

doi:10.3788/gzxb20134203.0293

InP 阵列波导光栅的误差分析

潘盼, 安俊明, 王亮亮, 张俐耀, 王玥, 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘 要: 在 InP 阵列波导光栅的制作过程中会引入不同的误差, 从而影响器件的性能. 为了最大限度地控制误差, 提高半导体器件性能, 本文采用传输函数法对 InP 基阵列波导光栅的系统误差和随机误差分别进行了分析. 从系统误差的模拟结果中可以得到如下结论: 深脊型波导的有效折射率 n_e 平均每偏移 $+0.0001$, 中心波长偏移 $+0.05$ nm. 相邻阵列波导长度差 ΔL 每偏移 $+0.01 \mu\text{m}$, 中心波长将偏移 $+0.44$ nm. n_e 和 ΔL 仅仅会影响到传输谱中心通道及其他各通道对应的波长, 使得传输谱发生整体漂移, 而信道间隔及串扰不会改变. 罗兰圆半径 R 偏移不会影响器件的中心通道对应的波长, 但会使其它通道对应的波长发生变化, 最终使得信道间隔改变, R 增加 $50 \mu\text{m}$, 信道间隔减小 0.03 nm. 从随机误差模拟结果中, 得出: 波导芯区折射率、上包层折射率、衬底折射率、波导宽度和波导芯层厚度的随机波动会对阵列波导光栅的串扰产生较大的影响. 根据以上分析, 可以通过控制不同参量来调节器件的中心波长以及信道间隔等来优化阵列波导光栅的光学性能.

关键词: InP 阵列波导光栅; 简单传输函数法; 系统误差; 随机误差

中图分类号: TN256; TN203

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)03-0293-5

Error Analysis of InP Arrayed Waveguide Grating

PAN Pan, AN Jun-ming, WANG Liang-liang, ZHANG Li-yao, WANG Yue, HU Xiong-wei

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Errors will be introduced in the fabrication process of InP arrayed waveguide grating, consequently affect the performance. To control errors best, and improve the performance of the device, the systematic errors and random errors of InP-based arrayed waveguide grating was analyzed by adopting transmission function method. It is come to a conclusion from the simulation result of systematic errors that: the deviation of effective index of the deep-ridge waveguide n_e changes every 0.0001 , the central wavelength shifts 0.05 nm. The length difference of adjacent arrayed waveguides ΔL changes every $0.01 \mu\text{m}$, the central wavelength shifts 0.44 nm. They will consequently cause the shift of whole optical spectrum, but the channel spacing and crosstalk will not be changed. The deviation of the radius of Rowland circle will not change the central wavelength but change the channel spacing. R increases every $50 \mu\text{m}$, the channel spacing decreases 0.03 nm. According to the simulation result of random errors: the refractive index of core layer, the cladding layer and the substrate layer of the waveguide, the waveguide width and the thickness of core layer's random fluctuation can deep affect the crosstalk. According to the analysis above, central wavelength and channel spacing can be tuned by changing different parameters, thereby, improving the optical performance of the arrayed waveguide grating.

Key words: InP arrayed waveguide grating; Transmission function method; Systematic errors; Random errors

基金项目: 国家高技术研究发展计划光子集成技术与系统应用(No. 2011AA010303)、基金委重大项目-高速光电子集成基础研究(No. 61090390)、重点项目(No. 60837001)、面上项目(Nos. 61275029, 61274047)和青年科学基金项目(No. 61205044)资助

第一作者: 潘盼(1988-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为 InP 基阵列波导光栅. Email: panpan1988@semi.ac.cn

导师(通讯作者): 安俊明(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为平面无源光波导器件. Email: junming@red.semi.ac.cn

