

损耗均匀且平顶的蚀刻衍射光栅波长路由器

穆 鸽 何建军

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 光学及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310027

摘要 提出了一种弧形齿面蚀刻衍射光栅波长路由器, 通过合理设计齿面形状, 可以同时提高器件的损耗均匀特性和频谱通带带宽。设计了基于 InP 平台, 中心波长 1550 nm, 通道间隔 400 GHz 的 4×4 波长路由器。仿真结果显示, 各通道之间的损耗差异可由 8.1 dB 减小到 0.8 dB, 频谱响应形状为平顶, 1 dB 带宽由 0.3 nm 增加到 1.6 nm, 并可以通过调整设计参数, 平衡器件的损耗均匀程度、带宽和整体损耗。实验结果显示, 各通道间差异为 3.1 dB, 1 dB 带宽约为 1.1 nm, 器件串扰低于 -12 dB, 验证了该方法的正确性。该方法无需增加器件尺寸或引入额外结构, 可应用于任何材料平台的蚀刻衍射光栅器件。

关键词 光通信; 蚀刻衍射光栅; 波长路由器; 损耗均匀; 平顶型通带; 全光路由

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0606001

Etched Diffraction Grating Wavelength Router with Uniform-Loss and Flat-Passband

Mu Ge He Jianjun

*State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Center for Optical and Electromagnetic Research,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

Abstract An etched diffraction grating wavelength router (EDGR) with arc-shaped grating teeth is proposed, and the loss uniformity and spectral passband of the device can be improved simultaneously with proper design for the shape of the grating teeth. A 4×4 EDGR with 400 GHz channel spacing, centered at 1550 nm and based on InP platform is designed. Simulation results show that the loss difference of all channels is reduced from 8.1 dB to 0.8 dB. The shape of the spectral response is flat-top and the 1 dB bandwidth is increased from 0.3 nm to 1.6 nm. By adjusting the design parameters, the loss uniformity, bandwidth and entire loss of the device can be balanced. Experimental results show that the loss difference of all channels is 3.1 dB and 1 dB bandwidth is 1.1 nm. The crosstalk of the device is better than -12 dB. The validity of this method is verified. This method does not need to increase the chip size or add extra elements, which can be applied to etched diffraction gratings in any material platform.

Key words optical communications; etched diffraction grating; wavelength router; uniform loss; flat-top passband; all-optical routing

OCIS codes 060.1155; 130.3120; 060.1810; 230.3120

1 引 言

随着全球数据量的爆炸式增长, 通信网络和数据中心都需要一种高效率的数据交换机制。全光路由省去了传统光-电-光交换中的光电转换步骤, 除了提高传输速率外, 还具有体积小、功耗低和易于扩展等优点。目前, 国内外已有不少单片集成全光路由器方面的研究, 包括基于光开关^[1]和基于波长路由^[2]的全光路由器。

波长路由型全光路由器中的一个重要器件为 $N \times N$ 波长路由器, 负责用 N 个波长建立 N^2 个光路连接。该器件可用阵列波导光栅(AWG)^[3-4]或蚀刻衍射光栅(EDG)^[5]实现(分别简称为 AWGR 和 EDGR)。相比于

收稿日期: 2016-02-03; **收到修改稿日期:** 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(61535010)、国家 863 计划(2013AA014401)

作者简介: 穆 鸽(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事蚀刻衍射光栅方面的研究。E-mail: muge@zju.edu.cn

导师简介: 何建军(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事集成光电子方面的研究。E-mail: jjhe@zju.edu.cn(通信联系人)

AWG, EDG 为反射型光栅,光路充分利用了自由传播区域(FPR)的空间,所以尺寸较小,同时无需担心阵列波导处的相位误差问题,是作为波长路由器的不错选择。然而和 AWGR 一样,EDGR 也因不同衍射级次拼接具有通道间损耗不均匀的问题,并且由于自由光谱范围(FSR)小、光栅齿面大,损耗不均匀的现象较 AWGR 更明显。

