

多周期双啁啾镜结构的空解波分复用器*

秦小芸[†] 黄弼勤 陈海星 杨立功 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2004 年 1 月 31 日收到, 2004 年 3 月 11 日收到修改稿)

以穿透深度依赖于入射波长的基本双啁啾结构为基础, 通过对其中的布拉格膜对进行“周期重复”的方法来提高空间线性侧向位移, 从而实现不同波长的入射光的空间分离, 用于高集成度的薄膜空间解波分复用器件的设计. 比较了总层数相同的直接双啁啾结构和重复周期为 n 倍的改进结构, 发现后者在理论设计更具有应用优势, 同时在实验制作上有更高的容差性. 对空间色散特性曲线在周期重复数较大、入射波长较大的情况下所出现的强烈振荡做出了定性分析.

关键词: 双啁啾结构, 空间色散, 波分复用, 薄膜器件

PACC: 4280S, 4280X, 6860

1. 引言

光子晶体是近年来研究领域的热点之一^[1-5], 具有多种独特的物理性质. 其中光子晶体“超棱镜”效应^[6]的发现为光通讯波分复用器/解复用器^[7,8]的设计和应用带来了新的生机. 对于在禁带附近传播的电磁波, 光子晶体可以表现出比普通棱镜强得多的色散现象, 可以用来从空间上分开不同波长的电磁波. 最近, 基于二维光子晶体已成功设计了用于 wavelength division multiplexing(WDM)系统的解复用器^[9]. 由于一维光子晶体可以用成熟的光学薄膜来实现^[10], 所以近来的研究集中致力于利用一维薄膜光子晶体的超棱镜效应, 将介质膜堆的时间色散(群延迟)转变成为大的空间色散, 以实现不同波长的光波的空间分离, 用于 WDM 系统的空间解波分复用器^[11-14].

一些研究和实验结果^[12,14]表明, 规整周期性介质膜堆的空间侧向位移是非线性的, 而与波长或频率呈线性的空间侧向位移对波分复用和解复用具有很高的实用价值. 文献[12,14]报道了以用于超短脉冲激光源色散补偿的双啁啾镜结构^[15-17]为基础, 设计出基本上与波长呈线性的空间侧向位移, 但是这种双啁啾镜结构存在着空间侧向位移量不够大的缺

陷. 本文提出了双啁啾镜结构的一种改进设计, 对于啁啾后不同布拉格波长所对应的高低折射率膜对重复相同倍数, 故称多周期双啁啾镜结构, 即原结构表示为 $A_1 B_1 A_2 B_2 A_3 B_3 \dots A_i B_i$, 改进结构为 $(A_1 B_1)^n (A_2 B_2)^n (A_3 B_3)^n \dots (A_i B_i)^n$, A_i 和 B_i 分别为第 i 个布拉格波长所对应的高低折射率膜层, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 为膜对重复的倍数, 为正整数. 改进结构与初始结构相比, 其线性空间侧向位移的入射波长范围基本不变, 但线性空间侧向位移却提高了数倍, 因而增大了入射光的空间分离. 比较改进结构和与它层数相同的直接应用啁啾规则的双啁啾镜发现, 虽然它们的色散特性各有所长, 但改进结构在实际薄膜制备中更有优势. 此外, 还对双啁啾镜结构重复倍数较大或入射波长较大时, 色散特性曲线出现的强烈振荡做出了定性分析.

2. 基本原理

2.1. 空间侧向位移与时间色散之间的关系

光子晶体的超棱镜效应是一种群速度效应. 多周期布拉格反射镜在结构上相当于一维光子晶体, 在高反射区(禁带)附近的波长区域具有大的色散性, 相位出现急剧变化, 而相位的变化使得不同频率

* 国家自然科学基金(批准号: 60078001)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xiaoyun_qin@yahoo.com.cn

的光波在通过周期性介质膜堆时的群延时 τ 不同,造成了一种时间色散.若有一束倾斜入射的包含多个频率的光波通过一个介质膜堆时,由于不同频率的光波所对应的群传播角不一样,因此,出射光束在侧向方向将会各自分开,造成一种空间侧向位移,从而实现了光波的空间解复用.设 S_x 为出射光束在侧向 x 方向分开的距离, v_{gx} 为群速度在 x 方向的分量,则显然有 $S_x = v_{gx} \cdot \tau$,从而将时间色散和空间色散联系起来.