收稿日期: 2012-08-30; **录用日期:** 2012-11-07

0 引言

光传输和路由这两项技术是构建互联网的重要组成部分. 在互联网的语音和数据传输中, 约有95%是以光子形式进行. 据统计, 带宽需求每年以50%的速度上升, 传统的基于分离器件的光网络已经不能满足需求, 我们需要一个更大容量、更可靠、更廉价的信道传输系统, 基于 InP 材料的光子集成技术将发挥重大作用^[1]. InP 阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG) 在光子集成技术中实现多波长的复用起到至关重要的作用. 国外对于 400Gb/s 的光子集成技术 (Photonic Integrated circuits, PIC) 在实验室有很大的突破, 其业内代表是美国的英飞朗公司. Infinera 公司已经实现了 100G 密集型波分复用 (Dense WaveLength Division Multiplexing, DWDM) 大规模光子集成芯片的商用, 其中 InP 基 AWG 在多波长复用/解复用起到关键作用. 国外有报道称通过一个 40 通道的 InP AWG 可以在一个芯片上集成 241 个单个器件^[2-3]. 国内对于单个光子器件的研究早就开始, 但关于单片光子集成方面的工作才刚刚开始, 其中我们的研究小组承担了对用于单片集成的 InP 基 AWG 的研究^[4-5]. 国内对于 InP AWG 的研究还不成熟, 损耗和串扰还比较大^[6]. AWG 是一种干涉型器件, 对相位的变化及其敏感, 当有规律的相位被破坏时, 其输出谱将变差. 在 AWG 的设计和制备的过程中不可避免地会引入误差, 包括设计误差 (系统误差) 和工艺误差 (随机误差)^[7-8]. 这些误差将具体地反映到 AWG 的相位上, 从而影响 AWG 的性能. 本文在分析 AWG 的几个典型物理参量的设计误差的影响以外, 将细化到影响光程差的各参量, 进一步分析这些参量的随机性对 InP AWG 器件性能的影响. 另外, 可以通过改变这些参量来调整 AWG 的中心波长以及信道间隔, 从而在单片光子集成中可以与激光器以及探测器等更好地对准.

1 理论分析模型

1.1 InP AWG 系统误差分析模型

传输函数法在处理传输谱时忽略了传输损耗, 且无法评估 AWG 器件中存在的模式转换所带来的损耗, 但是它相比其他的数值分析方法能够节省大量的运算时间, 在分析串扰时更为便捷. 在进行相位误差对 AWG 输出谱的影响的分析时, 可以不考虑插损, 所以可以用传输函数法来分析相位误差对传

输谱的影响. 在只考虑从中心波导入射的情况下, 利用传输函数法, 给出的光波在器件中传播过程的表达式为

$$T = \left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} [j n_s(\lambda) \frac{dx_0}{R} + j n_c(\lambda) \Delta L] \right\} \right|^2 \quad (1)$$

$$\text{Loss (dB)} = 10 \times \lg T \quad (2)$$

在系统误差分析时只需要在关键常量上附加一个偏离值即可, 即

$$T = \left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} [j (n_s + \Delta(n_s)) \cdot \frac{(d + \Delta d)(x_0 + \Delta x_0)}{R + \Delta R} + j (n_c + \Delta n_c) (\Delta L + \Delta(\Delta L))] \right\} \right|^2 \quad (3)$$

式中, $\rho_g(j, 0)$ 为功率分布函数; n_s 、 R 、 n_c 、 d 、 ΔL 分别为 AWG 平板波导有效折射率、罗兰圆聚焦长度、阵列波导的间距、阵列波导的有效折射率、相邻阵列波导长度差, 相应的偏离量分别为 Δn_s 、 ΔR 、 Δd 、 Δn_c 和 $\Delta(\Delta L)$.

1.2 InP AWG 随机误差分析理论基础

在 AWG 器件的制备过程中, 不可避免地存在工艺误差. 传输函数中的波动主要来自于关键参量 R 、 ΔL 、 n_c . 工艺误差对微米量级的 R 和 ΔL 两个参量的影响较小, 而对 n_c 影响较大. 影响有效折射率 n_c 的各分量 (波导宽度、波导芯层厚度、芯区折射率 n_0 、衬底折射率 n_1 和上包层折射率 n_2) 在变化小时 n_c 与这五个量近似线性关系, 其计算采用束传播方法.

