

doi:10.3788/gzxb20174603.0323002

基于 LiNbO_3 的长周期波导光栅可调谐耦合器的设计

李青青, 张爱玲, 田红苗, 王钊

(天津理工大学 计算机与通信工程学院, 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室;
教育部通信器件与技术工程研究中心 天津 300384)

摘 要:设计了一种基于 LiNbO_3 的长周期波导光栅可调谐耦合器. 该耦合器利用长周期光栅的独有特性将输入波导的导模经包层模耦合至输出波导导模. 由于 LiNbO_3 的电光效应, 波导光栅芯层与包层的有效折射率随外加电压变化, 从而耦合器的谐振波长及耦合效率可由外加电压调谐. 分析了光栅周期与耦合器的长度对耦合器带宽和耦合效率调谐范围的影响, 以及波导尺寸对谐振波长调谐灵敏度的影响. 结果表明光栅周期越短, 耦合器长度越长, 则耦合器的带宽越窄, 耦合效率调谐范围也越大. 此外, 谐振波长调谐灵敏度随波导宽度的增加而减小, 而波导厚度对谐振波长调谐灵敏度的影响可以忽略. 对光栅周期为 $94 \mu\text{m}$ 、长度为 3.52 cm 的耦合器进行仿真, 结果表明, 谐振波长灵敏度为 26.2 pm/V , 3 dB 带宽可达 4.5 nm , 当外加电压从 0 变化到 200 V 时, 谐振波长变化 5.24 nm , 耦合效率可在 1 到 0.15 之间进行调谐.

关键词:波导光栅; 可调谐; 耦合器; LiNbO_3 ; 电光效应

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0323002-7

Design of Tunable Long-period Waveguide Grating Coupler Based on LiNbO_3

LI Qing-qing, ZHANG Ai-ling, TIAN Hong-miao, WANG Zhao

(Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center, Ministry of Education of China, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A tunable long-period waveguide grating coupler based on LiNbO_3 was proposed. The light can be coupled effectively from the input waveguide to output waveguide through the cladding because of the long period gratings' unique feature. The effective refractive indexes of the core and cladding of the waveguide grating will change accordingly as a result of electro-optic effect when a tunable voltage is applied, making the resonance wavelength and the coupling efficiency tuned by controlling the applied tuning voltage. The effects of coupler length and the grating period on bandwidth and the coupling efficiency tuning range, and the influence of the waveguide size on the resonant wavelength tuning sensitivity were analyzed. The results show that the shorter grating period and the greater coupler length lead to the narrower bandwidth and the greater coupling efficiency tuning range. In addition, the resonance wavelength tuning sensitivity decreases with the increase of waveguide width, and the influence of thickness on the resonance wavelength tuning sensitivity can be ignored. For the coupler with the grating period of $94 \mu\text{m}$ and the coupler length of 3.52 cm , the simulation results show that the resonance wavelength tuning sensitivity can reach 26.2 pm/V , and the bandwidth of 3 dB as 4.5 nm , when the applied voltage varying from 0 to 200 V , the resonant wavelength change 5.24 nm , and the coupling efficiency can be tuning from 1 to 0.15 .

Key words: Waveguide grating; Tunable; Coupler; Lithium niobate; Electro-optic effect

OCIS Codes: 230.7370; 060.4510; 350.2770

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61377075)资助

第一作者: 李青青(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信器件. Email: qingqingl2012@163.com

导 师: 张爱玲(1973-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信器件. Email: alzhang07@163.com

收稿日期: 2016-09-01; 录用日期: 2016-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

相对于波导耦合器^[1]来说,长周期光栅(Long Period Grating, LPG)耦合器主要利用了长周期光栅能使谐振波长处的光从芯层模式耦合到包层模式中,具有了波长选择性;对于单个长周期波导光栅^[2-4],芯层耦合到包层模式的光能量都损失掉了,而波导光栅耦合器可以将耦合进包层中的光再次耦合进另外一条波导,从而谐振波长处的光可以被再次利用,使得长周期光栅耦合器具有很好的应用前景.

