

复合型金属网栅耦合输出镜

孔维鹏^{1,2}, 王 度^{1,2}, 郭 超³, 陈 晨³, 李贻宇^{1,2}, 罗振飞^{1,2}, 周 逊^{1,2*}

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 成都 610041;

2. 中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621900;

3. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:复合型金属网栅耦合输出镜是大功率光泵 THz 激光器的关键元器件之一,对激光器的输出功率和光束质量至关重要. 研究完善了复合型金属网栅耦合输出镜的理论模型,提出反射率、透射率和损耗的计算和评估方法. 设计并制作出 2.52 THz 波段,反射率透射率为(70%/11%)和(87%/4%)的两种耦合输出镜,对 CO₂ 泵浦激光的反射率达 95% 以上. 为大功率光泵 THz 激光器的开发提供了理论和技术支持.

关键词:太赫兹激光;复合型耦合输出镜;金属网栅;CO₂ 激光泵浦

中图分类号:TN248.2; TN214 **文献标识码:**A

A theoretical investigation and experiment of hybrid metal-mesh output coupler

KONG Wei-Peng^{1,2}, WANG Du^{1,2}, GUO Chao³, CHEN Chen³, LI Ze-Yu^{1,2},

LUO Zhen-Fei^{1,2}, ZHOU Xun^{1,2*}

(1. Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610041, China;

2. Terahertz Research Center, Chinese Academy Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China;

3. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: As one of the key components of high-power optically pumped THz laser, hybrid metal-mesh output coupler is critical for the output power and the beam quality. A model for the hybrid metal-mesh output coupler has been developed. The reflectance, transmittance and loss of the coupler was evaluated. Output couplers at 2.52 THz have been fabricated. The reflectance and transmittance are 70% and 11% for type I, 87% and 4% for type II. The coupler can sustain high-power CO₂ laser pump with the reflectivity over 95%. This research provides theoretical and technical supports for developing high-power optically pumped THz laser.

Key words: THz laser, Hybrid output coupler, metal-mesh, CO₂ laser pump

PACS: 78.20.Bh; 42.70.Ce; 42.72.Ai; 42.79.Wc

引言

光泵 THz 激光器(OPTL)是公认的较为成熟和易于推广的 THz 辐射源之一. 它以 CO₂ 激光泵浦充有气体工作物质的低气压腔(如 CH₃OH, CH₂F₂, HCOOH 等),产生的 THz 辐射可覆盖几乎所有 THz 波段. 对比其他 THz 源,OPTL 具有输出功率稳定、光束质量好、平均功率高等优点. 在磁约束核聚变等

离子体诊断、医疗检测、生物成像、卫星探测、军事雷达等方面都有重要的科研价值. 对于大多数应用,光束质量和输出功率同等重要. 在 OPTL 中,耦合输出镜是关系光束质量和输出功率的关键元器件之一,对比小孔式耦合输出镜,复合型金属网栅耦合输出镜(HMOC)不仅可以确保对整个波导区域实现均匀的反射和透射,而且可以减小输出 THz 光束的远场发散角,确保高斯形状,避免衍射,最大程度的提高

收稿日期:2014-09-26,修回日期:2015-06-27

基金项目:中国工程物理研究院发展基金项目(TH2012-020508)

Foundation items: Supported by Development Foundation of Chinese Academy Engineering Physics (TH2012-020508)

作者简介(Biography):孔维鹏(1983-),男,河北省邯郸市人,助理研究员,博士,主要研究领域为固体激光器,THz 技术及应用. E-mail: kongweipeng229@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zcm_zky@sohu.com