在用传输函数法分析系统误差对传输谱的影响时, 只需要在某一个关键参量 R 、 ΔL 、 n_c 上附加一个特定的偏离值 $a(j)$ 即可. 而在分析随机误差时, 因为经过刻蚀后波导的宽度将分布在以理论设计值为中点、以 $2|a|$ 为区间长度的某一特定区间 ($-a$, $+a$) 内, 且该区间内各点取值的可能性是相等的, 所以需要附加的偏离值 $a(j)$ 为满足均匀分布的随机数组. 其关系见式(4). 因为 InP 波导的有效折射率对波长有较强的敏感性, 我们需要首先求出不同波长下各波导结构的有效折射率矩阵, 然后利用差值法结合该矩阵得到不同偏离值 $a(j)$ 下的有效折射率.

$$T = \left| \sum_{j=-M}^M \rho_g^2(j, 0) \times \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} \left[j (n_{c_j}(\omega) + \text{rad}(n_{c_j}(h)) + \text{rad}(n_{c_j}(n_0)) + \text{rad}(n_{c_j}(n_2)) + \text{rad}(n_{c_j}(n_1)) \times (\Delta L_j + \text{rad}(\Delta L_j))) \right] \right\} \right|^2 \quad (4)$$

式中, ΔL 、 ω 、 h 、 n_0 、 n_2 和 n_1 的随机值 $\text{rad}(\Delta L)$,

$\text{rad}(w)$, $\text{rad}(h)$, $\text{rad}(n_0)$, $\text{rad}(n_2)$ 和 $\text{rad}(n_1)$ 的产生采用 Matlab 中的 normrnd 函数,随机值满足正态分布。

2 基于简单传输函数法的误差分析

2.1 InP AWG 系统误差分析

从表 1 中可以看出,设计中能够影响器件传输谱的主要参量有:深脊型波导有效折射率 n_c ,罗兰圆半径 R 和相邻阵列波导长度差 ΔL 。在进行系统误差分析时,只需要在关键参量上附加一特定的偏离值 $a(j)$ 即可。

表 1 InP AWG 的设计参量

n_c	n_s	$\lambda_0/\mu\text{m}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$R/\mu\text{m}$	$\Delta L/\mu\text{m}$
3.187	3.195	1.550 9	1.6	1 727.4	35.524 2

2.1.1 深脊型波导有效折射率 n_c 的偏移对传输谱的影响

图 1 是深脊型波导的折射率分别偏离设计值 $+0.0001$ 和 $+0.001$ 时中心通道传输谱(虚线)与理想设计值下中心通道传输谱(实线)的对比图。

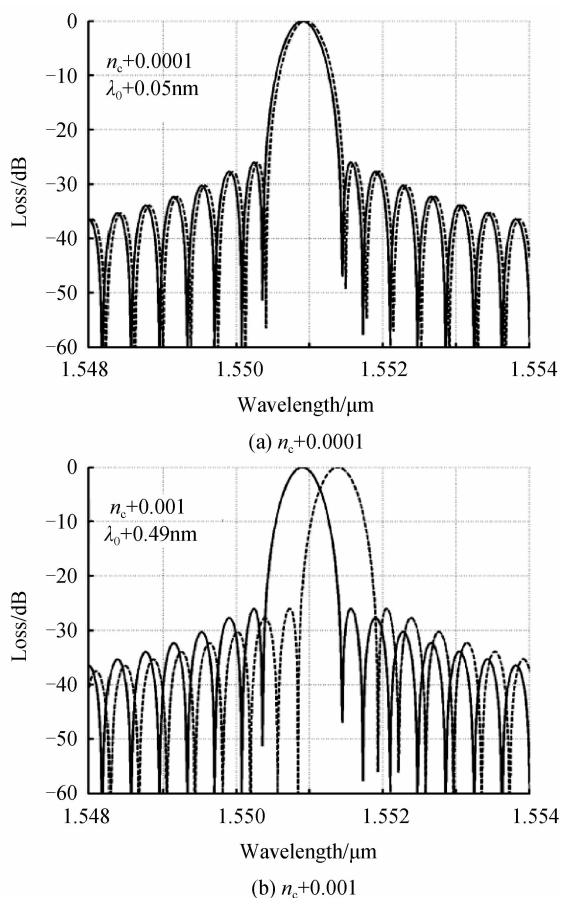


图 1 深脊型波导有效折射率 n_c 对传输谱的影响
Fig. 1 The influence of the effective index of deep ridge waveguide on the transmission spectrum

2.1.2 罗兰圆半径 R 的偏移对传输谱的影响

图 2 是在罗兰圆半径 R 分别偏离设计值 $+50 \mu\text{m}$ 和 $+100 \mu\text{m}$ 时中心通道传输谱(虚线)与理想设计值下中心传输谱(实线)的对比图。

