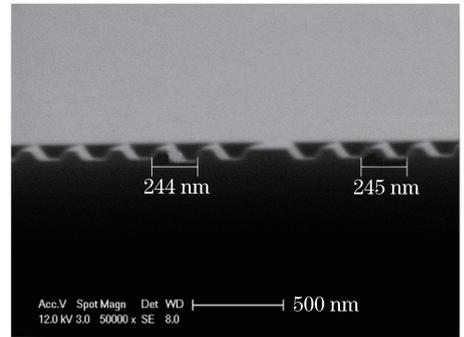


图4 $\lambda/4$ 相移 Bragg 光栅的 SEM 图片

Fig. 4 SEM image of $\lambda/4$ shift Bragg grating

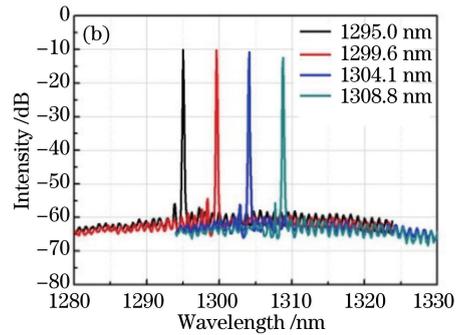
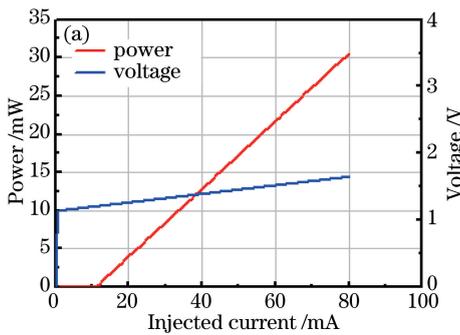


图5 DFB 激光器特性测试。(a) P - I - V 特性;(b)激光器阵列的输出光谱

Fig. 5 Characteristics of the DFB laser. (a) P - I - V characteristics; (b) output spectra of laser array

波长激光器阵列。因此,通过控制 ICP 干法刻蚀的气体流量比,能获得高性能的光栅结构。使得多波长 DFB 激光器阵列具有波长间隔稳定的高边模抑制比的单纵模激光输出。

4 结 论

研究了 ICP 刻蚀中关键参数对 Bragg 光栅刻蚀性能的影响。结合多波长 DFB 激光器阵列光栅的多周期性、非均匀性的特点,通过优化感应耦合功率、射频功率及 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ 气体的流量及流量比实现了高速低损耗、刻蚀形貌良好的 Bragg 光栅刻蚀。基于该 Bragg 光栅刻蚀技术,制作出具有良好静态特性的四波长 $1.3 \mu\text{m}$ 的 DFB 激光器阵列,其输出波长间隔约为 4.5 nm ,边模抑制比大于 46 dB 。研究结果表明,ICP 刻蚀技术是实现高效、低成本多波长 DFB 激光器阵列制作的一个有效、可靠工艺。在 InP 基片集成的光电子器件的制作中将发挥重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Manabu M, Uetake A, Simoyama T, *et al.*. $1.3\text{-}\mu\text{m}$ -wavelength AlGaInAs multiple-quantum-well semi-insulating buried-hetero structure distributed-reflector laser arrays on semi-insulating InP substrate[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 1502307.
- [2] Otsubo K, Matsuda M, Takada K, *et al.*. Uncooled 25-Gbit/s direct modulation of semi-insulating buried-heterostructure $1.3\text{-}\mu\text{m}$ AlGaInAs quantum-well DFB lasers[J]. Electronic Letters, 2008, 44(10): 631-633.
- [3] Nakahara K, Wakayama Y, Kitatani T, *et al.*. 80°C , 50-Gb/s directly modulated InGaAlAs BH-DFB lasers[C]. IEEE 24th International Semiconductor Laser Conference, 2014: 66-67.
- [4] IEEE Standard Association. IEEE Standard 802.3[S]. Piscataway: IEEE Standard Association, 2012.
- [5] Zhu H L, Xu X D, Wang H, *et al.*. The fabrication of eight-channel DFB laser array using sampled gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(5): 353-355.

- [6] Sarangan A M, Xu C L, Huang W P, *et al.* Analysis of multi-wavelength DFB laser arrays with different ridge widths [C]. *Integrated Photonics Research*, 1995: 187-189.
- [7] Fujisawa T, Kanazawa S, Takahata K, *et al.* 1.3- μm , 4 \times 25-Gbit/s, EADFB laser array module with large-output-power and low-driving-voltage for energy-efficient 100GbE transmitter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 614-620.
- [8] Guo F, Zhang R K, Lu D, *et al.* 1.3- μm multi-wavelength DFB laser array fabricated by MOCVD selective area growth[J]. *Optics Communications*, 2014, 331: 165-168.
- [9] Jiang Shan, Dong Lei, Zhang Ruikang, *et al.* Processing parameters optimization of Cl_2/H_2 ICP etching and its used for the fabrication of 1.55 μm DFB Laser[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, 20(5): 583-586.
江 山, 董 雷, 张瑞康, 等. Cl_2/H_2 ICP 刻蚀优化及其在 1.55 μm DFB 激光器制作中的应用[J]. *光电子 • 激光*, 2009, 20(5): 583-586.
- [10] Ma Xiaotao, Zheng Wanhua, Ren Gang, *et al.* Inductively coupled plasma etching of two-dimensional InP/InGaAsP-based photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 977-981.
马小涛, 郑婉华, 任 刚, 等. 感应耦合等离子体刻蚀 InP InGaAsP 二维光子晶体结构的研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(2): 977-981.
- [11] Zhao Jianyi, Chen Xin, Zhou Ning, *et al.* Reliability study of DFB laser fabricated by nanoimprint technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0206003.
赵建宜, 陈 鑫, 周 宁, 等. 纳米压印工艺制作 DFB 激光器的可靠性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0206003.
- [12] Dylewicz R, Bryce A C, Sorel M, *et al.* High aspect ratio inductively coupled plasma (ICP) etching of InP/InGaAsP/AlGaInAs using $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ gas mixture [C]. *European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference*, 2009.
- [13] Wang Jian, Xiong Bing, Sun Changzheng, *et al.* Etched-facet AlGaInAs/AlInAs semiconductor laser fabricated by $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ inductively coupled plasma[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1031-1034.
王 健, 熊 兵, 孙长征, 等. 刻蚀端面 AlGaInAs/AlInAs 激光器的制作与特性[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1031-1034.