对于多层高反射薄膜结构,在忽略材料色散的情况下,可以通过 Wentzel-Kramer-Brillouin(WKB)法近似得到入射光的反射相位变化,进而得到 v_{gx} 的表达式^[14],即

$$v_{gx}^{-1} = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \Big|_{K=\text{const}} = \frac{-\partial K / \partial \omega}{\partial K / \partial \beta} = \frac{1}{c \sin \theta} \frac{\sum_i \frac{n_i^2 d_i}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta}}}{\sum_i \frac{d_i}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta}}}, \quad (1)$$

其中 c 为真空中的光速, n_i 为第 i 层薄膜的折射率, d_i 为第 i 层薄膜的物理厚度, θ 为入射角.即对于已经确定的膜堆, v_{gx} 仅与入射角度有关,与频率或波长无关.这样,可知空间侧向位移 S_x 与群延时 τ 之间成正比,可以将转换时间色散或者时间色散补偿的设计方法用于获得大的空间侧向位移.

2.2. 双啁啾镜结构

所谓双啁啾镜,是指在啁啾调制局部布拉格波长 λ_B 的基础上,啁啾调制入射波与反射波的局部耦合系数来实现阻抗匹配,在物理结构上对应于一个厚度呈“锥状”的布拉格膜堆.局部布拉格波长 λ_B 随膜堆中的位置缓慢变化,从而使不同波长的光波在膜堆的不同厚度处被强反射.如图 1 所示,当垂直入射时,啁啾镜只具有时间色散,而以一定倾角入射时, z 轴方向上与波长相关的穿透深度对应于出射面上 x 轴方向上与波长相关的空间位移,形成穿透深度依赖于波长的空间侧向位移结构.而阻抗匹配是为了减少具有较大穿透深度的光波在经过前面的膜层时所存在的反射,以避免这些反射光和在该膜层处强反射的布拉格波长光波相互干涉而使群延迟形成强烈的振荡,给构造线性的空间侧向位移带来不利影响.

文献^[14]利用具有特定时间色散特性的双啁啾镜的解析式,设计了反射式线性空间侧向位移结

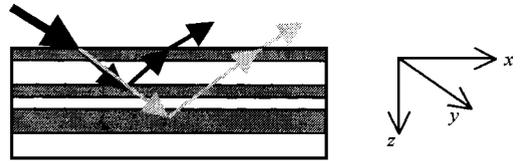


图 1 双啁啾镜结构示意图

构,但这种双啁啾镜存在不足之处,其空间侧向位移变化较急剧,线性变化的波长范围较小,仅适用于较大波长范围内需要较小空间侧向位移的情况.然而在较大波长范围内获得较大的线性侧向位移对不同波长的空间分离很有利,有助于提高 WDM 系统中波分复用器/解复用器的集成度的提高,所以需要进一步改进这种双啁啾镜结构.

2.3. 改进双啁啾镜结构设计的思路

首先,双啁啾镜的基本设计规则对于获得与波长呈线性的空间侧向位移至关重要,在改进设计中不能被破坏.其次,由于双啁啾镜的空间侧向位移基于穿透深度依赖于波长的特性,所以改变不同光波的绝对穿透深度,就可能改变空间侧向位移的大小.