针对 AWGR 损耗不均匀的问题,可以采用设计 FSR 更大的波长路由器并只利用中心通道的方法^[6]来解决,但这样不仅芯片损耗增大,尺寸也会增大;另外损耗均匀性也可以通过调整阵列波导远场模式^[7],在阵列波导间安插辅助结构^[8]或在输出波导末端引入多模干涉器(MMI)结构^[9]来提升,但上述方法均需引入额外结构,增加工艺要求。对于 EDGR,文献[5]中提出了旋转光栅齿面的方法,不仅提高了不同通道之间的损耗差异,还同时实现了平顶的频谱响应^[10],使器件不容易受环境变化的影响,然而此方法设计的器件频谱的顶端略微倾斜。本文在其基础上,提出一种更精确的设计方法解决了这个问题。文章用该方法设计并制作了 4×4 的 EDGR,采用 InP 平台,以便于与其他有源器件集成。

2 基本原理

图 1 为 4 通道 EDGR 的原理示意图,器件应用了罗兰圆结构。光从输入波导入射,在自由衍射区发散,经过光栅齿面反射后,不同波长的光会聚在不同输出波导处。如果光栅的 FSR 为通道数和波长间隔的乘积,则光栅光谱为循环型,对任何输入-输出通道的组合总会存在 N 个波长中的一个可以通光,从而实现波长路由功能。

对于一点法^[11]设计的光栅,每个光栅齿面的中点位置均对中心波长满足干涉加强条件,光栅齿面一般为直线段,齿面上除齿面中点外,其他位置的点均对中心波长存在相差。而如果令齿面上不同位置的点对中心波长附近的波长满足干涉加强条件,即可得到对不同波长响应相似,即频谱通带响应为平顶的光栅。具体地,如图 2 所示,若光栅极点 P 上下各有 N 个齿面,每个齿面上分 K 个离散点,则对光栅第 n 个齿面上第 k 个离散点 $G_{n,k}$,应满足如下方程:

$$|IG_{n,k}| + |OG_{n,k}| - |IP| - |OP| = \frac{nm\lambda_k}{n_{\text{eff},k}}, -N \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K, \quad (1)$$

$$\lambda_k = \lambda_c + \left(\frac{2k-1}{K} - 1 \right) \Delta\lambda_R, \quad (2)$$

式中 I, O 分别为中心输入、输出波导与罗兰圆交点, m 为衍射级次, λ_k 和 $n_{\text{eff},k}$ 为对应的波长及其有效折射率; λ_k 由(2)式决定,其中 λ_c 为中心波长, $\Delta\lambda_R$ 为可调整的平坦波长范围,决定了频谱响应平坦的程度,也即带宽。

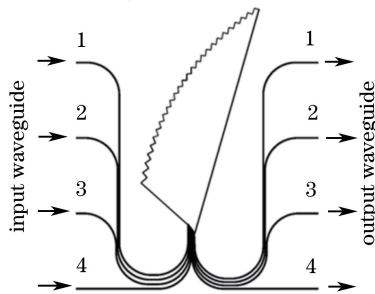


图 1 EDGR 原理示意图

Fig. 1 Schematic of the EDGR

如图 2 中实线所示光栅齿面,经过上述方法计算的光栅齿面为弧面,反射方向相比普通设计的齿面(虚线)有一定偏移。齿面反射方向的偏移致使本应会聚在输出波导的光有所发散,各输出通道的光能量得到平均,因此器件各通道的损耗也更加均匀。如文献[5]中将各光栅齿面按照一定角度旋转也可以得到类似的效果,然而因齿面没有完全按照最佳条件设计,齿面边缘位置(对应于边缘波长)的能量较低,导致光谱顶端倾斜。

