

快速可调谐电光聚合物波导光栅^{*}

王义平[†] 陈建平 李新碗 周俊鹤 沈 浩 施长海 张晓红 洪建勋 叶爱伦

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 上海 200030)

(2004 年 9 月 3 日收到, 2005 年 1 月 25 日收到修改稿)

提出并设计了快速可调谐电光聚合物波导光栅. 该波导光栅通过极化聚合物的线性电光效应可实现谐振波长的纳秒级快速调谐, 调谐灵敏度为 61 pm/V. 研究了该波导光栅的反射谱和透射谱特性与光栅周期、周期数、折射率调制函数及其调制大小的关系. 讨论了波导光栅的材料选择、制备工艺、快速可调谐性和偏振相关性. 该波导光栅不仅克服了光纤光栅调谐速度慢和不利于大规模集成的不足, 而且具有调谐灵敏度高、制备工艺与半导体工艺兼容和偏振无关等优点.

关键词: 光通信器件, 光波导, 电光效应, 聚合物, 波导光栅, 光纤光栅

PACC: 4280S, 4280L, 7820J, 4270J

1. 引 言

光纤光栅的出现使人们可以设计和制作大量基于光纤光栅的新型光有源/无源器件和智能传感器^[1-3], 如色散补偿器、滤波器、增益均衡器、光纤激光器、光开关、波长选择器以及各种传感器等. 高速、大容量全光通信网络的发展对光通信器件的快速可调谐性提出了越来越高的要求. 因此, 光栅不仅需要具有可调谐性而且应当能够实现快速调谐, 有些应用甚至要求达到 ns 级的调谐速度. 然而, 目前常用的光纤光栅(光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅)的调谐通常都是基于弹光效应(应力)和热光效应(温度)调谐的, 调谐速度慢, 一般只能实现 ms 级的调谐, 从而极大地限制了其在高速光网络中的应用. 此外, 光纤光栅不利于大规模集成, 至多只能实现几个光栅的级联, 这也限制了光纤光栅在光纤通信中的应用. 电光聚合物是一种新型的电光材料, 具有介电常数低, 器件制作工艺与半导体工艺兼容和便于大规模集成等优点^[4,5]. 极化聚合物具有较高的电光系数^[6-8]. 因此, 利用聚合物制备的光电器件通过线性电光效应可实现其谐振波长的快速调谐.

本文设计了一种可实现纳秒级快速调谐的电光聚合物波导光栅. 研究了该波导光栅的传输谱特性与光栅周期、周期数、折射率调制函数及其调制大小的关系. 讨论了波导光栅的材料选择、制备工艺、快速可调谐性和偏振相关性.

2. 波导光栅设计

研制电光聚合物波导光栅必须考虑材料的选择, 单模波导和光栅的设计与制备, 光栅的快速可调谐性和偏振相关性等多个方面. 设计的电光聚合物波导光栅的横截面及其各部分的尺寸如图 1 所示. 无定形的聚碳酸酯(amorphous polycarbonate: APC)中掺入少量的非线性发色团(CLD-1)形成的主客掺杂型聚合物 APC/CLD-1(Sigma-Aldrich Co., USA)极化后具有较高的电光系数, r_{33} 高达 43 pm/V^[6,8]. 因此, 选用此材料作为波导的芯层, 其折射率为 $n_{co} = 1.6120$. UV15(Master Bond Co., USA)旋涂固化后表明具有较强的抗腐蚀性, 其折射率为 $n_{lo} = 1.5170$. 因此, 选用 UV15 作为波导的下包层. 可实现单模传输的波导结构很多. 由于波导制备过程必需的光刻胶中含有能溶掉 APC/CLD-1 的溶剂, 而光刻胶对旋

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 90204006, 60377013), 中国博士后科学基金(批准号: 2003034258), 教育部博士点基金(批准号: 20030248035)和上海市科委基金(批准号: 036105009)资助的课题.