用 WKB 法近似得到的啁啾规则中将传播系数 $q(m)$ 用泰勒展开零阶近似后,双啁啾镜中不同光波对应的群延迟可以表示为^[16,17]

$$\tau = \frac{1}{c} \int_{m_i(k)}^0 \lambda_B(m) dm, \quad (2)$$

其中 c 为真空中的波速, $\lambda_B(m)$ 为啁啾调制后不同的布拉格波长, $m_i(k)$ 为经典转折点,其值为负整数.这一群延迟存在一个简单的物理解释,即它是波长为 $\lambda_B(m)$ 的光波从啁啾镜的前向入射到经典的转折点 $m_i(k)$,再从该点反射回来所用的时间.因为只有布拉格波长附近波长的光波可以被强反射,所以 $\lambda_B(m)$ 对应的经典转折点 $m_i(k)$ 也就由该处的布拉格波长 $\lambda_B(m)$ 决定,而较小的布拉格波长对应的经典转折点的绝对值较小,表现在物理构造上就是相应的前向膜层结构不能对 $\lambda_B(m)$ 的光波造成阻挡.因此,可以把不同布拉格波长对应的高低折射率材料膜层由一个扩展到 n 个,这样相当于对局部布拉格波长所对应的光波其阻抗匹配基本上没有改变.同时,对于穿透深度较大的光波 $\lambda_B(m)$ 所走过的路程扩展到以前的 n 倍,由(2)式知群延迟 τ 大大增加.另一方面,由(1)式可知,对于所有布拉格波长对应的膜对都重复相同的倍数,即把

$A_1 B_1 A_2 B_2 A_3 B_3 \dots A_i B_i$ 改进为 $(A_1 B_1)^n (A_2 B_2)^n (A_3 B_3)^n \dots (A_i B_i)^n$, 两种结构的 v_{gx} 一致. 由 $S_x = v_{gx} \cdot \tau$ 可知, 通过增加光波的绝对穿透深度, 有望实现更大的空间侧向位移.

3. 模拟计算与比较

由(1)式可知, 对于确定的膜堆, v_{gx} 仅与入射角度有关, 故要获得与频率或波长成正比的空间侧向位移, 归根结底是要获得与频率或波长成正比的群延迟. 因为群延迟 $\tau = -\frac{d\Phi}{d\omega}$, 而群延迟色散 $GDD =$

$-\frac{d^2\Phi}{d\omega^2}$, 所以可以选定合适的 GDD 数值来确定啁啾的规则, 从而最终得到基本上线性的群延迟.

选择上述啁啾规则, 可对布拉格波长进行调制^[14]

$$\lambda_B(p) = \frac{\lambda_{ref}}{\sqrt{1 - \frac{\lambda_{ref}^2}{c^2 \cdot GDD \cdot \left(\pi - 2 \times \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right)^2 p}}}. \tag{3}$$

(3)式表示第 p 对高低折射率膜对所对应的布拉格波长. 根据文献[17](3)式中的 p 用 $(p - 0.5)$ 的值代入, $p = 1, 2, 3, \dots$, 为正整数.

$$d_H(p) = \frac{\lambda_B(p)}{4\sqrt{n_H^2 - \sin^2(\theta)}}, \tag{4}$$

$$d_L(p) = \frac{\lambda_B(p)}{4\sqrt{n_L^2 - \sin^2(\theta)}}, \tag{5}$$

$$d_H(p) = \frac{\lambda_B(P_{DC})}{4\sqrt{n_H^2 - \sin^2(\theta)}} \left(\frac{p}{P_{DC}}\right)^{1.05}, \tag{6}$$

$$d_L(p) = \frac{\frac{1}{2}\lambda_B(p) - d_H(p)\sqrt{n_H^2 - \sin^2(\theta)}}{\sqrt{n_L^2 - \sin^2(\theta)}}. \tag{7}$$

(4)和(5)式及(6)和(7)式分别为单啁啾与双啁啾调制时第 p 对高低折射率膜层的物理厚度, θ 为空气中的入射角, P_{DC} 为双啁啾调制的总膜对数.