Received date: 2014-09-26, revised date: 2015-06-27

光束质量. 复合型设计, 一方面, 红外介质膜确保了大功率 CO₂ 泵浦光的高反射率; 另一方面, 改变金属网栅的结构可以直接调节输出镜的反、透射率, 优化激光器实现高功率 THz 输出. 自从 1967 年 Ulrich 提出独立金属网栅的传输线理论后^[1], 网栅的模型和参数不断得到改进, 在远红外高频和低频波段已经可以比较准确的预测其光学特性. 1976 年 Wolfe 等人将独立网栅与衬底材料相结合, 完成了激光器的输出镜和封闭窗口的一体化^[2]. 但直到 1992 年, Densing 等人才提出并制备了 HMOC, 实现了在大功率 OPTL 中的应用, 进一步提高了 CO₂ 激光的泵浦效率^[3]. HMOC 的结构和制作工艺非常复杂, 多道工序引入的损耗在很大程度上扰乱了模拟结果. 大部分研究只关注 HMOC 的透射率, 作为耦合输出镜重要参数的反射率和总损耗还没有较为系统的理论计算和评测手段. 国内方面, 为数不多的 OPTL 研究基本采用简单的小孔输出镜和非复合输出镜^[4-6], HMOC 的理论^[7]和实验上的研究更为欠缺. 针对 OPTL 的关键技术单元 HMOC, 完善了理论模型, 特别是对反射率和总损耗进行了准确计算, 为器件的光学特性提出了评测方法; 实验上制备出可以用于大功率 CO₂ 激光泵浦的 2.52 THz 激光器的耦合输出镜, 为大功率 OPTL 的开发应用提供理论和技术支持.

1 HMOC 的理论研究

复合型金属网栅耦合输出镜的结构如图 1 所示. 复合型结构由下到上分别为衬底、红外介质膜和金属网栅. 衬底可以采用对 THz 吸收较小的高阻硅或沿 c 轴切割的石英晶体; 红外介质膜的材料为 Ge/CaF₂ 或者 Ge/ZnS. 金属网栅有电容和电感两种类型, 通常采用易于加工的电容型网栅(图 1 中的结构为电容型, 电感型可视为其结构互补), 材料为 Au, Ag, Al, Cu, Pt 等金属. 网栅的周期性结构用参数 a 和 g 来表示, 其中 $2a$ 为网栅线宽, g 为网栅周期. 网栅的厚度远远大于金属的趋肤深度, 但是远远小于网栅线宽、红外介质膜的厚度和 THz 的波长 λ .

独立金属网栅, 如果满足条件 $g/\lambda < 1$, 只存在零级反射和透射, 并没有衍射. $g/\lambda \rightarrow 0$, 反射率 $R \rightarrow 1$, 透射率 $T \rightarrow 0$, 这就是网栅结构对反射率和透射率的控制原理. 对于 $g/\lambda \leq 0.7$, 独立网栅的反射率可表示为^[2]: $R = 1 - T = 1/(1 + Z_0^2 \Omega^2)$, 其中广义频率 $\Omega = g/\lambda - \lambda/g$, 阻抗 $Z_0 = [2 \ln \csc(\pi a/g)]^{-1}$. 红外介质膜的厚度远远小于 λ , 理想情况下, 可以忽略

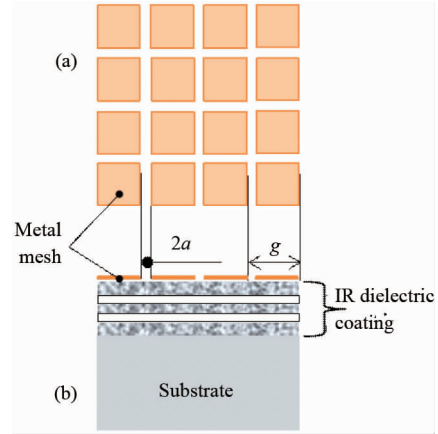


图 1 复合型金属网栅耦合输出镜示意图, (a) 俯视图和 (b) 侧视图

Fig. 1 Schematic of hybrid metal-mesh output coupler, (a) top- and (b) side-view

其对反射和透射的影响. 衬底的厚度在毫米量级, 且由于第二面的存在, HMOC 具有 F-P 标准具效应, 反射和透射率都会被调制. 参考平行平板多光束干涉原理的计算方法, 我们可推导出 HMOC 的透射率公式^[8]:

$$T_{oc} = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\phi + \delta_R/2)} \quad (1)$$