3 模拟仿真

所使用的晶圆结构为 InP 衬底上依次生长 1.5 μm InP 缓冲层, 0.35 μm InGaAsP 芯层, 1.65 μm InP 上

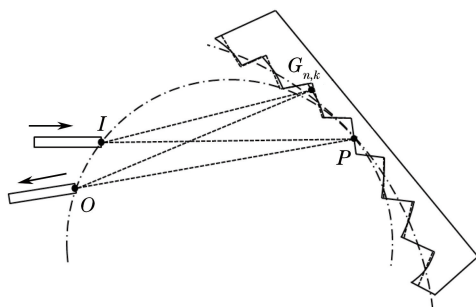


图 2 损耗均匀且频谱响应平坦的 EDGR

Fig. 2 EDGR with flat-passband and uniform loss

包层。所设计器件含 4 个输入和输出通道,通道间隔 400 GHz,中心波长 1550 nm,输入输出波导宽度为 2 μm ,其他的设计参数如表 1 所示。光栅的透射谱根据基尔霍夫衍射原理^[12]仿真得出,普通设计(虚线)和按本方法优化设计(实线)的频谱如图 3 所示,后者的光栅齿面均根据(1)式和(2)式计算得出,式中 $\Delta\lambda_R$ 取 1.2 nm,图 3 中标注的 $i-j$ 表示 i 通道输入, j 通道输出的光谱。

表 1 EDGR 设计参数

Table 1 Design parameters of EDGR

Design parameter	Numerical value
Slab index	3.242
FSR /nm	12.8
Diffraction order	107
Rowland circle radius / μm	1400
Input angle /($^\circ$)	43
Output angle /($^\circ$)	41
Grating period/ μm	37.9

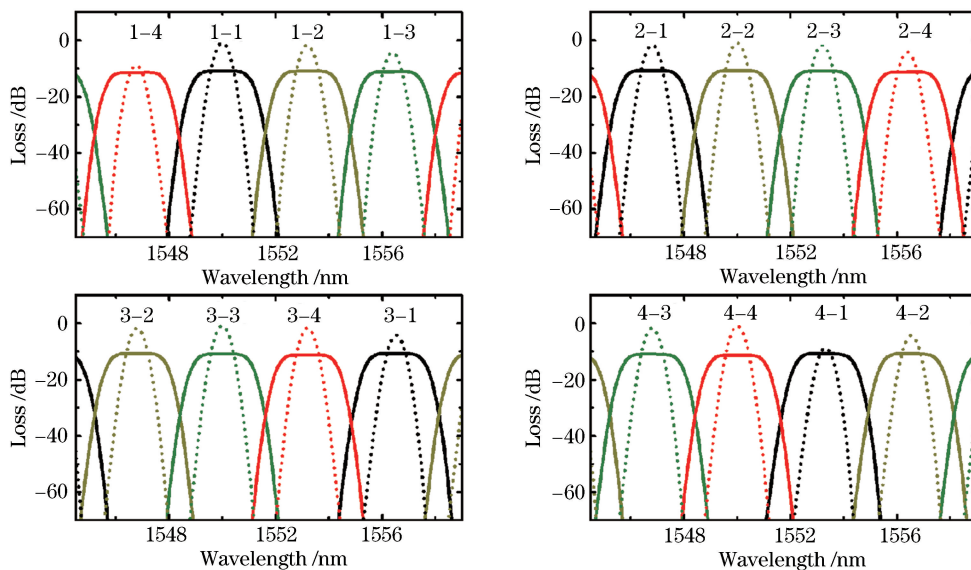


图 3 EDGR 频谱响应仿真结果

Fig. 3 Simulation results of EDGR spectral response

从图 3 中可以看出,本方法设计的 EDGR 的光谱具有很好的平坦化效果,1 dB 带宽由普通设计中的 0.3 nm 增加到 1.6 nm,同时损耗不均匀性由 8.1 dB 减小到 0.8 dB;相比于普通设计损耗最大的 1 输入至 4 输出通道,该方法将带宽增大 5 倍时仅仅引入了 1.9 dB 的额外损耗。当(2)式中的 $\Delta\lambda_R$ 取值不同时,得到的频谱特性有所差异。图 4 给出了 $\Delta\lambda_R$ 分别取 0.8、1.0、1.2、1.4 nm 时,通道 2 输入到通道 2 输出的 EDGR 透射谱。图 5 给出了 $\Delta\lambda_R$ 取上述值时,器件各通道损耗差异、平均 1 dB 带宽和平均损耗的变化。可见选择较大的