文献[14]选定参考波长为 800nm, 以 Ta_2O_5 (折射率取 2.06, 忽略材料色散和吸收) 和 SiO_2 (折射率取 1.456, 忽略材料色散和吸收) 为高低折射率材料, 入射角为 45° , 入射光为 p 偏振光, 对于 $GDD = 200, 300, 500, 1000fs^2$ 实现了对布拉格波长 30 个高低折射率膜对的单啁啾调制, 并对前 25 个高低折射率膜对进行双啁啾设计, 以实现阻抗匹配. 我们对以

上啁啾规则进行验证, 计算发现在一定波长范围内, 可以分别获得基本上与波长呈线性的空间侧向位移, 如图 2 所示.

我们的改进设计是分别将文献[14]对应的 GDD 初始膜系结构中每一高低折射率膜对重复为原来的三倍, 即将 $A_1 B_1 A_2 B_2 A_3 B_3 \dots A_{30} B_{30}$ 改进为 $(A_1 B_1)^3 (A_2 B_2)^3 (A_3 B_3)^3 \dots (A_{30} B_{30})^3$, 使用同样的高低折射率材料和用同样的 p 偏振光以相同入射角入射. 使用传输矩阵法计算得到新结构的群延迟 τ , 由(1)式得到该结构的 v_{gx} , 计算得到的空间侧向位移示于图 3.

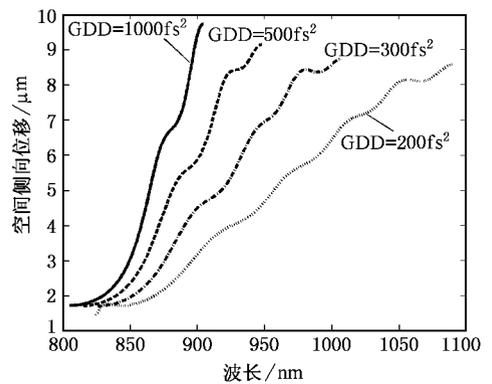


图 2 理论上初始双啁啾镜结构的空侧向位移与入射光波长之间的关系

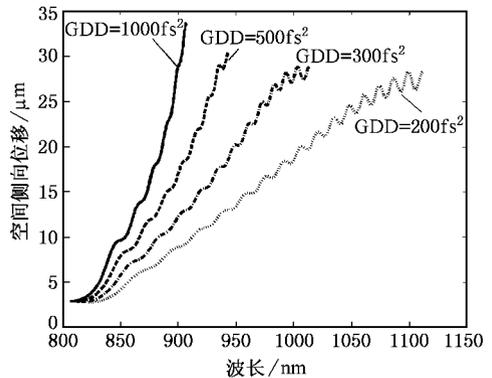


图 3 理论上改进双啁啾镜结构的空侧向位移与入射光波长之间的关系

比较图 2 与图 3 可知, 对于某一特定的 GDD, 改进结构与初始设计的空间侧向位移与波长呈线性变化的波长范围基本一致, 但是空间侧向位移发生了变化, 改进结构约为初始结构的三倍, 即此线性关系对应的斜率大大提高. 由此可知, 改进设计可以同时兼顾较大的线性波长范围与较大的空间侧向位移,

与初始设计相比,更有利于反射光波的空间分离,提高了系统的“分辨率”,亦即在以相同水平分辨空间分离的情况下,同一线性范围可以容纳更多的波分信道,提高波分器件的紧凑性。

应用(3)至(7)式,选定同样的 Ta_2O_5 和 SiO_2 材料,参考波长为 1420nm , p 偏振光以 52° 度倾斜入射, $GDD = 20000\text{fs}^2$,设计了一个对 20 个布拉格波长实现单啁啾调制,对前 15 个高低折射率膜对进行了双啁啾,以实现阻抗匹配的膜系结构.再对这一结构的每一对高低折射率膜对重复到三倍,形成加倍结构.初始结构与加倍结构的空侧向位移特性如图 4 所示.可以看出,加倍结构与初始结构相比,除了空侧向位移大大增加之外,空侧向位移与波长基本呈线性的入射波长范围略有偏移和展宽.初始结构在 $1520\text{—}1570\text{nm}$ 之间呈良好线性,加倍结构在 $1540\text{—}1610\text{nm}$ 之间也基本呈线性,可以用于通讯 C 波段.