其中 T_1 和 R_1 为考虑衬底折射率时金属网栅的透射率, $T_1 = 1 - R_1 = nT/(R + [(1+n)/2]^2 T)$; T_2 和 R_2 是衬底第二面的反射和透射率, $T_2 = 1 - R_2 = 4n/(1+n)^2$, n 为衬底材料的折射率; $\phi = 2\pi nt/\lambda$ 为衬底厚度形成的相位差; $\delta_R = \pi - \arctan(Z_0 \Omega/(1 + R_1))$ 为网栅反射引起的相位差, 其中电阻 $R_l = \eta/2 (c/\lambda \sigma)^{1/2}$, $\eta = 1/(1 - 2a/g)$, 常数 c 、 σ 分别为光速和金属电导率. 在公式(1)的基础上, 我们引入衬底材料的吸收损耗参数 $F = \exp(-\alpha t)$, 其中 α 为材料吸收系数, t 为材料厚度. 理想情况下, 高反膜的厚度非常小, 吸收损耗可以忽略不计, F 则只与衬底的材料和厚度有关. 重新书写 HMOC 的透射率为:

$$T_{oc} = \frac{T_1 T_2 F}{(1 - F \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\phi + \delta_R/2)} \quad (2)$$

相应的反射率也 R_{oc} 可以借助平行板的分析方法得出:

$$R_{oc} = \frac{1 - F \sqrt{R_1 R_2}}{(1 - F \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4F \sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\phi + \delta_R/2)} \{ R_1 + R_2 T_1^2 F^2 + R_2 R_1 R_1' F^2 + 2T_1 \sqrt{R_2 R_1} F \cos(2\phi + 2\delta_T - \delta_R) - 2R_2 T_1 \sqrt{R_1 R_1'} F^2 \cos(2\delta_T - 2\delta_R) - 2R_1 \sqrt{R_2 R_1'} F \cos(2\phi + \delta_R) \} \quad (3)$$

其中 $\delta_T = \arctan\{Z_0\Omega/(R_l(1+R_l) + Z_0^2\Omega^2)\}$ 为网栅透射引起的相位差, R'_l 为金属网栅在介质内侧的反射率. 利用公式(2)和(3), 相应的总损耗可以表示为:

$$A = 1 - R_{oc} - T_{oc} \quad (4)$$

由 T_1 的表达式可分析得出, g 和 g/a 决定了透过率 T_{oc} 的变化趋势和平坦度, 鉴于本文针对 2.52 THz 设计, 只需在 2.52 THz 附近使得 T_{oc} 趋于较小值, 宽带平坦度并没有太高要求. 图 2 是 R_{oc} , T_{oc} 和 A 的计算值在 2.52 THz 附近的变化曲线, 其中 $n = 2.11$, $\alpha = 1.2 \text{ cm}^{-1}$, $\sigma = 1.49 \times 10^7 \text{ s/m}$. 从图中可以看出, 由于标准具效应, 反射和透射都被剧烈的调制. 衬底材料对 THz 的吸收, 是引起损耗的原因. 对于固定的周期参数 g , 越密集的网栅 (a 值较小), 反射率越高, 从而减少了透射进入衬底所引起的材料吸收损耗, 相应的调制深度也较小.