[†] 永久联系人. E-mail: ypwang@china.com

涂固化后的下包层 UV15 没有影响,因此波导结构选用倒脊形波导,以便使制备脊波导的蚀刻过程在下包层上进行,从而避免对芯层材料的影响. UFC-170A(Uray Co., Korea)中不含能溶掉芯层材料的溶剂,其的折射率为 $n_{up} = 1.5946$,然而未固化的 UV15 中含有能溶掉芯层材料的溶剂.因此,上包层材料选用 UFC-170A 而不选用 UV15. 基底材料选用玻璃片 SiO_2 . 电极材料选用 Au. 图 1 中波导横截面尺寸较大的目的是为了使波导的横向模场与单模光纤的横向模场尽可能一致,从而减小二者之间的耦合损耗.

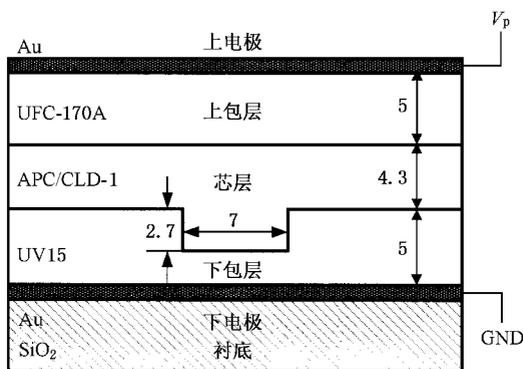


图 1 电光聚合物波导光栅的横截面示意图 图中尺寸的单位是 μm

设计波导光栅的常用方法有模式耦合法^[1],光束传播法 (beam propagation method: BPM)^[9],传输矩阵法^[10]和时域有限差分法^[11]等方法. 本文利用光束传播法进行单模波导和波导光栅的设计. 图 1 中芯层厚度与内脊高的比值为 $r = 0.62 > 0.5$,这表明该倒脊形波导的结构尺寸完全满足 Soref 提出的单模传输条件^[12]. 该倒脊形单模波导的横向模场分布如图 2 所示,水平 x 方向和垂直 y 方向的模场直径分别为 $d_x = 10.2\mu\text{m}$ 和 $d_y = 7.1\mu\text{m}$,芯层基模对应的有效折射率为 1.6073. 由图 2 可知,该倒脊形波导可实现稳定的单模传输,并且其模场分布与单模光纤的模场分布较为相似. 因此,单模光纤和该倒脊形波导之间的耦合损耗较小. 通过单模光纤的横向模场和倒脊形波导的横向模场的重叠积分可计算出二者之间的耦合损耗约为 0.75dB.

波导光栅与光纤光栅一样,都是一种芯层折射率在光传输方向上发生周期性调制的波导器件. 因此,短周期的波导光栅具有与光纤布拉格光栅相同的模式耦合特性——前向导模与后向导模之间的耦合. 根据模式耦合理论和光束传播法可以计算出波导光栅的反射谱和透射谱. 光栅周期、周期数、折射