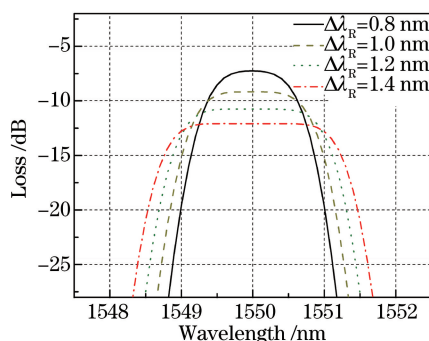


图 4 仿真所得不同 $\Delta\lambda_R$ 下的光谱

Fig. 4 Spectra with different $\Delta\lambda_R$ in simulation

$\Delta\lambda_R$,可以得到平坦化程度更好的频谱和更低的通道间损耗差异,然而器件的整体损耗也会变大。设计时可以根据实际情况调整 $\Delta\lambda_R$ 的取值。

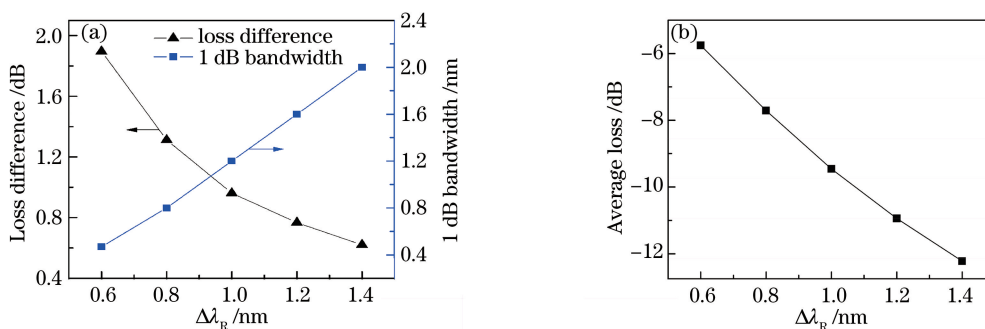


图 5 $\Delta\lambda_R$ 不同时(a)光栅各通道损耗最大差异值和 1 dB 带宽; (b) 器件各通道平均损耗的仿真结果

Fig. 5 Simulated results of (a) maximum loss difference of grating's different channels and 1 dB bandwidth; (b) average loss of device's different channels with different $\Delta\lambda_R$

4 实验结果

器件制作流程如下:首先在 InP 上包层上沉积 $1\ \mu\text{m}$ 厚的二氧化硅作为硬掩模,接着进行增粘处理并旋涂 AZ5214 光刻胶,进行接触式光刻。显影后使用感应等离子耦合刻蚀机(ICP)将掩模图形转移至二氧化硅上,继而转移到 InP 上。光栅齿面和波导均深刻蚀至 $3.5\ \mu\text{m}$,随后使用氢氟酸缓冲液去除二氧化硅掩模,完成制作。为简化实验,光栅齿面没有镀反射膜,这将导致光栅反射面处有额外的 5.5 dB 反射损耗。图 6 为制作完成后器件扫描电镜(SEM)图片。

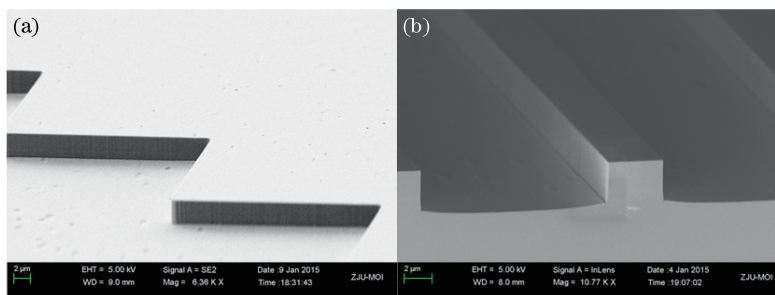


图 6 器件扫描电镜图片。(a) 光栅齿面; (b) 波导截面

Fig. 6 SEM pictures of the device. (a) Grating teeth; (b) waveguide section

测试系统中,光源采用可调谐激光器(Agilent 81600B),使用透镜光纤将光耦合入光栅输入波导,用另一根透镜光纤将从输出波导出射的光接收,接入探测器,入射光为 TE 偏振。普通设计和本方法改进设计的测试结果如图 7 所示,图中的光谱已经减去作为参照的直波导损耗。由图可见,各通道的频谱与仿真结果相

