

长周期波导光栅窄带光滤波器特性的模拟

张谦述^{1,2}, 廖进昆¹, 陆荣国¹, 唐雄贵¹, 李和平¹, 刘永¹, 刘永智^{1*}

(1. 宽带光纤传输与通信教育部重点实验室 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054;

2. 西华师范大学 物理与电子学院, 四川 南充 637002)

摘要: 利用两路平行的刻有长周期光栅(LPWG)波导间耦合的理论模型,研究了LPWG波导光滤波器,利用弱耦合实现高耦合效率和窄带滤波的方法,设计了一个窄带光滤波器。仿真结果表明,在1530~1560 nm范围,能实现单一的带通、带阻互补滤波输出,3 dB带宽为1 nm,耦合效率高达98%。

关键词: 集成光学; 光电子器件; 光滤波器; 长周期波导光栅; 耦合模理论; 仿真

中图分类号: TN256

PACS: 42.79.Ci; 42.82.-m

PACC: 4280C; 4282

文献标识码: A

1 引言

长周期光栅(Long-period grating: LPG)是周期为几十至几百微米的光栅。制作在光纤上的长周期光栅能使满足相位匹配条件的特定波长(谐振波长)的纤芯基模与同向传输的包层模式相耦合,使相应的光能量转移到包层中。因此,长周期光栅提供了一种具有波长选择性的耦合机制。利用单根长周期光纤光栅的这一耦合机制,已经实现了带阻滤波器功能^[1]和EDFA(掺铒光纤放大器)的增益平坦滤波器功能^[2]。最近的研究表明平行的两路长周期光纤光栅能将这部分光能量重新耦合回纤芯而加以利用,在两路光纤的输出端输出互补的带通与带阻滤波结果,可作为光分插复用器^[3],在光通信网络和光纤传感系统中亦具有广泛的研究前景^[4~7]。

由于光纤在材料和几何尺寸上都固定,限制了对长周期光纤光栅设计的灵活性,并且要保证两根长周期光纤光栅的高度平行给封装带来极大的困难,而平面波导结构的两路带有LPWG的波导耦合结构,不仅可以解决长周期光纤光栅在材料选择和几何尺寸设计上灵活性差的问题,同时还有利于提高耦合结构的集成度,而且波导制作工艺能保证两路带有LPWG的波导的高度平行,解决了长周期光纤光栅的封装困难。香港城市大

学郑建成等研究了在平面波导中实现带有LPWG的两路平行的波导间的耦合机制,从理论上证明了这一耦合过程^[8],并实验验证了该耦合过程^[9],但其3 dB带宽约为3.8 nm,耦合效率仅能达到30%。该耦合结构要作为滤波器实现光分插复用功能还需要进一步将3 dB带宽压缩到1 nm以下,并提高耦合效率。

本文利用两路平行的LPWG波导滤波器的理论模型,从理论上详细分析了影响耦合效率 η 和3 dB带宽的因素,提出了利用降低耦合系数来压缩3 dB带宽和提高耦合效率的方法,设计并仿真了一个窄带滤波器。

2 结构与工作原理

两路LPWG波导滤波器的结构如图1(a)和(b)所示。其核心是由材料和几何尺寸相同的两平行条波导core1、core2构成的两路LPWG波导耦合结构。core1、core2分别为LPWG波导滤波器的输入输出波导,两波导的间距为 d ,高度为 h_r ,宽度为 w_r ,并掩埋在同一个包层中;包层周围环境的折射率小于包层折射率,因而包层模式也是分离的模式;波导与包层的界面上刻有周期为 Λ 、长度为 L 的长周期光栅,光栅刻槽深度为 h_g ,其作用是使波导中导模与包层中包层模式有效耦合。