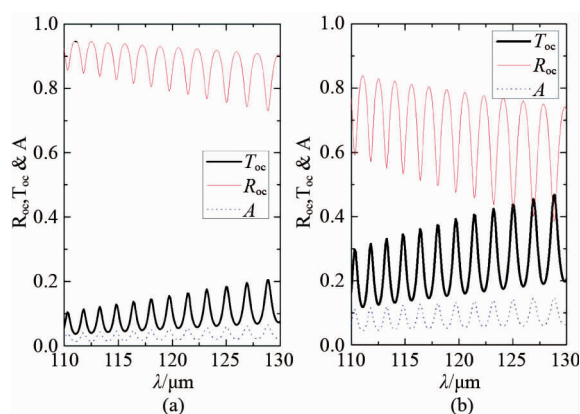


图 2 反射率 R_{oc} , 透射率 T_{oc} 和损耗 A 的计算值随波长 λ 的变化曲线: (a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$, $\alpha = 1.2 \text{ cm}^{-1}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$, $\alpha = 1.2 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 2 Calculated reflectance R_{oc} , transmittance T_{oc} and loss A as a function of wavelength λ . (a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$, $\alpha = 1.2 \text{ cm}^{-1}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$, $\alpha = 1.2 \text{ cm}^{-1}$

2 实验制备和性能

为了方便在 OPTL 中的应用, 我们希望 HMOC 既能作为输出镜, 又能充当 OPTL 的低压气体腔窗口. 因此, 选用的基底材料为直径 36 mm 沿 c 轴切割的石英晶体片, 考虑到需要承受 1 个大气压强, 厚度设计为 2 mm 左右. 2.52 THz (118.8 μm) 波段, 文献[9]中石英晶体材料的吸收系数为 $\alpha \approx 1.2 \text{ cm}^{-1}$, 我们用傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR) 验证了当 $\lambda > 100 \mu\text{m}$, $\alpha \leq 1.2 \text{ cm}^{-1}$. 通过对公式(1)的修改, 石英基片的平均透射率可表示为:

$$T_{av} = \frac{T_1 T_2 F}{1 - F^2 R_1 R_2} \quad (5)$$

其中 $T_1 = T_2$, $R_1 = R_2$ 分别是石英基片双面的反射和透射率. 根据公式(5), 计算出在 2.52 THz 石英基片的平均透过率为 60.5%, 与使用 FTIR 的实验结果基本符合. 红外介质膜方面, 考虑到材料对 THz 的吸收率和防潮特性, 我们选用 Ge/ZnS 的 9 层膜, 总厚度约为 10 μm , 测试镀膜在 9 ~ 11 μm 波段的反射率大于 95%. 无冷却条件下, 镀有高反膜的石英基底可承受约 10 W 的 CO_2 泵浦激光; 有水冷的情况下, 保守估计 HMOC 可承受不小于 150 W 的泵浦激光. 实际测试中, 受限于激光器功率, 用 50 W 泵浦光在无水冷下进行了 30 分钟测试, 并未出现发烫现象.

利用光刻工艺将电容性网栅结构以光刻胶的形式覆盖在红外介质膜表面, 继而使用磁控溅射的方法将 Au 沉积上去, 最后通过去胶和清洗, 留下如图 3 所示的完整的电容性网栅结构: (a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$. 红外介质膜表面大部分被 Au 覆盖, Au 层不但可以保护下层介质膜, 还可以进一步提高泵浦光的反射率. Au 层的厚度控制在 300 nm 以上, 远大于 2.52 THz 波段光的趋肤深度 (约 50 nm).

事实上, 在制备 HMOC 的过程中, 由于镀膜工艺的局限性, 红外介质膜的表面质量和密实性并不可能非常好, 存在吸收和散射等不可估计的损耗. 而且介质膜表面质量还会影响磁控溅射后 Au 的表面质量. 为了便于估计 HMOC 的性能, 我们将红外介质膜的各种损耗一并在参数 F 内进行计算, 具体的吸收率可利用 FTIR 测出镀有红外介质膜的衬底透射率结合公式(5)进行估算. 图 4 是 $g/a = 76 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 和 $g/a = 76 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$ 两种 HMOC 的反射率 R_{oc} , 透射率 T_{oc} 和 A 损耗的计算值, 虚线是 T_{oc} 的测量值. FTIR 的分辨率仅为 1 cm^{-1} , 并没有反应出 T_{oc} 的调制曲线. 从图中可以看出, 由于损耗的增大, 调制幅度比图 2 明显减小, 透射率明显下降; 平均反射率却没有明显变化, 这对需要高反射率的耦合输出镜是有利的. 为了进一步验证计算结果, 我们用 OPTL 激光器在 2.52 THz 对反射率和透射率进行测量, 几片样品的反射率和透射率均落在计算出的调制范围之内, 第一类样品 ($g/a = 76 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$, 3 枚) 的平均反射率为 70%, 平均透射率为 11%; 第二类样品 ($g/a = 76 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$, 2 枚) 的平均反射率为 87%, 平均透射率为 4.2%. 若需改变透射率, 可调