长周期光栅耦合器根据材料的不同,可分为长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)耦合器^[5-7]和长周期波导光栅(Long Period Waveguide Grating, LPWG)耦合器^[8-12]. LPFG 发展比较成熟,但是光纤在材料选择和几何尺寸上相对固定,限制了其设计应用的灵活性.相比之下,波导在选材上具有多样性和多功能性,可选择聚合物、半导体材料、无机晶体材料等^[13]. 2005年, Y. Bai, K. S. Chiang 等设计了由聚合物材料构成两个相同且平行的 LPWG 耦合器^[8],对波导光栅耦合器进行了理论分析. 2006年, K. S. Chiang 等设计了聚合物波导上基于热光效应的宽范围可调谐的 LPWG 耦合器^[9],但是基于热光效应的调谐速率比较慢,响应时间在毫秒量级. 2009年, C. K. Chow 等实现了用紫外线刻写的聚合物 LPWG 耦合器^[10],对 TE 模式耦合效率可达 80%. 但是聚合物材料对环境敏感、稳定性差、不耐化学腐蚀等特性使其应用受到了限制,并且基于热光效应的调谐速率比较缓慢. 相比之下,无机晶体材料制备的波导光栅调谐速率更快. 晶体中, LiNbO₃ 晶体集电光、声光、非线性、光折变效应等于一体,是性能良好的晶体材料,具有电光系数大、透光范围广、制备成本低、易于集成等优点. 2014年,张明等首次提出了在 LiNbO₃ 晶体上制作 LPWG 耦合器的方案^[12],分析了 LiNbO₃ 波导光栅耦合器低串扰和高温度稳定性等特点. 但是在 LiNbO₃ 上实现谐振波长与耦合效率可调谐的 LPWG 耦合器还鲜有报道.

本文提出在 LiNbO₃ 上实现 LPWG 可调谐耦合器的方案,利用 LiNbO₃ 的电光效应实现耦合器的谐振波长与谐振波长可调谐范围内某一特定波长的光进行耦合效率的调谐,同时分析了光栅周期、耦合器长度及光栅占空比对耦合器带宽及耦合效率可调谐范围的影响,以及波导的尺寸对谐振波长调谐灵敏度的影响.

1 结构与工作原理

LiNbO₃ 可调谐 LPWG 耦合器结构如图 1. 耦合器包含两个相同的条形波导,分别为输入与输出波导,两波导间隔为 d_z ,宽度均为 w_b ,厚度为 d . 以 x 切 y 传的 LiNbO₃ 晶体作为基底材料,制作钛扩散波导. 在制作出的波导上利用振幅掩模法制作光折变光栅,光栅周期为 Λ . 在两波导两侧制作平板共面电极,可以增大外加电场与波导内光场的作用面积,降低了驱动电压,且在不覆盖波导的情况下,提高了波导光栅的调谐灵敏度,也避免了因金属电极覆盖而造成的额外的传输损耗.

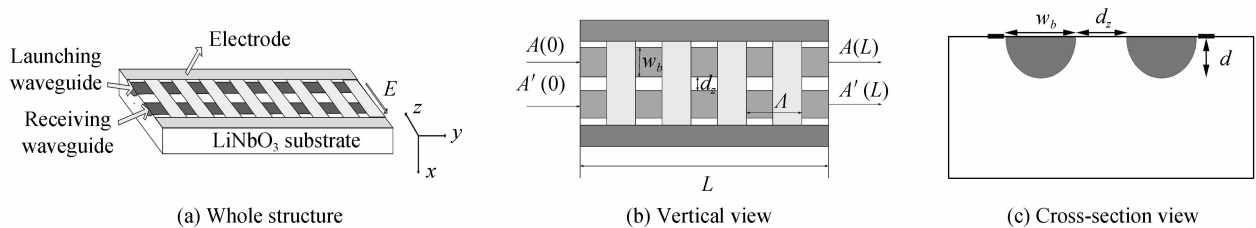


图 1 可调谐耦合器结构图

Fig. 1 The structure of tunable coupler

耦合器工作过程中,会发生三个耦合过程:1)输入波导的导模与整个包层模之间的耦合;2)整个结构包层模与输出波导的导模之间的耦合;3)两个波导芯层倏逝场之间的耦合.