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-01-23

基金项目: 国家自然科学基金重点(60736038); 国家“863”计划(2007AA01Z269); NCET项目(NCET-06-0805)资助项目

作者简介: 张谦述(1974-),男,博士研究生,讲师,主要从事集成光学器件的研究。

*: 通讯联系人; E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

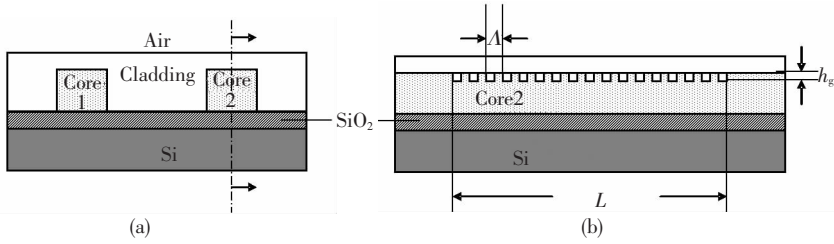


图1 两路平行长周期波导光栅波导滤波器的结构图(a)横截面;(b)侧剖面

Fig.1 Structural diagram of a filter consisting of two parallel waveguide with LPWGs, (a) and (b) are the cross-section and side cross-section of the filter, respectively.

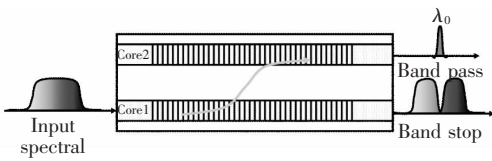


图2 周期波导光栅滤波器工作原理示意图

Fig.2 The operation schematic diagram of an LPWG filter

其工作原理是,在两路 LPWG 波导滤波器的输入波导中输入一定波长范围的光,由于长周期光栅的作用,只有满足相位匹配条件的谐振波长 λ_0 的光才能通过导模与包层中的包层模式发生耦合,该波长的光能量从输入波导中转移到包层中,由于输出波导与输入波导的完全相同,包层模式必然能与输出波导中的导模耦合,从而该波长的光能量从包层耦合入输出波导中,并建立起相应模式的光传输。因此,两路 LPWG 波导耦合结构提供了带有波长选择性的耦合机制,通过该耦合结构就能将谐振波长 λ_0 的光从输入的宽谱光中滤出,于是具有滤波功能。 λ_0 满足的相位匹配条件如下,

$$\lambda_0 = (N_{co} - N_{cl})A \quad (1)$$

式中, λ_0 称为谐振波长, N_{co}, N_{cl} 分别为导模和包层模式的有效折射率, A 为长周期波导光栅的周期。

3 LPWG 波导滤波器的滤波性能

3.1 理论模型

两路平行的 LPWG 波导间的耦合过程:一是输入波导 core1 的导模与包层模式间的耦合;二是包层模式与输出波导 core2 的导模间的耦合。输入、输出波导中及包层中的光功率随光栅长度 z 的变化规律^[8]为:

$$\frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{1}{4} \left\{ \left[\sin\left(\frac{\delta}{2}z\right) + \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}} \sin\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}}{2}z\right) \right]^2 + \left[\cos\left(\frac{\delta}{2}z\right) + \cos\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}}{2}z\right) \right]^2 \right\} \quad (2a)$$

$$\frac{|\bar{A}(z)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{1}{4} \left\{ \left[\sin\left(\frac{\delta}{2}z\right) - \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}} \sin\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}}{2}z\right) \right]^2 + \left[\cos\left(\frac{\delta}{2}z\right) - \cos\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}}{2}z\right) \right]^2 \right\} \quad (2b)$$

$$\frac{|B(z)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{4\kappa^3}{\delta^2 + 8\kappa^2} \sin^2\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + 8\kappa^2}}{2}z\right) \quad (2c)$$

其中 $\delta = \beta_{co} - \left(\beta_{cl} + \frac{2\pi}{A}\right)$ 为相位失配量, κ 为导模和包层模式间的耦合系数。 $A(z), B(z), \bar{A}(z)$ 分别为输入波导导模、包层模式、输出波导导模的电矢量。式(1)和(2a)、(2b)、(2c)构成了两路平行的 LPWG 波导间耦合的理论模型。

3.2 滤波效率

当输入光波长为谐振波长 λ_0 时,即 $\delta = 0$ 时, $|\bar{A}(L)|^2 = |A(0)|^2$, 由式(2b)求出谐振波长处的光 100% 耦合入输出波导,从而实现 100% 功率转移的条件如下:

$$\kappa L = \frac{1}{\sqrt{2}}(2n + 1)\pi, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3)$$