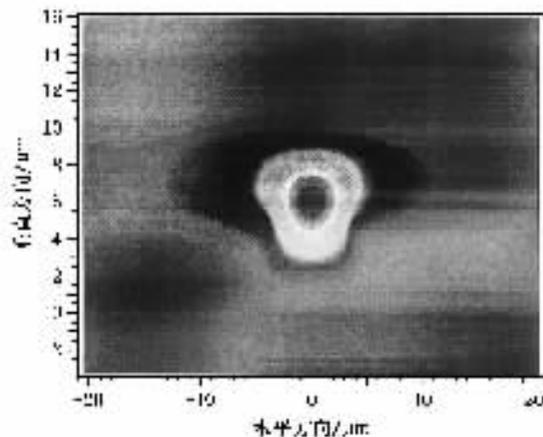


图 2 倒脊形单模波导的横向模场分布图

率调制大小及其调制函数是波导光栅的关键参数. 设波导光栅的周期 $\Lambda = 0.4822\mu\text{m}$,周期数 $N = 10000$,折射率调制 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.0008$,折射率调制函数为正弦函数. 图 3 表示该波导光栅的反射谱和透射谱,其中 (a) 表示折射率调制没有采用余弦切趾技术, (b) 表示折射率调制采用了余弦切趾技术. 由图 3(a) 可知,该光栅的谐振波长 $\lambda_{\text{res}} = 1550\text{nm}$,3dB 带宽为 0.4nm,反射谱和透射谱的边带比较明显. 由图 3(b) 可知,余弦切趾技术可以明显抑制光栅反射谱和透射谱的边带. 图 4 表示折射率调制采用了余弦切趾技术的波导光栅的芯层的有效折射率分布. 由图 4(a) 可知,该波导光栅脊部分的有效折射率呈现周期性调制,并且其折射率调制的包络为余弦曲线,这是因为该波导光栅的折射率调制采用了余弦切趾技术. 图 4(b) 表示波导光栅中央的几个周期的有效折射率调制. 由于芯层材料 APC/CLD-1 的传输损耗约为 1.7dB/cm,所以周期为 $\Lambda = 0.4822\mu\text{m}$,周期数为 10000 的波导光栅的插入损耗约为 2.3dB.

波导光栅的反射谱特性与折射率调制大小密切相关. 图 5 表示周期 $\Lambda = 0.4822\mu\text{m}$,周期数 $N = 10000$,光栅折射率调制 Δn_{eff} 分别为不同值时波导光栅的反射谱. 由图 5 可知,随着折射率调制的增加波导光栅的反射谱的幅值逐渐增大,3dB 带宽逐渐变宽. 当光栅的反射率增大到 1 后,若折射率调制继续增大,光栅反射谱的 3dB 带宽将继续变宽,同时反射谱的两侧将逐渐出现比较明显的边带. 波导制备过程中折射率的调制通常是逐渐增加的. 因此,在波导制备过程中可以通过实时监测波导光栅的反射谱或透射谱,一旦光栅的反射谱或透射谱满足需要就停止曝光,从而获得满足需要的波导光栅.