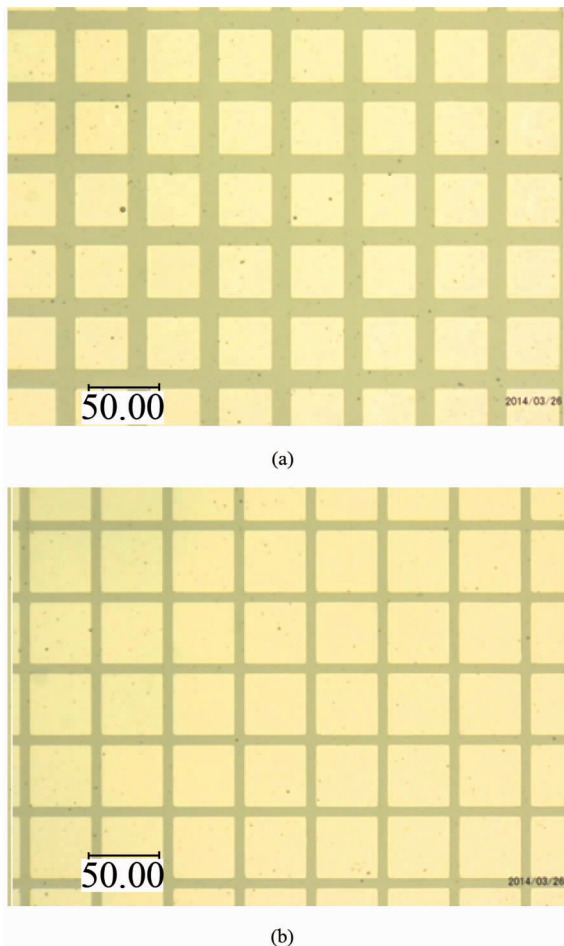


图3 500倍显微镜下HMOC的图像:(a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$

Fig. 3 The pictures of HMOC under 500X electron microscope: (a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$

节网栅线宽,计算表明: $a = 5 \sim 10 \mu\text{m}$ 对应平均透射率为 $T_{oc} = 4.2 \sim 11 \%$ 。

3 结语

针对OPTL的关键技术单元,对HMOC的理论和实验制备做了深入研究.理论上完善了HMOC的反射,透射和总体损耗的计算和评估方法.实验制备出平均反,透射率为(70%, 11%)和(87%, 4%)的两种耦合输出镜,与计算结果一致.分析表明,F-P标准具效应引起的调制在很大程度上影响了反射率和透射率的精准估值;衬底材料的吸收损耗不可避免,红外介质膜的吸收和散射则是额外损耗的主要来源.今后的工作中,可采用小角度的楔形^[7]衬底来抑制标准具效应;进一步改进红外镀膜工艺,降低THz的损耗,将文中所述的两种输出镜的平均损耗控制在9%和5%以下。