定义输入波导与输出波导的导模振幅分别为 $A(y)$, $A'(y)$, 包层模振幅为 $B(y)$. 则该耦合器耦合模方程^[4]可以表示为

$$\frac{dA}{dy} = -j\kappa B \exp(j\delta y) - jCA' \quad (1)$$

$$\frac{dB}{dy} = -j\kappa A \exp(j\delta y) - j\kappa A' \exp(j\delta y) \quad (2)$$

$$\frac{dA}{dy} = -j\kappa B \exp(j\delta y) - jCA \quad (3)$$

式中, $\delta = (2\pi/\Lambda)(\lambda_0/\lambda - 1)$, 为相位失谐参量, 表示自由空间波长 λ 与谐振波长 λ_0 的偏离量, C 为两波导芯倏逝场的耦合系数, κ 为光栅耦合系数.

谐振波长 λ_0 由相位匹配条件给出, 即

$$\lambda_0 = (N_{co} - N_{cl}) \cdot \Lambda \quad (4)$$

式中, N_{co} 为波导层有效折射率, N_{cl} 为包层有效折射率.

κ 可表示为^[14]

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \Delta N \eta_g \quad (5)$$

式中, λ 为自由空间波长, ΔN 为光折变效应引起非栅区到栅区有效折射率改变量, η_g 为归一化光栅芯层与包层模场交叠系数, 表示为

$$\eta_g = \iint_s E_0 \cdot E_m dS \quad (6)$$

式中, E_0 与 E_m 分别为条形波导导模与 m 阶包层模的归一化电场分布矢量.

对于振幅掩模板曝光刻写的长周期光栅, 形成的折射率调制可看成是具有一定占空比的矩形函数, 芯层折射率可以表示为

$$N_{co}(y) = \begin{cases} N_{co} & (m+p)\Lambda \leq y \leq (m+1-p)\Lambda \\ N_{co} + \Delta N_{co} & (m+1-p)\Lambda < y < (m+1)\Lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中, p 为光栅占空比, m 为正整数, ΔN_{co} 为栅区折射率改变量.

对式(7)进行傅里叶展开得

$$N_{co}(y) = N_{co} + p\Delta N_{co} + 2\Delta N_{co} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\sin(qp\pi)}{q\pi} \cos\left(q \frac{2\pi}{\Lambda} y\right) \quad (8)$$

式中, q 为谐波次数. 此时光栅可以看成周期为 Λ/q 的一系列光栅的叠加, 第 q 阶余弦项折射率调制度为

$$\Delta N_q = 2 \cdot \Delta N_{co} \cdot \frac{\sin(qp\pi)}{q\pi} \quad (9)$$

对于本文讨论的长周期光栅, 只考虑基波, 所以对应 $q=1$. 取不同的占空比, 会得到不同的光栅耦合系数 κ . 占空比与光栅耦合系数的关系如图 2. 从图 2 可以看出, 占空比为 0.5 时, 光栅耦合系数最大, 占空比由 0.5 减小或增大, 光栅耦合系数均会减小.