取 $n = 0$, 就可以得到实现 100% 功率转移的最短光栅长度:

$$L_{\min} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{1}{\kappa} \quad (4)$$

由于准 TE 模的耦合系数通常与准 TM 模的耦合系数不相同,由式(4)得到针对准 TE 模和准 TM 模的最短光栅长度不相同,因而实际的 LPWG 波导滤波器不能 100% 将谐振波长 λ_0 的光滤出。下面从理论上计算 LPWG 波导滤波器的滤波效率。

定义 LPWG 滤波器的光耦合效率 η 为输出波导输出端光功率与输入光功率的比值,用于表征输入波导与输出波导间光耦合强弱。光耦合效率 η 是光波长和 LPWG 长度的函数,对准 TE 模和准 TM 模有,

$$\eta_{\text{TE/TM}}(\lambda, z) = \frac{|\bar{A}_{\text{TE/TM}}(\lambda, z)|^2}{|A_{\text{TE/TM}}(\lambda, 0)|^2} \quad (5)$$

式中 $A_{\text{TE/TM}}(\lambda, z)$ 、 $\bar{A}_{\text{TE/TM}}(\lambda, z)$ 分别为输入波导和输出波导中的准 TE 模和准 TM 模电矢量。

定义 LPWG 滤波器的滤波效率 $\eta_0(\lambda_0, z)$ 为输出波导输出端输出的谐振波长 λ_0 的光功率与输入光功率的比值。在忽略波导损耗的情况下,由准 TE 模和准 TM 模的光耦合效率可得

$$\eta_0(\lambda_0, z) = \frac{|\bar{A}_{\text{TE}}(\lambda_0, z)|^2 + |\bar{A}_{\text{TM}}(\lambda_0, z)|^2}{|A_{\text{TE}}(\lambda_0, 0)|^2 + |A_{\text{TM}}(\lambda_0, 0)|^2} = \frac{\eta_{\text{TE}}(\lambda_0, z) + \eta_{\text{TM}}(\lambda_0, z)}{2} \quad (6)$$

当光栅长度取准 TM 模实现 100% 耦合时的最短光栅长度 L_{minTM} 时,由式(4)和式(2b)得

$$\eta_0(\lambda_0, z) = 0.5 + 0.125(1 - \cos\alpha\pi)^2 \quad (7)$$

其中 α 为准 TE 模的耦合系数 k_{TE} 与准 TM 模的耦合系数 k_{TM} 的比值。当 $\alpha = 1$ 时,即 $k_{\text{TE}} = k_{\text{TM}}$ 时 LPWG 滤波器的滤波效率 $\eta_0(\lambda_0, z) = 1$,但通常由于准 TE 模和准 TM 模的模场分布不同,耦合系数不会相等,因此理论上 $0.5 < \eta_0(\lambda_0, z) < 1$ 。从后面的仿真分析中可知光栅刻蚀深度 h_g 变小时, k_{TE} 与 k_{TM} 都显著减小,并趋于一致,因此设计中通过控制光栅刻蚀深度 h_g 来调节 k_{TE} 与 k_{TM} 相对大小,从而提高 LPWG 滤波器的滤波效率。

3.3 3 dB 带宽

当光栅长度 $L = L_{\text{min}}$ 时,令 $x = \frac{(\delta L)}{2}$,带入式

$$(2b), \text{ 求出半功率点处的 } x = \frac{(\delta_{3\text{dB}} L)}{2} = \pm 1.717,$$

从而利用下面的推导得到 3 dB 带宽与光栅参数

表 1 滤波器设计参数的定义及其取值

Table 1 The design parameter's definitions and their values of the filter

参数	参数值	参数	参数值
波导宽度 (w_{co})	1.3 μm	波导材料折射率 (n_{co})	1.67
波导高度 (h_{co})	1.3 μm	包层材料折射率 (n_{cl})	1.55
包层宽度 (w_{cl})	18 μm	衬底材料折射率 (n_s)	1.45
包层高度 (h_{cl})	2.845 μm	LPG 周期 (Λ)	31.829 μm
波导间距 (d)	7 μm	LPG 最小长度 (L_{min})	2.2596 cm
外界环境折射率 (n_{ex})	1	LPG 刻槽深度 (h_g)	5 nm