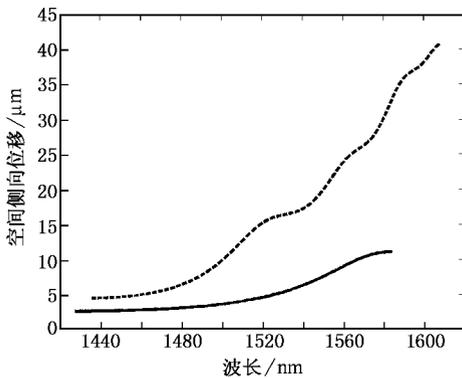


图 4 设计用于通讯 C 波段的初始双啁啾镜结构(——)与改进双啁啾镜结构(-----)的理论空侧向位移与入射光波长之间的关系

图 5 给出上述两种结构在对应入射光波段的反射率曲线.可以看出,在各自空侧向位移与波长呈线性关系的波段内,加倍结构的反射率更高,高反射率的波段也比初始结构更宽.初始结构在 $1520\text{—}1570\text{nm}$ 之间的反射率由 98.6% 降到 83.8% ,而加倍结构在 $1540\text{—}1610\text{nm}$ 之间的反射率由 99.9% 降到 81.2% .在实际应用中,如果空侧向位移不足以实现反射光的空间分离,可以通过在基板背面镀一层反射镜,使得光束在器件中多次来回往返后出射,增大通道间的出射间隔.在这种情况下,高反射率对于减少能量损失具有重要意义.同时由于加倍结构的空侧向位移数值本来就比初始结构大得多,所以加倍结构更有利于实际应用.

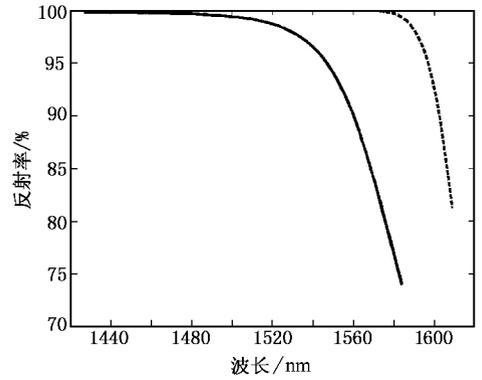


图 5 理论上设计用于通讯 C 波段的初始双啁啾镜结构(——)与改进双啁啾镜结构(-----)的反射率与入射光波长之间的关系

图 3 中 $GDD = 1000\text{fs}^2$ 所对应的三倍改进膜系的总层数为 180 层,我们将它与一个具有相同层数的直接应用啁啾规则的双啁啾结构进行比较,这两种结构的空侧向位移与入射波长呈线性的色散特性比较示于图 6.对于这一 180 层的直接啁啾膜系,我们应用相同的双啁啾规则,选定同样的材料、同样的参考波长、偏振态、入射角和 $GDD(1000\text{fs}^2)$,对 90 个高低折射率材料膜对进行了双啁啾调制,这样,两种结构的双啁啾与单啁啾膜对的比也一致.同时,两者总的物理厚度也相差不多(直接啁啾结构为 $53.68\mu\text{m}$,图 3 中 $GDD = 1000\text{fs}^2$ 所对应的三倍改进膜系为 $51.44\mu\text{m}$).