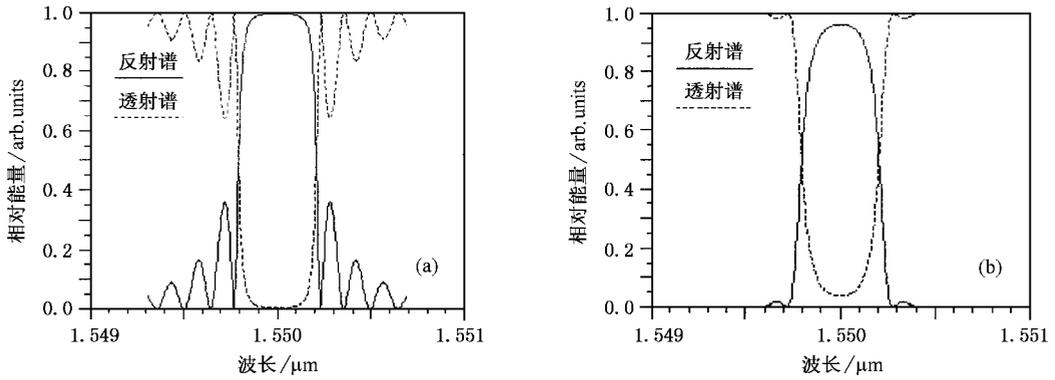


图3 波导光栅的反射谱和透射谱 (a) 折射率调制未采用余弦切趾技术 (b) 折射率调制采用了余弦切趾技术

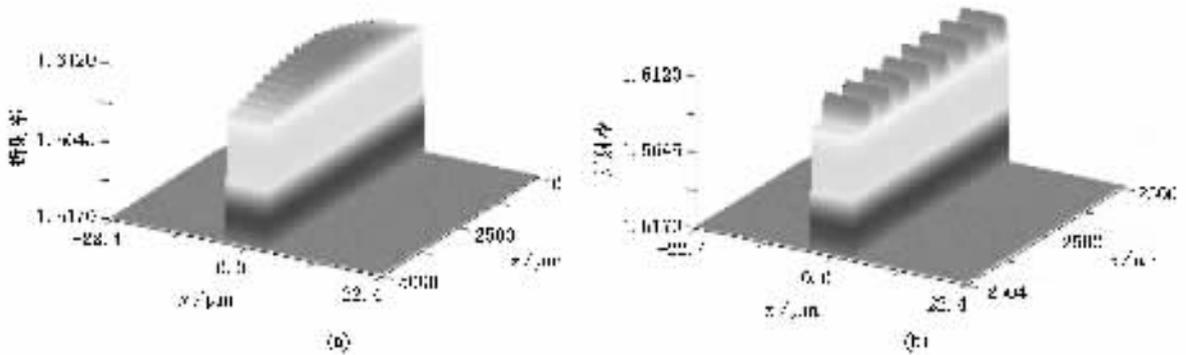


图4 (a) 折射率调制采用了余弦切趾技术的波导光栅的芯层的有效折射率分布 (b) 光栅中央的几个周期的有效折射率分布

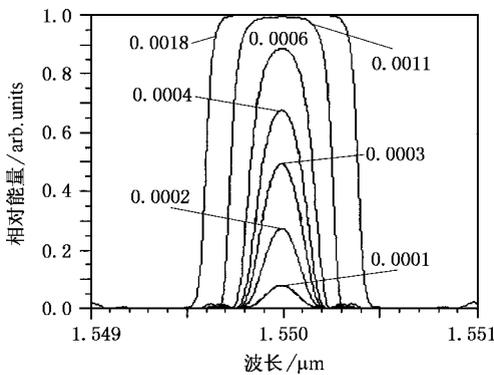


图5 折射率调制分别为 0.0001, 0.0002, 0.0003, 0.0004, 0.0006, 0.0011 和 0.0018 时波导光栅的反射谱

可以通过增加或减小光栅的周期数的方法来提高或降低光栅的反射率, 从而获得满足需要的波导光栅.

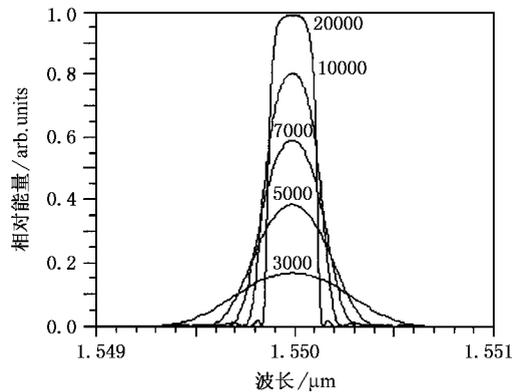


图6 周期数分别为 3000, 5000, 7000, 10000 和 20000 时波导光栅的反射谱

波导光栅的反射谱特性与光栅的周期数密切相关. 图6表示周期 $\Lambda = 0.4822\mu\text{m}$, 折射率调制 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.0005$, 光栅周期数 N 分别为不同值时波导光栅的反射谱. 由图6可知, 随着周期数的增加波导光栅的反射谱的幅值逐渐增大, 并且周期数越多反射谱的3dB带宽就越窄. 因此, 如果紫外曝光引入的折射率调制不能使光栅的反射谱和透射谱满足需要, 则

波导光栅的反射谱特性与光栅周期的大小密切相关. 根据光纤光栅的模式耦合理论, 光栅的初始谐振波长为^[1]

$$\lambda_{\text{res}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda, \tag{1}$$

式中 n_{eff} 表示光栅芯层的有效折射率, Λ 表示光栅周期. 因此, 光栅的谐振波长与光栅周期的大小成正比. 图 7 表示周期数 $N = 10000$, 折射率调制 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.0008$, 光栅周期 Λ 分别为不同值时波导光栅的反射谱. 图中五个反射峰从左至右对应的谐振波长分别为 1478.98nm, 1510.97nm, 1542.96nm, 1574.93nm 和 1606.89nm, 其对应的光栅芯层的有效折射率分别为 1.6076, 1.6074, 1.6072, 1.6070 和 1.6068. 这与用 (1) 式的计算结果非常一致, 因此, 波导光栅和光纤光栅的谐振波长的表达式是相同的. 这是因为这两种光栅的模式耦合特性是相同的.