的关系。

$$\delta_{3\text{dB}} = \frac{2\pi}{\lambda}(N_{\text{co}} - N_{\text{cl}}) - \frac{2\pi}{\Lambda} = \pm \frac{3.434}{L_{\text{min}}} \quad (8)$$

当相位匹配时, $\delta = 0$, 即 $\frac{2\pi}{\lambda_0}(N_{\text{co}} - N_{\text{cl}}) = \frac{2\pi}{\Lambda}$,

当 $\lambda_0 \rightarrow \lambda$, 相位失配时

$$\delta_{3\text{dB}} = \frac{2\pi}{\lambda}(N_{\text{co}} - N_{\text{cl}}) - \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi}{\Lambda} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \quad (9)$$

其中假设 $\lambda_0 \rightarrow \lambda$ 时, N_{co} 、 N_{cl} 几乎不变。由(9)可得半功率点处对应的波长和 3 dB 带宽。

$$\lambda_{3\text{dB}} = \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\lambda_0}{\delta_{3\text{dB}} + 2\pi/\Lambda} \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{3\text{dB}} = 2(\lambda_0 - \lambda_{3\text{dB}}) = \frac{2\delta_{3\text{dB}}}{\delta_{3\text{dB}} + 2\pi/\Lambda} \lambda_0 = \frac{2\lambda_0}{1 + N \times 2\pi/3.434} \quad (11)$$

其中, N 为 LPWG 最短光栅长度 L_{min} 所拥有的光栅数目。由(11)可知实现 100% 功率转移时, LPWG 滤波器的 3 dB 带宽取决于最短光栅长度 L_{min} 所拥有的光栅数目 N 。当 $N \gg 1$ 时, LPWG 滤波器的 3 dB 带宽近似为 $1/N$ 。由式(4)可知, 耦合系数 κ 越小, 最短光栅长度 L_{min} 越大, 光栅数目 N 越大, 3 dB 带宽越窄, 所以通过减小耦合系数就能压缩 LPWG 滤波器的 3 dB 带宽。

4 LPWG 窄带滤波器设计与仿真分析

4.1 参数设计

利用两路平行的 LPWG 波导间耦合的理论模型, 设计了一个基于 LPWG 波导的窄带光滤波器。滤波器各结构参数如表 1 所示。通过数字仿真来分析如何提高两路 LPWG 波导滤波器的性能。

如图 1(a)、(b) 所示, 波导芯层材料为 IPC-E/polysulfone (Corning Inc., USA) 其折射率为 $n_{co} = 1.670^{[10]}$; 以 NOA61 (Norland Co. USA) 作为包层材料其折射率为 $n_{cl} = 1.55$; 外界环境为空气, 折射率为 $n_{ex} = 1$; 基底材料为表面经氧化处理的硅片, 其中 SiO_2 的折射率为 $n_s = 1.45$ 。

由于光传输过程中能量主要集中在基模中, 因此为了实现有效的耦合, 输入输出波导设计为在 $1.530 \sim 1.560 \mu\text{m}$ 波长范围单模工作; 模式间的耦合设计为波导基模与包层基模的耦合, 其有效折射率分别为 $N_{co}^{\text{TE}} = 1.58322, N_{cl}^{\text{TE}} = 1.53378$ (对应于准 TE_{||} 模耦合), $N_{co}^{\text{TM}} = 1.58072, N_{cl}^{\text{TM}} = 1.53218$ (对应于 TM_{||} 模耦合)。当输入输出波导截面尺寸设计为 $w_{co} = h_{co} = 1.3 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.530 \sim 1.560 \mu\text{m}$ 波长范围能实现单模工作, 而包层中能支持的模式数众多。用 Marcatili 法求出波导基模和包层中各个模式在不同波长下的有效折射率, 由相位匹配条件(1) 求出包层中各个模式与波导基模发生耦合时所需的 LPWG 的光栅周期 Λ , 如图 3 所示。