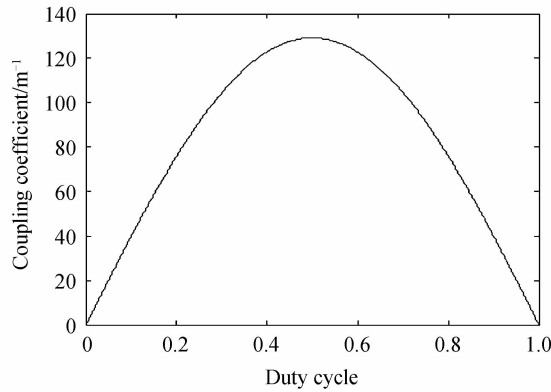


图 2 光栅耦合系数与光栅占空比的关系

Fig. 2 The variation of coupling coefficient and duty cycle

对于电场沿 z 方向的模式 E_{11}^z , 耦合器波导间倏逝场的耦合系数 C 可以表示为^[15]

$$C = \frac{2k_z^2 \gamma_z^2}{\beta k_0 (N_{co}^2 - N_{cl}^2) (2 + \gamma_z w_b)} \exp(-\gamma_z d_z) \quad (10)$$

式中, $\beta = k_0 N_{co}$ 为 E_{11}^z 模式的传播常量, k_z 、 γ_z 分别为 z 方向传播常量与芯层倏逝场衰减系数, 即

$$k_z w_b = m\pi + 2 \arctan\left(\frac{\gamma_z}{k_z}\right) \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

$$\gamma_z^2 = k_0^2(n_{co}^2 - n_{cl}^2) - k_z^2 \quad (12)$$

式中 n_{co}, n_{cl} 分别为芯层与包层的折射率. 由于波导间的倏逝场不具有波长选择性, 若存在倏逝场的耦合, 将会增加传输光谱的耦合串扰. 因此两波导间距应足够大, 避免倏逝场发生耦合. 求解式(10)~(12), 可得到 C 趋于 0 时的最小波导间距 d'_z , 此时电极间距 $D = d'_z + 2w_b$.

设耦合器光栅长度为 L , 当忽略倏逝场作用, 即 $C=0$ 时, 解耦合模方程式(1)~(3), 代入边界条件 $B(0) = 0, A'(0) = 0$, 则归一化功率可表示为

$$\frac{|A(L)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{1}{4} \left\{ [\cos(QL) + \cos(SL)]^2 + \left[\frac{S}{Q} \sin(QL) + \sin(SL) \right]^2 \right\} \quad (13)$$

$$\frac{|B(L)|^2}{|A(0)|^2} = \left[\frac{\kappa}{Q} \sin(QL) \right]^2 \quad (14)$$

$$\frac{|A'(L)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{1}{4} \left\{ [\cos(QL) - \cos(SL)]^2 + \left[\frac{S}{Q} \sin(QL) - \sin(SL) \right]^2 \right\} \quad (15)$$

其中, $S = \delta/2, Q = \sqrt{S^2 + 2\kappa^2}$. 则式(15)为耦合器的耦合效率, 对不同的相位失谐参量 δ , 式(15)得到的值不同, 即耦合效率不同.

在谐振波长处, 相位失谐参量 $\delta=0$, 式(15)化为

$$\frac{|A'(L)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{1}{4} [\cos(\sqrt{2}\kappa L) - 1]^2 \quad (16)$$

得到完全耦合条件为

$$\kappa L = \frac{(2n+1)\pi}{\sqrt{2}} \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

当 n 取 0 时, 耦合器的耦合长度最小, 记为 L_{min} .

在耦合器电极上施加调谐电压, 使电场方向反向平行于基底光轴. 根据 LiNbO_3 电光效应^[16-17], 当外加电场反向平行于晶体光轴时, 其折射率变化为

$$\Delta n = \frac{1}{2} \gamma_{33} n^3 E_z = \frac{1}{2} \gamma_{33} n^3 \frac{V}{D} \quad (18)$$

式中, γ_{33} 为 LiNbO_3 电光系数, V 为调谐电压, D 为两电极间的间距, 加电压后折射率为 $n' = n + \Delta n$.