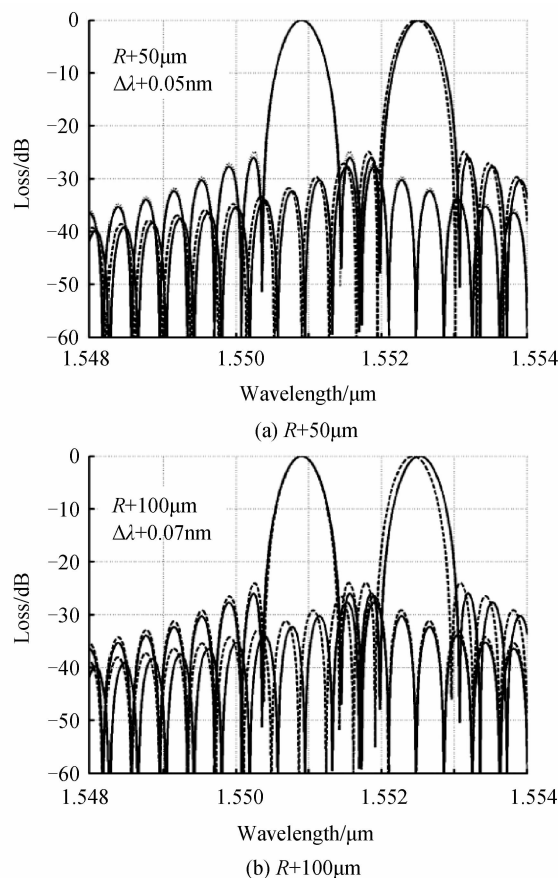


图 2 罗兰圆半径 R 对传输谱的影响
Fig. 2 The influence of the radius of Roland circle on the transmission spectrum

2.1.3 相邻阵列波导长度差 ΔL 的偏移对传输谱的影响

图 3 是在相邻阵列波导长度差 ΔL 分别偏离设计值 $+0.01 \mu\text{m}$ (a) 和 $+0.03 \mu\text{m}$ (b) 时中心通道传输谱线(虚线)与理想设计值下中心传输谱(实线)的对比图。表 2 是深脊型波导有效折射率 n_c 、罗兰圆半径 R 和相邻阵列波导长度差 ΔL 对传输谱的影响。

表 2 深脊型波导有效折射率 n_c 、罗兰圆半径 R 和相邻阵列波导长度差 ΔL 对传输谱的影响

Parameters	λ_0	$\Delta\lambda$
$n_c+0.0001$	$+0.05 \text{ nm}$	—
$n_c+0.001$	$+0.49 \text{ nm}$	—
$\Delta L+0.01 \mu\text{m}$	$+0.44 \text{ nm}$	—
$\Delta L+0.03 \mu\text{m}$	$+1.3 \text{ nm}$	—
$R+50 \mu\text{m}$	—	-0.03 nm
$R+100 \mu\text{m}$	—	-0.07 nm