从图 3 中可知当光栅周期 $\Lambda = 31.829 \mu\text{m}$ 时, 只有导模与包层基模在 $\lambda = 1.545 \mu\text{m}$ 满足相位匹配条件(1), 从而使这两个模式间能产生有效的耦合, 耦合系数 κ 可近似由这两个模式的模场在光栅区域的重叠积分计算出^[11], 即

$$\kappa = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \iint_S \mathbf{e}_{1,1}^*(x, y) \Delta \epsilon_{-1}(x) \mathbf{e}_{1,1}(x, y) dS \quad (12)$$

其中 ω 为光角频率, ϵ_0 是真空介电常数, $\Delta \epsilon_{-1}(x)$

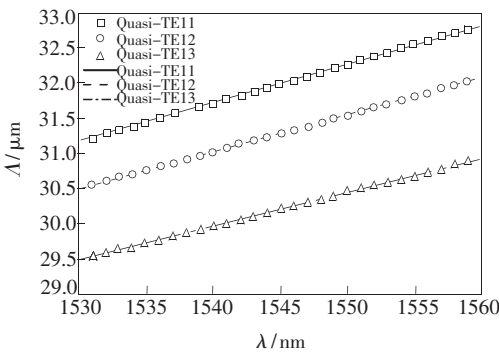


图 3 低阶包层模式与波导基模耦合时所需 LPWG 周期与波长的关系

Fig. 3 The relationship between LPWG period Λ and wavelength λ while the lower order cladding modes coupling with the guide mode of waveguide

为光栅区域介电常数变化的 -1 阶傅立叶展开式系数, $\mathbf{e}_{1,1}$ 和 $\mathbf{e}_{cl,1}$ 分别为导模和包层模的归一化模场, 积分区域为光栅区域。用表 1 所给的参数和 Marcatili 法求出的模场分布计算出在 $\lambda = 1.545 \mu\text{m}$ 时的准 TE 模耦合系数和准 TM 模耦合系数分别为 $\kappa_{\text{TE}} = 103.4 \text{ m}^{-1}, \kappa_{\text{TM}} = 98.3 \text{ m}^{-1}$ 。由式(4) 可得实现 100% 功率转移的最短光栅长度分别为 $L_{\text{minTE}} = 2.1488 \text{ cm}, L_{\text{minTM}} = 2.2596 \text{ cm}$ 。取 $L_{\text{min}} = 2.2596 \text{ cm}$ 作为 LPWG 的光栅长度。

另外, 由于波导通过消逝场的耦合不具有波长选择性, 为避免两波导间没有波长选择性的消逝场耦合的干扰, 通过增大输入、输出波导间的距离 d 来抑制消逝场耦合的发生。利用 OptiWave BMP 软件仿真得到当波导间距 $d = 7 \mu\text{m}$ 时, 波导间消逝场耦合可以忽略不计。

4.2 LPWG 窄带滤波器的滤波效率

如图 4 所示, 准 TE 基模耦合系数和准 TM 基模耦合系数的差异随光栅刻蚀深度 h_g 减小而趋于一致, 因此, 在弱耦合情况下理论上 LPWG 波导滤波器的滤波效率趋近于 100%。当 $h_g = 5 \text{ nm}$ 时, $\kappa_{\text{TE}} = 103.4 \text{ m}^{-1}, \kappa_{\text{TM}} = 98.3 \text{ m}^{-1}$, 此时 k_{TE} 与 k_{TM} 的比值 $\alpha = 1.05$, 由式(6) 两路平行的 LPWG 波导滤波器的滤波效率能达到 98.5%。当 h_g 增大时, k_{TE} 与 k_{TM} 差异增大但比值 α 基本保持不变, 滤波效率亦基本不变。