似,损耗均匀和频谱平顶效果显著。与文献[5]中的结果相比,频谱顶端倾斜的情况略有提升,但由于掩模精度有限,而按照本方法设计的掩模与文献[5]中掩模的差异较小,这一性能提升并不明显。大多数通道频谱并没有仿真结果一般平坦,这可以归结为两方面原因,一是制作光栅时产生的光栅齿面圆角效应减弱了通道边缘波长的干涉加强效应;二是两个光栅齿面之间的衔接面挡住了部分应照射在齿面边缘的光。

图 7(b)中器件各通道的损耗从 13.7 dB 到 16.8 dB 间不等,其中包含了 5.5 dB 光栅反射面的损耗,通道间串扰在 -12 dB 以上。器件改进后各通道之间损耗差异为 3.1 dB,比普通设计的损耗差异 10.3 dB 降低了 7.2 dB,改进后器件平均带宽为 1.1 nm,为普通设计平均带宽 0.3 nm 的 4 倍。通道间损耗差异的实验结果与仿真存在一定距离,这是工艺制作误差和测试误差导致的。可以从光谱中看到除去主峰外还有很多低矮的衍射峰,测量结果显示这些峰与 TM 光入射时的主衍射峰重合,这一方面是由于器件刻蚀质量不够好,导致入射的 TE 光在器件内部转换为 TM 光,另一方面 TE 入射光也有部分没有滤去的 TM 光。通过提高工艺水平,可以将串扰和损耗降到更低。