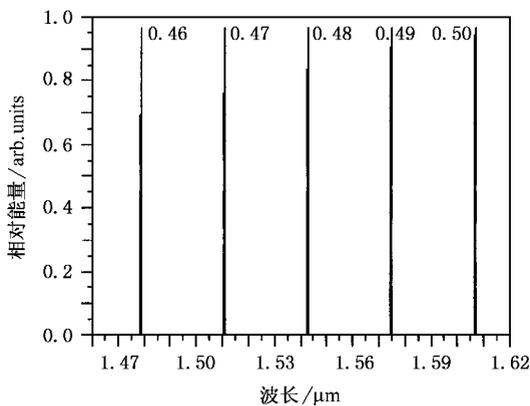


图 7 周期分别为 0.46, 0.47, 0.48, 0.49 和 0.50 时波导光栅的反射谱

由光栅的反射谱和透射谱的互补性可知, 波导光栅的透射谱也具有以上类似的特性. 即波导光栅的透射谱与光栅的折射率调制、光栅周期和周期数等参数密切相关.

该波导光栅的芯层材料 APC/CLD-1 极化后具有较高的一阶线性电光效应. 因此, 在外加电场作用下其折射率将发生变化. 若在如图 1 所示的平行板电极上施加电压 V_p , 那么光栅芯层 TM 模对应的折射率变化为

$$\Delta n_{\text{co}} = \frac{n_{\text{co}}^3 \gamma_{33} V_p}{2d}, \quad (2)$$

式中 $d = 14.3 \mu\text{m}$ 表示上下电极间的间距, 即波导光栅的厚度; $n_{\text{co}} = 1.6120$ 表示光栅芯层的折射率; $r_{33} = 43 \text{pm/V}$ 表示芯层材料的电光系数张量. 因为光栅的芯层有效折射率约等于芯层折射率, 即 $n_{\text{eff}} \approx n_{\text{co}}$, 所以由 (1) 式和 (2) 式可得, 在外加电场作用下光栅谐振波长的变化 $\Delta \lambda_{\text{res}}$ 为

$$\Delta \lambda_{\text{res}} \approx \frac{n_{\text{co}}^3 \gamma_{33} \Delta V_p}{d}, \quad (3)$$

因此, 波导光栅谐振波长的变化与外加电场的电压成正比. 若光栅周期 $\Lambda = 0.4822$, 那么外加电场引起的谐振波长变化灵敏度为 6.1pm/V , 即在电极上施加 164V 的电压可使谐振波长为 1550nm 的反射峰平移 1nm. 从表面上看施加 164V 电压才使光栅的谐振波长变化 1nm, 好像调谐灵敏度比较低, 但实际上并不影响调谐能力. 这是因为本文设计的上下电极之间包括上下包层和芯层, 即上下电极之间的电场不仅施加在具有电光效应的芯层材料上而且还施加在上下包层中, 相当于用上下包层作为调制电场的 buffer 层. 因此, 即使调谐电压较大也不会发生电极击穿. 这样设计的目的是为了与实际的波导制备工艺一致, 以利用波导和电极的制备. 当然通过减小上下包层和芯层的厚度可以增大调谐灵敏度, 但这会增加波导光栅与光纤之间的耦合损耗.

3. 讨 论

聚合物波导可用的制备工艺流程是: 1) 在基底玻璃片上蒸镀下电极 Au; 2) 在下电极上旋涂并固化下包层 UV15; 3) 用氧反应离子蚀刻法在芯层上刻出倒脊形波导的脊; 4) 在刻有脊的下包层上旋涂并固化芯层 APC/CLD-1; 5) 在芯层上旋涂并固化上包层 UFC-170A; 6) 对芯层 APC/CLD-1 进行电晕极化使其具有电光效应; 7) 在上包层上蒸镀上电极 Au.