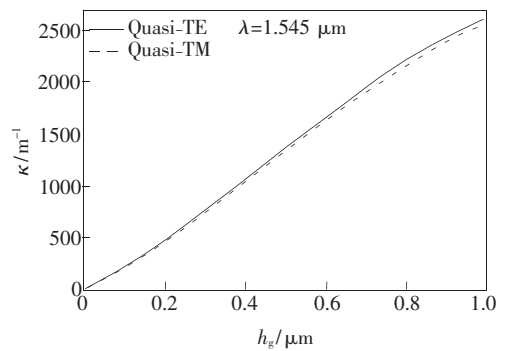


图 4 准 TE 模耦合系数和准 TM 模耦合系数与光栅刻蚀深度 h_g 的关系

Fig. 4 Dependence of the coupling coefficient for the quasi-TE and quasi-TM modes on the grating corrugation depth h_g

将 LPWG 参数及耦合系数 $\kappa_{\text{TE}}, \kappa_{\text{TM}}$ 分别带入 (2a), (2b), (2c), 用数字分析方法可得 LPWG 窄带滤波器的传输谱特性。如图 5(a)、(b) 所示, 当输入波导输入波长范围 $1.530 \sim 1.560 \mu\text{m}$

的单位功率的连续光,只有在 $\lambda_0 = 1.545 \mu\text{m}$ 附近的光满足相位匹配条件(1),该波长的光通过与包层模式的耦合转移到输出波导 Core2,而其他波长的光不满足相位匹配条件,与包层模式的耦合不能发生而继续在输入波导 Core1 中传导,从而在输入波导的输出端实现了带阻滤波功能[如图 5(a)和 5(b)中的 Core1 曲线所示];在输出波导的输出端实现了带通滤波功能[如图 5(a)5(b)中的 Core2 曲线所示];另外,带阻滤波结果与带通滤波结果是互补的。由于输入波导中的准 TE 模和准 TM 模在波长 $\lambda_0 = 1.545 \mu\text{m}$ 附近都几

乎 100% 耦合入输出波导,因此通过合理的设计两路 LPWG 波导滤波器可以实现偏振无关的滤波功能。

如图 5(c),(d)所示,谐振波长 $\lambda_0 = 1.545 \mu\text{m}$ 的光功率随着光栅长度增加周期性分布在输入波导 Core1 和输出波导 Core2 中。当光栅长度取 $L_{\text{min}} = 2.2596 \text{ cm}$ 时准 TM 模对应的光能量几乎 100% 耦合到输出波导 Core2,准 TE 模对应的光能量只有 97.1% 耦合到输出波导 Core2,由(6)式两路平行的 LPWG 波导滤波器的滤波效率能达到 98.5%。