折射率的变化会引起谐振波长的变化, 加电压后耦合器谐振波长为

$$\lambda_0(V) = (N'_{co} - N'_{cl}) \cdot \Lambda = (N_{co} - N_{cl}) \cdot \Lambda + \frac{1}{2} \gamma_{33} (N_{co}^3 - N_{cl}^3) \cdot \frac{V}{D} \cdot \Lambda \quad (19)$$

式中, N'_{co}, N'_{cl} 分别为加调谐电压 V 后芯层与包层的有效折射率. 由式(19)可以看出, 对耦合器施加调谐电压, 会得到不同的谐振波长. 当耦合器输入某一特定波长的光波时, 耦合器的谐振波长随着调谐电压变化, 相位失谐参量也会随着调谐电压变化, 从而可以通过外加调谐电压对耦合器的耦合效率进行调谐.

定义 $\frac{d\lambda_0(V)}{dV}$ 为谐振波长调谐灵敏度, 则

$$\frac{d\lambda_0(V)}{dV} = \frac{1}{2} \gamma_{33} (N_{co}^3 - N_{cl}^3) \cdot \frac{1}{D} \cdot \Lambda = \frac{1}{2} \gamma_{33} (N_{co}^2 + N_{co} N_{cl} + N_{cl}^2) \cdot \frac{1}{D} \cdot \lambda_0 \quad (20)$$

从式(20)可以看出, 谐振波长的调谐灵敏度与光栅周期无关, 与芯层包层有效折射率及电极间距有关.

2 可调谐耦合器的特性分析

为便于分析, 仿真输入条件取: $A(0) = 1, B(0) = 0, A'(0) = 0$.

当耦合器的相位失谐参量为 0 时, 耦合器的归一化功率随 κL 的变化规律如图 3. 由图可见, 随着 κL 的增加, 输入波导的功率减小, 输出波导的功率增加, 包层的功率先增大后减小. 当 $\kappa L = \pi/2\sqrt{2}$ 时, 包层中功率达到最大, 此时输入波导与输出波导的功率相同. 当 $\kappa L = \pi/\sqrt{2}$, 输入波导的功率完全耦合到输出波导, 此时输入波导功率为 0, 输出波导的功率为 1. 随 κL 的继续增加, 此过程会周期性出现, 当 κL 满足式(17)时, 耦合器均能实现完全耦合. 考虑到随耦合器长度的增加, 耦合器的损耗也会增大, 因此耦合器的长度选取最小耦合器长度, 即式(17)中, n 取 0.

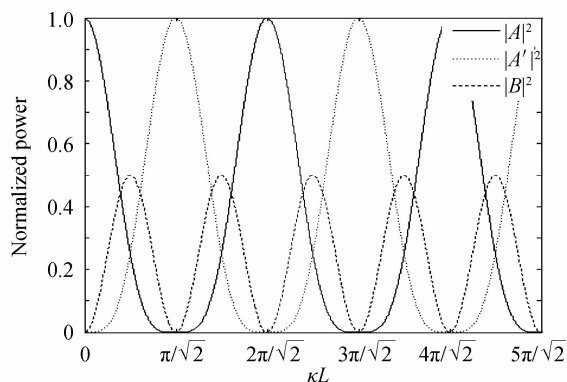


图3 谐振波长处归一化功率与 κL 关系

Fig. 3 The variation of normalized power with κL at resonance wavelength

考虑 $\kappa L = \pi/\sqrt{2}$ 完全耦合的状态,取不同耦合器长度与光栅周期,得到耦合器的传输谱如图4和图5.图4为相同光栅周期,不同长度耦合器的传输谱,可以看出光栅周期相同时,耦合器长度越长,耦合器带宽越窄.图5为相同长度,不同光栅周期的耦合器传输谱,可以看出耦合器长度相同时,光栅周期越短,耦合器带宽越窄.因此,耦合器光栅周期较短,耦合器长度较长时,可以获得比较窄的带宽,带宽的具体值由光栅周期与耦合器长度共同决定,如当周期为 $100\ \mu\text{m}$,耦合器长度为 $4.44\ \text{cm}$ 时,耦合器的 $3\ \text{dB}$ 带宽可达到 $3.8\ \text{nm}$.