波导光栅的常用制备方法是通过紫外光周期性曝光波导, 利用芯层材料的光敏性使芯层折射率发生周期性调制, 从而形成波导光栅^[14,15]. 本文选用的电光聚合物材料 APC/CLD-1 的折射率对 632nm, 648nm 和 692nm 的紫外光是敏感的^[14,15], 而 UV15 和 UFC-170A 对这三个波长的光是不敏感的. 因此可以用紫外光曝光的方法在该聚合物波导中写入波导光栅.

电光聚合物波导光栅的快速可调谐能力是由聚合物电光效应的响应时间决定的. Oh 和 Zhang 等^[6,16] 已用本文选用的电光聚合物 APC/CLD-1 研制出 20GHz 的电光调制器, 并测试了其频响特性. 因此本文设计的电光聚合物波导光栅完全可以达到纳秒量级的调谐速度. 电光聚合物波导光栅能否实现快速调谐, 关键在于器件中光场和外加电场之间的相位是否匹配, 也就是光波和调制微波是否以相同的相速度在器件中行进. 实际设计的光电器件为了追求较小的半波电压, 光场和调制电场通常在器件中有较长的作用长度. 因此, 在快速调谐的情况下光

波渡越时间内电场的变化就不能忽略. 根据行波电极和集总电极的特征, 可采用行波电极来克服这一问题, 即光波和调制微波在作用区内以行波的形式相互作用. 研究表明由于电光聚合物 APC/CLD-1 有很好的快速响应能力, 只要调制频率不大于 100GHz, 光波和调制微波之间的速度不匹配性就可以忽略^[6].

外加电场可能在聚合物波导光栅中引起明显的偏振相关性, 从而对器件在光通信中的应用带来不利影响. 在波导光栅上设计偏振无关的电极可以解决这一问题. 即在波导的前后两段上分别制备如图 8 所示的平行板电极(parallel-planar electrode : PE)和共面电极(coplanar electrode : CE), 使平行板电极引起的输入光 TM 模和 TE 模的相位变化 $\Delta\Phi_{PE}^{TM}$ 和 $\Delta\Phi_{PE}^{TE}$ 与共面电极引起的输入光 TM 模和 TE 模的相位变化 $\Delta\Phi_{CE}^{TM}$ 和 $\Delta\Phi_{CE}^{TE}$ 相互抵消, 即满足^[17]

$$\Delta\Phi_{PE}^{TM} + \Delta\Phi_{CE}^{TM} = \Delta\Phi_{PE}^{TE} + \Delta\Phi_{CE}^{TE} \quad (4)$$

式中 $\Delta\Phi_{PE}^{TM}$ 、 $\Delta\Phi_{CE}^{TM}$ 、 $\Delta\Phi_{PE}^{TE}$ 和 $\Delta\Phi_{CE}^{TE}$ 分别与极化聚合物的电光系数张量 r_{33} 、 r_{31} 、 r_{13} 和 γ_{11} 有关. 合理设计波导和电极的参数使之满足(4)式, 那么从器件的整体效果看, 输入光经历整个器件后外加电场引起的 TM 模和 TE 模的相位变化相等, 从而得到偏振无关的聚合物波导光栅. 由前面的介绍可知, 本文设计的聚