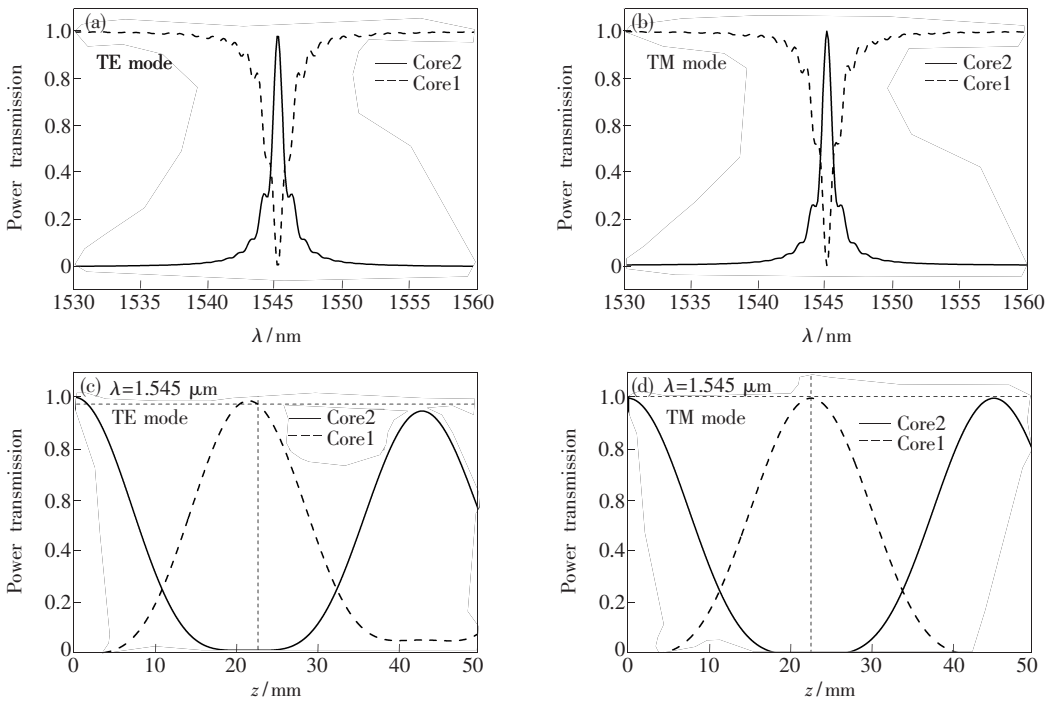


图 5 (a),(b)为准 TE, TM 模的功率传输谱;(c),(d) $\lambda = 1.545 \mu\text{m}$ 的准 TE, TM 模的光随 LPWG 长度 z 的增加在输入波导,包层及输出波导间的转移

Fig. 5 (a) and (b) the power transmission of quasi-TE mode and quasi-TM mode, respectively. (c) and (d) the power transfer of quasi-TE mode and quasi-TM mode among the input waveguide, cladding and output waveguide in respect to the length z of LPWG at wavelength $1.545 \mu\text{m}$.

4.3 LPWG 窄带滤波器的 3 dB 带宽

如图 6(a)、(b)所示,对准 TE 和准 TM 模, LPWG 窄带滤波器的 3 dB 带宽随着耦合系数增大都显著变宽。当光栅长度为 $L_{\text{min}} = 2.2596 \text{ cm}$ 时,光栅数目 $N = 710$,由式(11)计算出 LPWG 滤波器的 3 dB 带宽约为 2.4 nm 。

由于导模和包层模有效折射率 $N_{\text{co}}, N_{\text{cl}}$ 随波长改变,因此式(11)只是 3 dB 带宽的近似计算公式,它定性说明了 LPWG 滤波器 3 dB 带宽取决于

最短光栅长度 L_{min} 所拥有的光栅数目的多少。有效折射率 $N_{\text{co}}, N_{\text{cl}}$ 随波长改变时将影响 LPWG 滤波器的 3 dB 带宽。仿真结果表明,当考虑到有效折射率 $N_{\text{co}}, N_{\text{cl}}$ 随波长减小时,3 dB 带宽由式(11)的 2.4 nm 减小到约 1 nm [如图 6(c)所示]。

另外,减小耦合系数虽然可以减小 3 dB 带宽,但同时使最短光栅长度 L_{min} 增加,从而导致滤波器尺寸增加,故滤波器的 3 dB 带宽和滤波器尺寸需要折衷考虑。

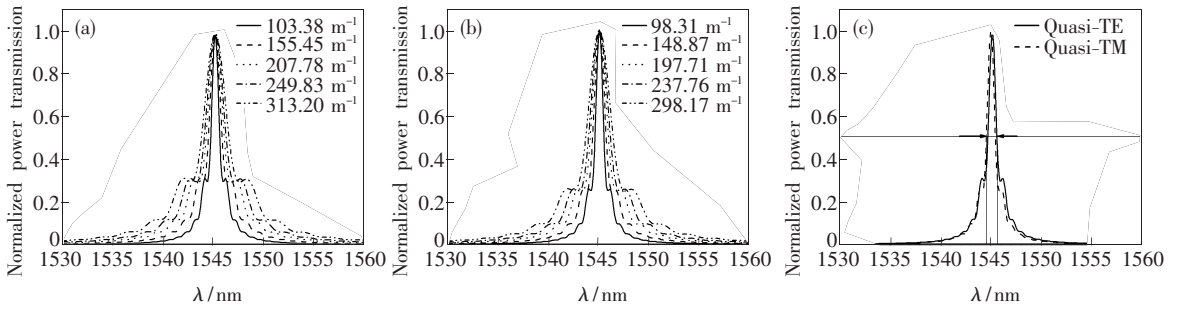


图6 (a)、(b)分别为在不同耦合系数下滤波器对准TE、准TM模的带通滤波结果;(c)当 $L_{\min} = 2.2596$ cm时滤波器的3 dB带宽

Fig. 6 (a), (b) the spectral pass-band of filtering transmission for quasi-TE mode and quasi-TM mode, respectively, at different magnitude of coupling coefficient κ ; (c) the 3 dB width of the LPWG filter with $L_{\min} = 2.2596$ cm.