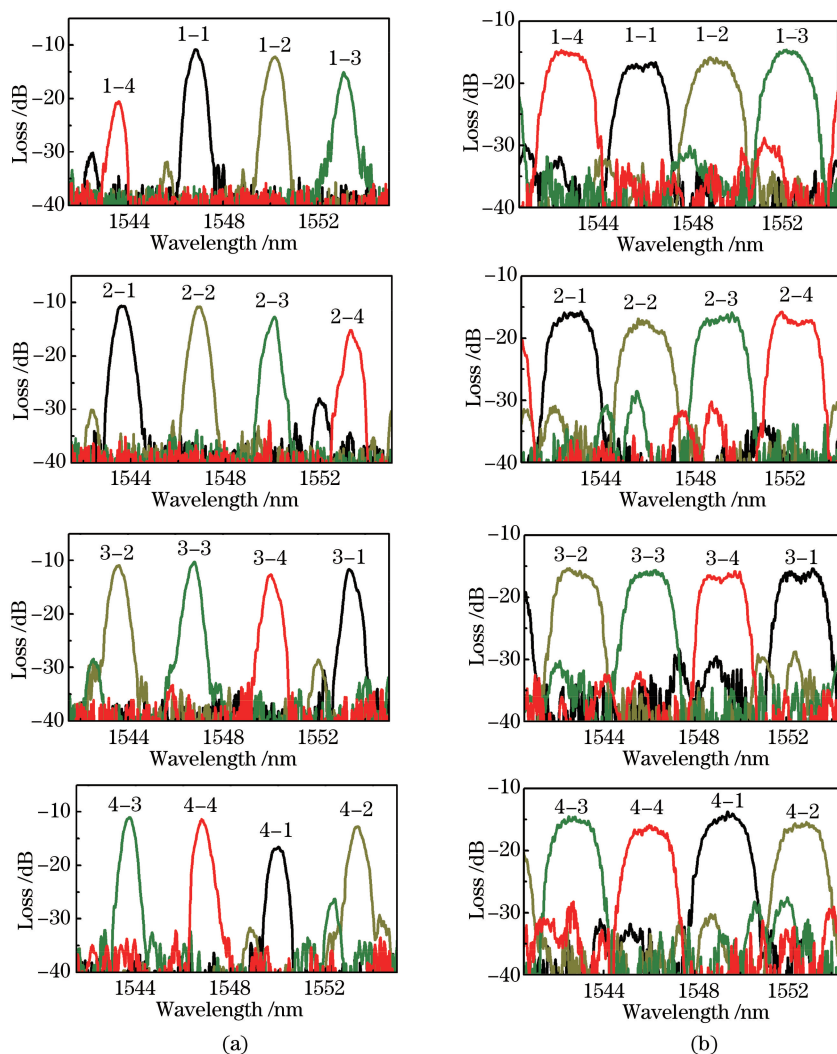


图 7 所有 4 个输入通道对应的输出光谱。(a) 普通设计; (b) 改进设计

Fig. 7 Corresponding output spectra from all 4 input channels. (a) Conventional design; (b) improved design

5 结 论

提出了一种弧形齿面的光栅结构,可以在实现 EDGR 损耗均匀的同时使其频谱形状为平顶,无需引入额外结构或增加器件尺寸。仿真结果显示该方法可将器件各通道间损耗差异由 8.1 dB 降低至 0.8 dB,1 dB 带宽从 0.3 nm 增加到 1.6 nm,弥补了文献[5]中方法频谱顶端倾斜的不足,并可以在设计时合理选择参数以满足不同的设计需求。实验结果验证了该设计方法,测得器件各通道间的损耗为 13.7 dB 到 16.8 dB 不

等,最大差异 3.1 dB,串扰低于-12 dB。该方法不仅可以应用于 EDGR,也可用于任何材料的 EDG 设计。

参 考 文 献

- 1 Chen Qiaoshan, Yang Lin. Optical routers for photonic networks-on-chip[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110005.
陈乔杉, 杨 林. 用于片上光网络的光学路由器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110005.
- 2 S C Nicholes, M Mashanovitch, B Jevremović, *et al.*. 8-channel InP monolithic tunable optical router for packet forwarding[C]. *IEEE National Fiber Optic Engineers Conference on Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2011: 1-3.
- 3 C Dragone. An $N \times N$ optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(9): 812-815.
- 4 J Wang, Z Sheng, L Li, *et al.*. Low-loss and low-crosstalk 8×8 silicon nanowire AWG routers fabricated with CMOS technology[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9395-9403.
- 5 G Mu, P Huang, L Wu, *et al.*. Facet-rotated echelle grating for cyclic wavelength router with uniform loss and flat passband[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(17): 3978-3981.
- 6 K Takiguchi, K Okamoto, A Sugita. Arrayed-waveguide grating with uniform loss properties over the entire range of wavelength channels[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 459-461.
- 7 Y Sakamaki, S Kamei, T Hashimoto, *et al.*. Loss uniformity improvement of arrayed-waveguide grating with mode-field converters designed by wavefront matching method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(24): 5710-5715.
- 8 J C Chen, C Dragone. Waveguide grating routers with greater channel uniformity[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(23): 1951-1952.
- 9 H C Lu, W S Wang. Cyclic arrayed waveguide grating devices with flat-top passband and uniform spectral response[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(1) : 3-5.
- 10 Song Jun, He Sailing, Shi Zhimin. Optimal design for an etched diffraction grating for obtaining a flat-top spectral response[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 550-554.
宋 军, 何赛灵, 石志敏. 平顶型蚀刻衍射光栅波分复用器优化设计[J]. *光子学报*, 2003, 32(5): 550-554.
- 11 Sheng Zhongyan, He Sailing, He Jianjun. 1-Stigma and 2-Stigma method for the design of etched diffraction grating[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2001, 12(7): 671-674.
盛钟延, 何赛灵, 何建军. 蚀刻衍射光栅设计的一点法与二点法[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(7): 671-674.
- 12 Sheng Zhongyan, Lou Lifang, He Sailing, *et al.*. Simulation for an etched diffraction grating (EDG) of wide angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 546-549.
盛钟延, 娄丽芳, 何赛灵, 等. 大角度蚀刻衍射光栅的模拟[J]. *光子学报*, 2003, 32(5): 546-549.