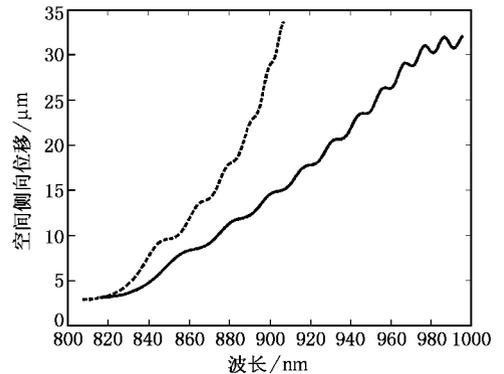


图 6 具有相同层数(180 层)的直接双啁啾镜结构(——)与加倍改进结构(-----)的空侧向位移特性的比较

从图 6 可以看出,两种结构空侧向位移的绝对数值相接近,直接啁啾结构空侧向位移与波长呈线性所对应的波长范围更宽.相比而言,加倍结构在相同的波长区对应的空侧向位移差值更大,分

分辨率”更高.虽然适用波长范围(约为 810—905nm)相对狭小,但是可以通过合适的设计将线性范围移到合适的通讯波段.此外,比较直接啁啾膜系与初始设计的加倍结构可知,直接啁啾膜系的前端高折射率膜层的厚度比加倍结构小得多,这会给膜厚监控带来一定的困难.根据模拟计算,图 6 中两种结构的第一层高折射率膜的物理厚度分别为 0.6 和 1.8nm,假设镀膜过程中引入的厚度误差为 0.5nm,则对于两个膜系的第一高折射率层,相对误差分别为 83.33%和 27.78%,可见相同的误差对直接啁啾膜系造成的影响要大得多.由此可知,加倍结构比相同层数的直接啁啾结构在理论设计更具有应用优势,在实验制作上有更高的容差性.

图 7 是在参考波长、入射角和偏振态都相同的情况下, $GDD = 300 \text{ fs}^2$ 的初始结构和分别将每一对高低折射率膜对增加到两倍、三倍和五倍时所对应的色散特性曲线.可以看出,它们的空间侧向位移与波长呈线性变化的波长范围基本一致,但空间侧向位移发生了变化,厚度每增加一倍,空间侧向位移也基本增加一倍.随倍数的增长,虽然侧向位移的平均值与波长仍然基本呈线性,但曲线的振荡却越来越强烈,五倍时对应的线性色散波长范围的后端(1000nm 左右),振荡的绝对数值甚至达到了 $10 \mu\text{m}$,限制了实际使用的可能性.

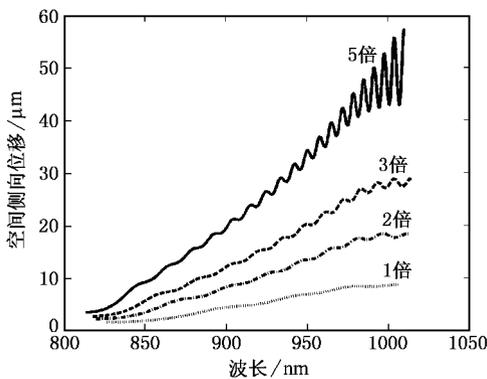


图 7 同一初始结构经过不同加倍改进之后空间侧向位移特性之间的比较.每个新的改进结构是将初始结构的每一布拉格膜对重复到不同倍数而获得的(分别为 1, 2, 3, 5 倍)

这一现象的解释是:啁啾镜中仅有限个布拉格波长被啁啾调制(我们的结构是 30 个),而其中又只有部分布拉格波长被二重啁啾调制以实现阻抗匹配(这里是 25 个).布拉格波长随膜堆中的位置缓慢变化,局部布拉格波长对应的光波在对应的布拉格膜对处被强反射,但是对于入射的连续光波,两个相邻布拉格波长 $\lambda_B(p_1)$ 和 $\lambda_B(p_2)$ 之间的光波 λ_i 在这两个布拉格波长对应膜对 p_1 和 p_2 之间反射,同时由于 λ_i 显然没有实现阻抗匹配,在经过前面的膜层时存在着轻微的反射,这些弱反射和来自后端的较强反射光波相互干涉,使群延迟形成了振荡.当初始结构增加的倍数一定时,穿透深度越大的光波被强烈反射前所经过的膜层越多,在强反射发生前的前端膜层反射相对越强烈,从而干涉越剧烈;当入射光波频率 λ_i 一定时,初始结构重复倍数越多,同样 λ_i 光波在经典转折点之前经过的层数越多,前端膜层的反射相对越强烈,与后向强反射的干涉更强.在图 7 中就表现为:对于相同的倍数,波长越长,振荡越剧烈;对于相同的入射波长,倍数越大,振荡越剧烈.如何对这些结构进行数值优化,或者考虑提高布拉格波长啁啾调制的密集程度,以及加倍时插入更多的阻抗匹配结构消除振荡,是下一步工作的研究方向.