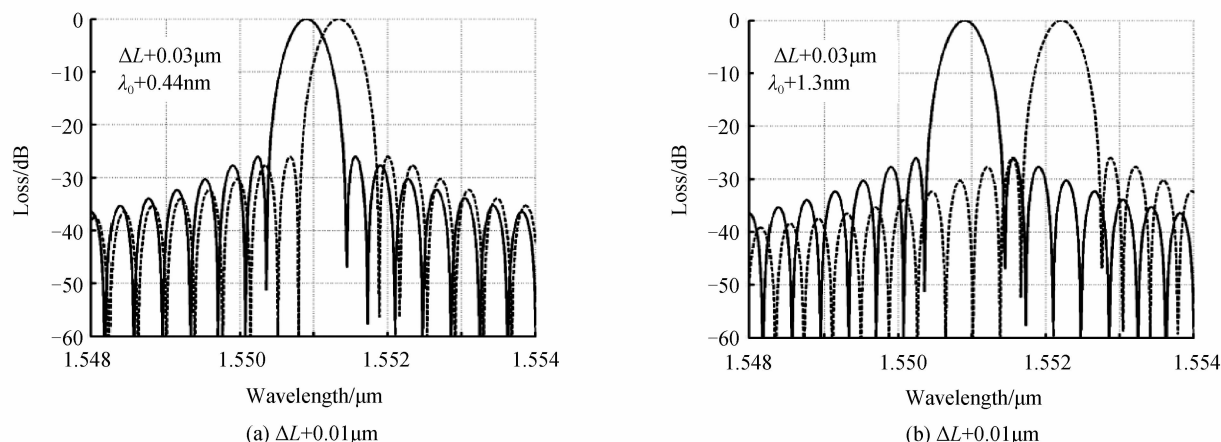
图3 相邻阵列波导长度差 ΔL 对传输谱的影响

Fig. 3 The influence of the length difference of adjacent waveguide on transmission spectrum

2.2 InP AWG 随机误差分析

如图4,当波导宽度波动 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 时串扰约为18 dB,中心通道值下降明显.波动 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 时串扰降到10 dB,中心通道值也下降的厉害.波导宽度变化主

要受光刻、刻蚀时侧面的波动的影响.光刻胶的参量比,显影时间、坚膜温度等都会直接导致胶缩和过刻从而引起刻蚀时波导侧面的波动^[9].在工艺中,已经能控制其波动在 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以内,满足串扰要求.

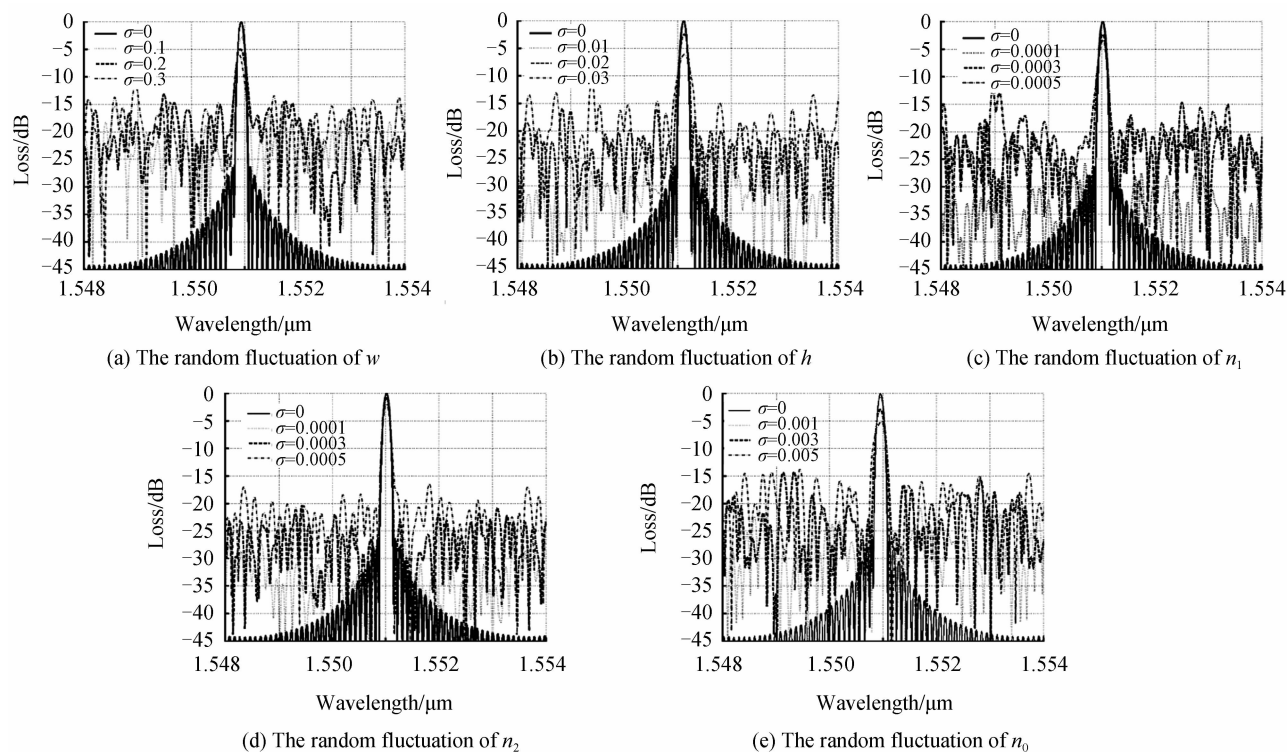


图4 随机误差对传输谱的影响

Fig. 4 The influences of random fluctuation on transmission spectrum

芯层厚度波动 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 时,串扰值约为30 dB,中心通道值略微下降.当芯层厚度波动值为 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 串扰值约为17 dB,中心通道值明显下降,当芯层厚度波动 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 时,串扰值约为8 dB,中心通道值下降的厉害.芯层厚度变化由芯片生长时的膜厚均匀性决定.