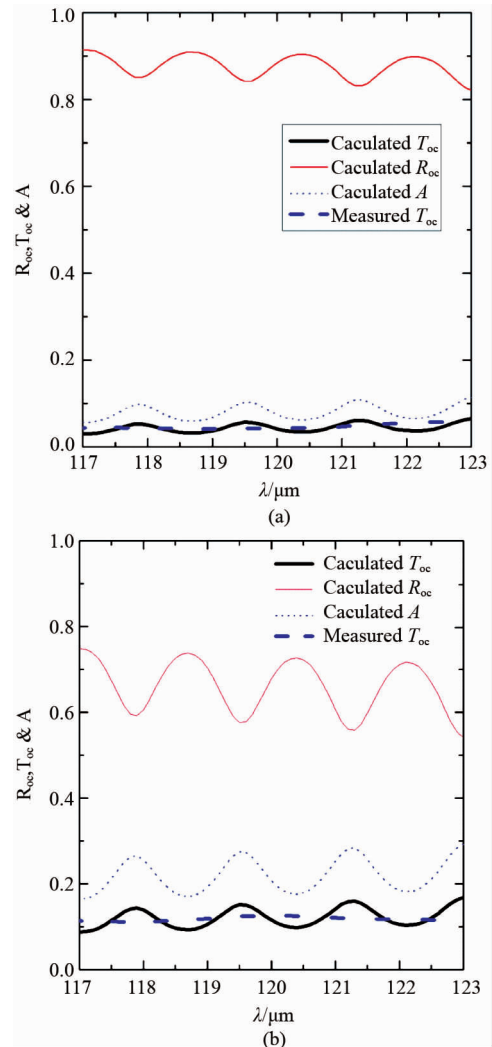


图4 反射率 R_{oc} 、透射率 T_{oc} 和损耗 A 的计算值随波长的变化曲线.虚线是 T_{oc} 的测量值. (a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$, $\alpha = 4.6 \text{ cm}^{-1}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$, $\alpha = 4.6 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 4 Calculated reflectance R_{oc} , transmittance T_{oc} and loss A as a function of wavelength λ . The dash line is measured T_{oc} . (a) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 10 \mu\text{m}$, $\alpha = 4.6 \text{ cm}^{-1}$; (b) $g = 76 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$, $\alpha = 4.6 \text{ cm}^{-1}$

References

- [1] Ulrich R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure [J]. *Infrared Physics*, 1967, 7: 37–55.
- [2] Wolfe S M, Button K J, Waldman J, et al. Modulated submillimeter laser interferometer system for plasma density measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1976, 15(11): 2645–2648.
- [3] Densing R, Ersting A, Gogolewski M, et al. Effective far infrared laser operation with mesh couplers [J]. *Infrared Phys*, 1992, 33(3): 219–226.
- [4] SUN Yu-De, FU Shi-You, WANG Jing, et al. Optically pumped terahertz lasers with high pulse repetition frequency: theory and design [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009; 7(2), 127–129.
- [5] QI Chun-Chao, ZUO Du-Luo, LU Yan-Zhao, et al. An effi-

cient photon conversion efficiency ammonia terahertz cavity laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009; **26**(6), 0642011 – 0642014.

[6] JIU Zhi-Xian, ZUO Du-Luo, MIAO Liang, *et al.* An efficient pulsed CH₃OH terahertz laser pumped by a TEA CO₂ laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010; **27**(2): 0242111 – 0242113.

[7] QI Chun-Chao, ZUO Du-Luo, MENG Fan-Qi, *et al.* Theo-

retical design of a wedged output coupler coated by capacitive strip-grating for optically pumped terahertz lasers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010; **27**(4), 0442051 – 0442054.

[8] Born M and Wolf E. *Principles of Optics* [M]. New York: Pergamon Press. 1959; 322 – 324.

[9] Loewenstein E V, Smith D R, Morgan R L. Optical constants of far infrared materials 2: crystalline solids [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(2): 398 – 406.

(上接 587 页)

模传播的路径长于准 TM 模有关. 波长为 1.55 μm 时准 TE 和准 TM 模的插入损耗分别为 0.395 和 0.699 dB.

图 8 是两偏振光在偏振分束器中的传播情况, 相关参数如下: $W_1 = 2 \mu\text{m}$, $\eta = 0.8$, $W_2 = 1.3 \mu\text{m}$, $L_1 = 31 \mu\text{m}$, $L_2 = 11 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 准 TM 模在 MMI1 波导中经过干涉, 大部分能量从端口 C 输出; 而准 TE 模经过 MMI1 和 MMI2 两个耦合器的传输最终从端口 B 输出. 可见, 该器件有效地实现了偏振束分离.