4. 结 论

以获得空间线性侧向位移的基本双啁啾镜结构为基础,提出了用重复布拉格膜对周期的方法来提高空间线性侧向位移,从而实现不同波长入射光的空间分离.在某些情形下,还可以提高线性范围内入射光的反射率,利于多次反射以获得更大空间分离的应用.对直接应用啁啾规则的双啁啾镜和与之层数相同的重复 n 倍的改进结构进行比较,发现重复 n 倍的改进结构更具有理论设计上的应用优势和实验制作上更高的容差性.对于周期重复倍数较大,入射波长较大的情况,色散特性曲线会出现强烈的振荡,对此本文做了定性的分析与解释.

- [3] He Y J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 (in Chinese) [何拥军等 2001 物理学报 **50** 892]
- [4] Wu L , Ye Z and He S L 2003 *Chin. Phys.* **12** 642
- [5] Liu N H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1418 (in Chinese) [刘念华 2003 物理学报 **52** 1418]
- [6] Kosaka H *et al* 1998 *Phys. Rev. B* **58** R10096
- [7] Munoz P , Pastor D and Capmany J 2002 *IEEE J. Lightwave Technol.* **20** 661
- [8] Shu X W *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文等 2000 物理学报 **49** 1731]
- [9] Chung K B and Hong S W 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1549
- [10] Chen M *et al* 2001 *Acta Photon. Sin.* **30** 953 (in Chinese) [陈 昊等 2001 光子学报 **30** 953]
- [11] Nelson B E *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1502
- [12] Gerken M , Nelson B E and Miller D A B 2002 *OSA Conference on Integrated Photonics Research* paper IFH2
- [13] Cerken M and Miller D A B 2002 *European Conference on Optical Communication* paper 11.3.3
- [14] Gerken M and Miller D A B 2003 *Appl. Opt.* **42** 1330
- [15] Kartner F X *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 831
- [16] Matuschek N , Kartner F X and Keller U 1998 *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **4** 197
- [17] Matuschek N *et al* 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 129

Wavelength demultiplexer using the spatial dispersion of repeated-period double-chirped structures^{*}

Qin Xiao-Yun[†] Huang Bi-Qin Chen Hai-Xing Yang Li-Gong Gu Pei-Fu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 31 January 2004 ; revised manuscript received 11 March 2004)

Abstract

Based on the rudimentary double-chirped stack , exploiting wavelength-dependent penetration depth , repeated-period double-chirped structures , in which each couple of Bragg layers is repeated for different times , are presented to increase the spatial linear shift and the beam shifting with different incident wavelength , thus allowing the design of compact thin-film spatial wavelength demultiplexer . We compare the improved structure repeated for n times with the directly double-chirped structure with the same layer number , finding that the former has not only more advantages in theoretical design but a higher tolerance in experimental fabrication . Besides , we have given the qualitative analysis for the strong oscillation appearing in the spatial dispersion curves when the repeated times of improved double-chirped structure or the wavelength of incident beam are relatively large .

Keywords : double-chirped structure , spatial dispersion , wavelength division multiplexing , thin-film devices

PACC : 4280S , 4280X , 6860

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60078001) .

[†] Corresponding author . E-mail : xiaoyun_qin@yahoo.com.cn