5 结 论

利用两路平行 LPWG 滤波器的理论模型分析了滤波效率和 3 dB 带宽的影响因素,并仿真设计了一个窄带滤波器。数字仿真结果表明,利用弱耦合的两路平行 LPWG 滤波器可以在 1 530 ~

1 560 nm 范围,对 1 545 nm 的谐振波长的实现滤波效率 98.5% 带宽 1 nm 的窄带滤波器;同时输出互补的带通、带阻滤波结果。进一步降低耦合系数虽然可以增加滤波效率,减小 3 dB 带宽,但是大大增加了器件的长度,因此滤波器的滤波效率和 3 dB 带宽与滤波器尺寸需要折衷考虑。

参 考 文 献:

- [1] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, *et al.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1996, **14**(1):58-65.
- [2] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, *et al.* Long-period fiber-grating based gain equalizers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5):336-338.
- [3] Grubsky V, Starodubov D S, Feinberg J. Wavelength-selective coupler and add-drop multiplexer using long-period fiber gratings [C]. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Tech. Dig.*, 2000, **4**:28-30.
- [4] Georges Humbert, Abdelrafik Malki. Temperature characterization of long-period fiber gratings fabricated with electric arc discharge [J]. *SPIE*, 2001, **4579**:176-181.
- [5] Davis D D, Gaylord T K, Glysis E N, *et al.* Very-high-temperature stable CO₂-laser-induced long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(9):740-742.
- [6] Wang L A, Lin C Y, Chern G W, *et al.* Sensor made of corrugated long period fiber grating [J]. *SPIE*, **4185**:640-643.
- [7] Ahn T J, Kim B H, Lee B H, *et al.* Torsion sensing characteristics of optical fiber with a long-period grating pair [J]. *SPIE*, 2001, **4579**:154-161.
- [8] Bai Y, Chiang K S. Analysis and design of long-period waveguide-grating couplers [J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 2005, **23**(12):4363-4373.
- [9] Bai Y, Liu Q, Lor K P, *et al.* Widely tunable long-period waveguide grating couplers [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(26):12644-12654.
- [10] Garner S M, Cites J S, He M, *et al.* Polysulfone as an electro-optic polymer host material [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(7):1049-1051.
- [11] Hiroshi Nishihara, Masamitsu Haruna, Toshiaki Suhara. *Optical Integrated Circuits* [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, 46-95.

Property Simulation of a Narrow Band-passed Optical Filter Based on Long-period Waveguide Grating

ZHANG Qian-shu^{1,2}, LIAO Jin-kun¹, LU Rong-guo¹, TANG Xiong-gui¹,
LI He-ping¹, LIU Yong¹, LIU Yong-zhi¹

(1. Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, Opto-electronic Information School, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Deptment of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: Using the model describing the coupling operation of two parallel waveguides with long-period waveguide grating (LPWG) thereon, the methods decreasing coupling coefficient of coupled modes to realize narrow band-passed optical filtering and high coupling efficiency were investigated in this paper. Meantime, a narrow band-passed optical filter was designed with these methods. The simulation results indicated that the filter could be realized with a single band-passed result and band-rejected result simultaneously in the wavelength range of 1 530 nm to 1 560 nm. The 3 dB band-width is only 1 nm.

Key words: integrated optics; electro-optical devices; optical filter; long-period waveguide grating; coupled-mode theory; simulation.

CLC number: TN256

PACS: 42.79.Ci; 42.82.-m

PACC: 4280C; 4282

Document code: A