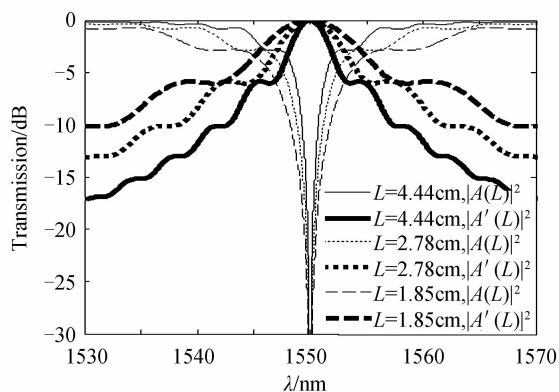


图4 $\Lambda = 100\ \mu\text{m}$ 时不同耦合器长度传输谱

Fig. 4 The transmission spectrum of couplers at different grating length when $\Lambda = 100\ \mu\text{m}$

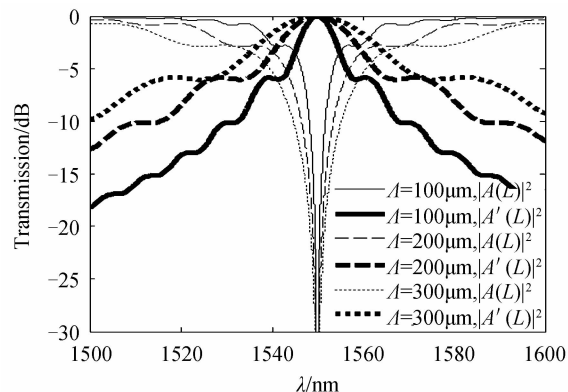


图5 $L = 1.85\ \text{cm}$ 时不同光栅周期传输谱

Fig. 5 The transmission spectrum of couplers at different grating period when $L = 1.85\ \text{cm}$

当耦合器输入某一特定波长的光波时,变化调谐电压可以对耦合器耦合效率进行调谐.考虑 $\kappa L = \pi/\sqrt{2}$ 完全耦合的状态,取不同耦合器长度与光栅周期,得到耦合器的耦合效率与相对调谐电压关系如图6和图7.

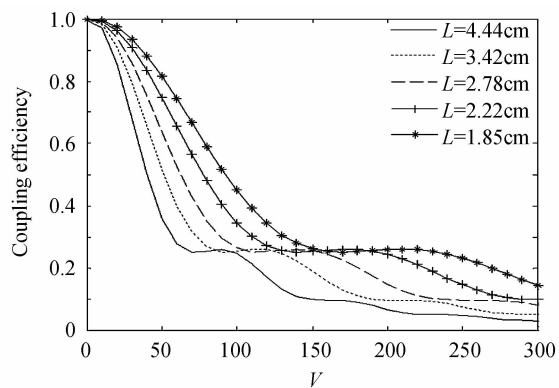


图6 $\Lambda = 100\ \mu\text{m}$ 时不同长度耦合器的耦合效率与调谐电压关系

Fig. 6 The variation of coupling efficiency at different coupler length with tunable voltage when $\Lambda = 100\ \mu\text{m}$

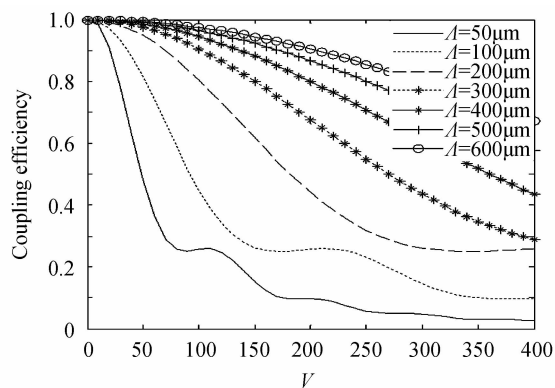


图7 $L = 1.85\ \text{cm}$ 时不同光栅周期耦合器的耦合效率与调谐电压关系

Fig. 7 The variation of coupling efficiency at different grating period with tunable voltage when $L = 1.85\ \text{cm}$