在生长材料时片子表面的均匀性、片子平整度、以及有没有应力翘曲、是否与衬底接触良好等因素

都会导致芯层厚度的随机波动.波导芯区的折射率波动在 ± 0.001 时串扰约为25 dB,随着芯区折射率的增大,串扰越来越大,中心通道值也逐渐下降.当衬底折射率波动 ± 0.0001 时,串扰约为30 dB,波动 ± 0.0003 时串扰约为20 dB,中心通道值下降明显.上包层折射率变化的影响和衬底折射率相似,略微影响小点.生长材料时的气氛配比以及材料生长后高温退火都将影响折射率,在具体工艺操作过程

中需要严格控制^[10].

3 结论

通过对系统误差的分析,设计的 $n_c, \Delta L$ 值的波动使得传输谱的中心波长偏移,要使中心波长偏移小于 0.1 nm,其相应偏移量应小于 0.000 2 和 0.002 5 μm ,这一要求是比较苛刻的;毫米量级的 R 与设计值的偏移会使通道间隔改变,但这一设计容差比较大,能满足要求. 随机误差的模拟结果表明,特征参量的波动对传输谱的影响比较严重,要想串扰大于 15 dB,厚度工艺容差需控制在 $\pm 0.03 \mu\text{m}$, InP 芯片芯层厚度由制作片子厂家工艺决定;宽度容差需控制在 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,这个由光刻及刻蚀准确度决定,一般可以满足;波导的低折射率差使得芯区折射率,衬底和上包层折射率的波动对串扰影响很大,芯区折射率波动需控制在 ± 0.003 ,上包层和衬底折射率需控制在 $\pm 0.000 5$,这个准确度比较高.

参考文献

- [1] NAGARAJAN R, JOYNER C H, SCHNEIDER R P, *et al.* Large-scale photonic integrated circuits[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(1): 50-65.
- [2] NAGARAJAN R, KATO M, DOMINIC V G, *et al.* 400 Gbit/s (10 channel \times 40 Gbit/s) DWDM photonic integrated circuits[J]. *Electronics Letters*, 2005, **41**(6): 347-349.
- [3] WELCH D F, KISH F A, NAGARAJAN R, *et al.* The realization of large-scale photonic integrated circuits and the associated impact on fiber-optic communication systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4674-4683.
- [4] PAN Pan, AN Jun-ming, WANG Liang-liang, *et al.* Design and fabrication of an InP arrayed waveguide grating for monolithic PICs[J]. *Journal of Semiconductor*, 2012, **33**(7): 1-4.
- [5] LU Si, YAN Ying-bai, JIN Guo-fan, *et al.* Design of low insertion loss arrayed waveguide grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 769-772.
陆思, 严瑛白, 金国藩, 等. 低插入损耗阵列波导光栅的设计[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 769-772.
- [6] AN Jun-ming, XIA Jun-zhi, LI Jian, *et al.* Numerical analysis for phase error of silica-based arrayed waveguide grating[J]. *Journal of Semiconductor*, 2005, **26**(13): 220-224.
安俊明, 夏君智, 李健, 等. 硅基二氧化硅阵列波导光栅相位误差数值分析[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(13): 220-224.
- [7] ZHAO Lei. Research on arrayed waveguide grating based on SOI nanowire waveguides[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011.
赵雷. 基于 SOI 纳米线阵列波导光栅的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [8] PEASE R F, CHOU S Y. Lithography and other patterning techniques for future electronics [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, **96**(2): 248-270.
- [9] LIU Ying-bin, LIN Lin, CHEN Hong-tai, *et al.* Research of InGaAs/InP materials grown by MOCVD[J]. *Semiconductor Technology*, 2010, **35**(2): 113-115.