合物波导光栅的宽度为 $7\mu\text{m}$, 波导总厚度为 $14.3\mu\text{m}$, 长约为 5mm. 由于电极边缘的电场不均匀, 因此设计的平行板波导电极的长为 2.5mm, 宽为 $11\mu\text{m}$, 厚为 $1\mu\text{m}$, 材料为 Au, 下电极蒸镀在波导的基底上, 上电极蒸镀在上包层上. 图 9(a) 表示在平行板电极上施加 100V 电压时 TM 方向的电场示意图. 设计的共面电极的长为 2.5mm, 宽为 $15\mu\text{m}$, 厚为 $1\mu\text{m}$, 材料为 Au, 左右电极的中线相距 $23\mu\text{m}$, 左右电极都蒸镀在上包层上. 图 9(b) 表示在共面电极上施加 100V 电压时 TE 方向的电场示意图. 通过调节施加在平行板电极上的电压 V_{PE} 和共面电极上的电压使 V_{CE} 使 $\Delta\Phi_{PE}^{TM}$ 、 $\Delta\Phi_{CE}^{TM}$ 、 $\Delta\Phi_{PE}^{TE}$ 和 $\Delta\Phi_{CE}^{TE}$ 满足(4)式, 从而得到偏振无关的电光聚合物波导光栅. Donval 等人^[18] 已经用此方法实现了偏振无关的电光聚合物调制器.

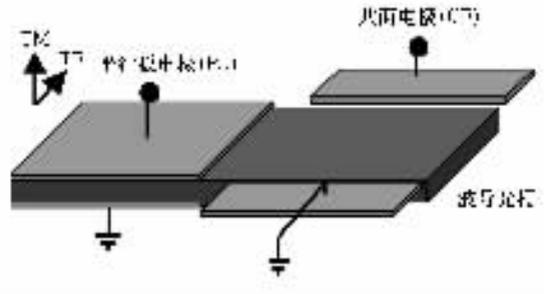


图 8 偏振无关的聚合物波导光栅的电极结构示意图

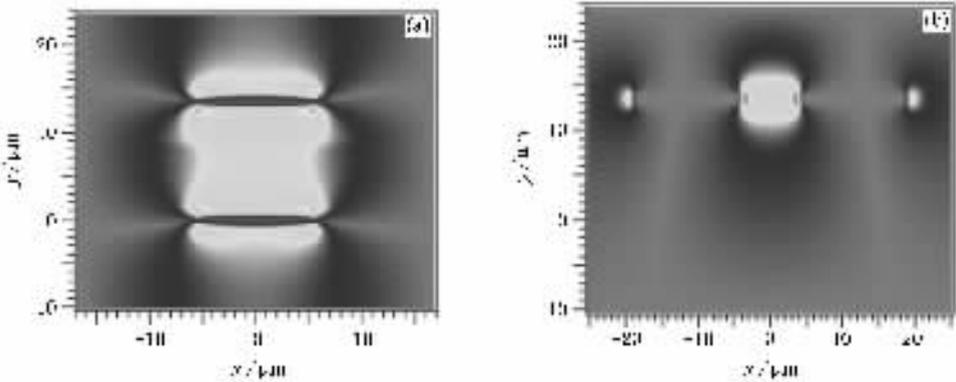


图 9 (a) 平行板电极 TM 方向电场示意图 (b) 共面电极 TE 方向电场示意图

众所周知, 许多聚合物材料通常是温度敏感的. 研究表明由本文选用的电光聚合物 APC/CLD-1 的温度敏感性主要来源于聚合物中残留的氧与发色团 CLD 的相互作用^[6,14]. 只要把制备的聚合物波导器件在 60 度环境中放置 25 天, 使残留的氧与发色团 CLD 充分反应, 即排除聚合物中残留的氧, 则该波导器件就是温度稳定的^[14]. 因此, 本文设计的电光聚

合物波导光栅应首先在 60 度环境放置 25 天, 然后再使用.

4. 结 论

电光聚合物波导光栅通过极化聚合物的线性电光效应可实现谐振波长的纳秒级快速调谐. 波导光

栅谐振波长的变化与外加电场的电压成正比,灵敏度为 6.1pm/V 。短周期波导光栅的模式耦合与光纤布拉格光栅的模式耦合相同,都是前向导模与后向导模之间的耦合。波导光栅的传输谱特性与光栅周期、周期数、折射率调制大小及其调制函数等参数密切相关。行波电极可以解决电光聚合物波导光栅中光场和调制电场之间的相位匹配问题。在波导光栅