图 6 为光栅周期相同时,不同耦合器长度下的耦合效率与相对电压的关系,从图中可以看出,外加相同的调谐电压,耦合器长度越长,耦合器的耦合效率调谐范围越大.图 7 为耦合器长度相同时,不同光栅周期的耦合器耦合效率与相对电压的关系,从图中可以看出,外加相同的调谐电压,光栅周期越短,耦合效率可调谐范围越大.从图 6 和图 7 均可以看出,耦合效率在 0.9 到 0.4 之间时,调谐效率与调谐电压近似成线性关系.因此,相同的调谐电压下要想获得比较大的耦合效率调谐范围,应使耦合器长度尽量长,光栅周期尽量短.

对于光栅周期相同占空比不同的耦合器,由图 2 知,取不同占空比 p 会得到不同的耦合系数 k .若要实现完全耦合,需满足式(17),则不同占空比所需最小耦合器长度也会不一样,占空比为 0.5 时,所需最小耦合器长度最短,偏离 0.5 越多,所需最小耦合器长度越长.结合图 4 与图 6 中耦合器长度对耦合器带宽与调谐范围的影响可知,当占空比由 0 增大到 0.5,带宽相应变宽,耦合效率调谐范围变小,而由 0.5 向 1 增大的过程中,耦合器带宽又变窄,耦合效率调谐范围也相应增大.

由式(20)可知,谐振波长的调谐灵敏度与芯层包层有效折射率及波导间距有关,而波导尺寸直接影响芯层有效折射率和波导间距,所以波导尺寸会影响谐振波长调谐灵敏度.波导尺寸对谐振波长调谐灵敏度的影响如图 8.

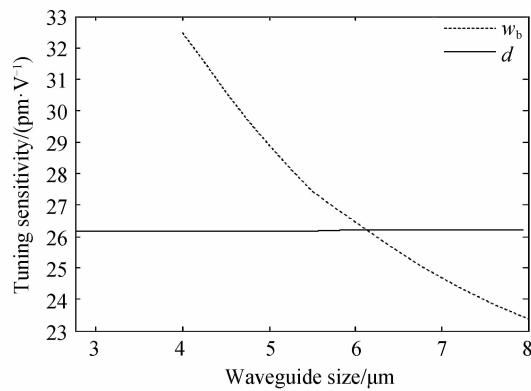


图 8 谐振波长调谐灵敏度与波导尺寸关系

Fig. 8 The variation of resonance wavelength tuning sensitivity with waveguide size

从图 8 可以看出,谐振波长调谐灵敏度随波导厚度的增加略微增大,几乎可以忽略,是因为厚度引起折射率的变化不大,即式(20)中 N_{co} 的微小变化,不足以引起谐振波长调谐灵敏度 $d\lambda_0/dV$ 的明显变化;而随波导宽度增大,耦合器谐振波长调谐灵敏度明显减小,原因是波导宽度的增加,使电极间距增大,由式(20)可以看出电极间距增大使谐振波长调谐灵敏度减小.考虑到波导损耗均随波导宽度和厚度的增加而减小^[18],因此设计时应综合考虑调谐灵敏度与损耗选取波导宽度,由于厚度对谐振波长调谐灵敏度几乎没影响,所以波导厚度可以根据单模条件设计.