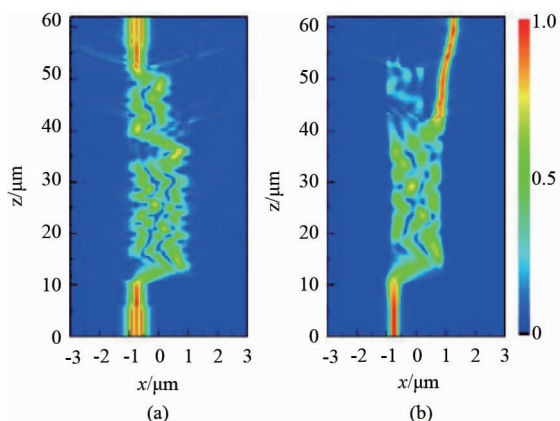


图 8 光场在偏振分束器中的传输情况: (a) 准 TE 模; (b) 准 TM 模

Fig. 8 The field evolution along the propagation distance through the designed PS: (a) quasi-TE mode and (b) quasi-TM mode

3 结论

基于槽波导结构, 提出了一种级联 MMI 耦合器型偏振分束器方案. 利用三维全矢量束传播法对关键参数进行了优化, 获得 MMI 工作区总长度为 42 μm; 准 TE 和准 TM 模的偏振消光比分别为 29.8 和 31.4 dB, 1.55 μm 波长下的插入损耗分别为 0.395 和 0.699 dB, 消光比大于 20 dB 时光带宽为 43 nm, 覆盖整个 C 波段; 最后详细分析了器件结构参数的制造容差, 为器件的研制提供参考. 本文提出的偏振分束器具有良好的偏振分离性能, 并且兼具结构紧凑, 偏振消光比高, 插入损耗小等优点, 有望在 SOI

光子集成光路的偏振控制中得到应用.

References

- [1] BARWICZ T, WATTS M R, POPOVIC M A, *et al.* Polarization-transparent microphotonic devices in the strong confinement limit [J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(1): 57 – 60.
- [2] ZHANG J, YU M, LO G, *et al.* Silicon-waveguide-based mode evolution polarization rotator [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, **16**(1): 53 – 60.
- [3] JIN L, CHEN Q, WEN L. Mode-coupling polarization rotator based on plasmonic waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2014, **39**(9): 2798 – 2801.
- [4] MA Y, HUANG D. A compact silicon-on-insulator MMI-based polarization splitter: 2007 *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, OMENS*, 2007 [C]. 121 – 122.
- [5] HONG J M, RYU H H, PARK S R, *et al.* Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 72 – 74.
- [6] CHHEQNG V, LEE T, OH G, *et al.* Compact polarizing beam splitter based on a metal-insulator-metal inserted into multimode interference coupler [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(18): 20880 – 20887.
- [7] GUAN X, WU H, SHI Y, *et al.* Extremely small polarization beam splitter based on a multimode interference coupler with a silicon hybrid plasmonic waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2014, **39**(2): 259 – 262.
- [8] ZHOU Fei, FEI Hong-Ming, YANG Yi-Biao, *et al.* Polarization beam splitter for Y type photonic crystal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周飞, 费宏明, 杨毅彪, 等. Y 型光子晶体偏振光分束器. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(2): 154 – 157.
- [9] XIAO J, SUN X. A modified full-vectorial finite-difference beam propagation method based on *H*-fields for optical waveguides with step-index profiles [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(2): 505 – 511.
- [10] ALMEIDA V R, XU Q, BARRIOS C A, *et al.* Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1209 – 1211.
- [11] SOLDANO L B, PENNINGES E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615 – 627.
- [12] LEVY D S, SCARMOZZINO R, Li Y, *et al.* Length reduction of tapered $N \times N$ MMI devices [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 830 – 832.