上同时制备适当的平行板电极和共面电极可以克服外加电场引起的波导光栅的偏振相关性。把聚合物波导光栅在 60° 的环境中放置一段时间可以解决其温度稳定性问题。该聚合物波导光栅不仅克服了光纤光栅调谐速度慢和不利于大规模集成的不足,而且具有调谐灵敏度高,制备工艺与半导体工艺兼容和偏振无关等优点。

-
- [1] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1277
- [2] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, Bhatia V, Erdogan T and Sipe J E 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 58
- [3] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L and Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平、饶云江、冉曾令、朱 涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [4] Shi W, Fang C S, Pan Q W, Meng F Q, Gu Q T, Xu D, Chen G J and Yu J Z 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 0262 (in Chinese) [史伟、房昌水、潘奇伟、孟凡青、顾庆天、许 东、陈钢进、余金中 2000 物理学报 **49** 0262]
- [5] Chen K X, Yi M B, Zhang D M and Hou Z L 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1611 (in Chinese) [陈开鑫、衣茂斌、张大明、侯阿临 2000 物理学报 **49** 1611]
- [6] Oh M C, Zhang H, Zhang C, Erlig H, Chang Y, Tsap B, Chang D, Szep A, Steier W H, Fetterman H R and Dalton L R 2001 *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **7** 826
- [7] Rabiei P, Steier W H, Zhang C and Dalton L R 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 1968
- [8] Shi Y, Zhang C, Zhang H, Bechtel J H, Dalton L R, Robinson B H and Steier W H 2000 *Science* **288** 119
- [9] Yevick D and Hermansson B 1989 *IEEE J. Quantum Elect.* **25** 221
- [10] Chern G W and Wang L A 1999 *J. Opt. Soc. Am. A: Optics and Image Science and Vision* **16** 2675
- [11] Shibayama J, Takahashi T, Yamauchi J and Nakano H 1999 *Electron Lett.* **35** 1548
- [12] Soref R A, Schmidtchen J and Petermann K 1991 *IEEE J. Quantum Elect.* **27** 1971
- [13] Zou H, Beeson K W and Shacklette L W 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 1083
- [14] Zhang C, Dalton L R, Oh M C, Zhang H and Steier W H 2001 *Chem. Mater.* **13** 3043
- [15] Poon J K S, Huang Y, Palocz G T, Yariv A, Zhang C and Dalton L R 2004 *Opt. Lett.* **29** 2584
- [16] Zhang H, Oh M C, Szep A, Steier W H, Zhang C, Dalton L R, Erlig H, Chang Y, Chang D H and Fetterman H R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3136
- [17] Donval A, Toussaere E, Hierle R and Zyss J 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3258

Fast tunable electro-optic polymer waveguide gratings^{*}

Wang Yi-Ping[†] Chen Jian-Ping Li Xin-Wan Zhou Jun-He Shen Hao

Shi Chang-Hai Zhang Xiao-Hong Hong Jian-Xun Ye Ai-Lun

(*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

(Received 3 September 2004; revised manuscript received 25 January 2005)

Abstract

A novel fast tunable electro-optic (EO) polymer waveguide grating is proposed and designed. Its resonant wavelength can be linearly tuned by first-order EO effect with a high sensitivity of 6.1 pm/V. Its spectrum characteristics depend strongly on many optical parameters of grating, such as refractive index modulation, modulation function, grating period and period number. Material selection, fabrication technology, EO tunability and polarization dependence of the polymer waveguide grating are also discussed. This waveguide grating not only dispenses with the slow wavelength tuning and large-scale integration inconvenience of conventional optic fiber gratings, but have many advantages, such as high resonant wavelength tuning sensitivity, using same fabrication technology as semiconductor devices, and polarization independence.

Keywords : optical communications device, optical waveguide, electro-optic effect, polymer, waveguide grating, optic fiber grating

PACC : 4280S, 4280L, 7820J, 4270J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90204006 and 60377013), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2003034258), the Ministry of Education, China (Grant No. 20030248035) and STCSM (Grant No. 036105009).

[†] E-mail : ypwang@china.com