因此,在 $\kappa L = \pi/\sqrt{2}$ 完全耦合的状态下,若想获得带宽窄、相同外加电压下耦合效率调谐范围大的耦合器,耦合器长度应尽量长,光栅周期尽量短,占空比可根据分析合理选择.而波导宽度则需综合考虑谐振波长调谐灵敏度与损耗进行设计,波导厚度可由单模条件进行设计.对于所设计的可调谐耦合器,当外加电场大于 LiNbO_3 矫顽场时,会造成谐振波长向相反方向漂移,过大则会造成晶体的电击穿,所以需要注意外加调谐电压的范围.如对于电极间距为 $19 \mu\text{m}$ 的耦合器,外加电压的范围应该控制在 $-400 \sim +400 \text{ V}$ 之间.

通过选择合适的波导尺寸可以使谐振波长的调谐达到最优,而选择的光栅周期越短,耦合器长度越长,耦合器的带宽会越窄,相同调谐电压下,耦合效率调谐范围也越大.当波导厚度 d 为 $5.2 \mu\text{m}$,宽度 w_b 为 $6 \mu\text{m}$ 时,光栅周期 Λ 为 $94 \mu\text{m}$,占空比为 0.5,耦合器长度为 3.52 cm ,电极间距 $19 \mu\text{m}$ 时,可调谐耦合器的谐振波长灵敏度可达到 26.2 pm/V ,3 dB 带宽为 4.5 nm ,外加电压从 0 变化到 200 V ,谐振波长变化 5.24 nm ,而对耦合效率可在 1 到 0.15 之间进行调谐.

由于 LiNbO_3 的电光效应响应时间可达到纳秒量级^[16,19],而该可调谐耦合器利用 LiNbO_3 的电光效应进行调谐,其调谐速率由 LiNbO_3 材料决定,因此 LiNbO_3 波导光栅耦合器相对于聚合物波导光栅耦合器的调谐速率会大大提高,可以满足光纤通信高速率的要求.

3 结论

本文提出了一种基于 LiNbO₃ 的长周期波导光栅可调谐耦合器. 在外加调谐电压时, 利用 LiNbO₃ 的电光效应, 可以实现谐振波长和耦合效率的快速调谐. 通过分析耦合器长度与光栅周期对耦合器带宽和耦合器耦合效率调谐范围的影响, 得到了耦合器长度越长、光栅周期越短, 则带宽越窄、耦合效率调谐范围越大的结论, 而占空比通过影响耦合器最小长度来影响带宽与耦合效率. 由波导尺寸对耦合器谐振波长调谐灵敏度影响的分析可知, 谐振波长调谐灵敏度随波导宽度增大而减小, 而厚度对灵敏度的影响几乎可以忽略, 为以后可调谐耦合器设计提供参考. 对本文所选参量的耦合器, 谐振波长灵敏度可达 26.2 pm/V, 3 dB 带宽可达 4.5 nm, 外加电压从 0 变化到 200 V, 对耦合效率可在 1 到 0.15 之间进行调谐.

参考文献

- [1] LIU Chen-yang, CHEN Lian-wen. Tunable photonic crystal waveguide coupler with nematic liquid crystals[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(8): 1849-1851.
- [2] CHIANG K S, LIU Q. Analysis of Lithium Niobate electrooptic long period waveguide gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(10): 1477-1484.
- [3] ZHANG Ming, CHEN Wen, CHEN Liu-wei, et al. Photorefractive long period waveguide grating filter in lithium niobate strip waveguide[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2014, **46**: 1529-1538.
- [4] HUA Ping-Rang, ZHANG De-Long, PUN Yue-bun. Long period grating on strip Ti-LiNbO₃ embedded in planar Ti-LiNbO₃ waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(18): 1361-1363
- [5] GRUBSKY V, STARODUBOV D S, FEINBERG J. Wavelength selective coupler and add drop multiplexer using long period fiber gratings[J]. *Optical Fiber Communication Conference Baltimore*, 2000, **4**: 28-30.
- [6] CHIANG K S, LIU Ying-qi, LI Shen-ping, et al. Coupling between two parallel long-period fibre gratings[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(16): 1408-1409.
- [7] LIU Ying-qi, CHIANG K S, RAO Yun-jiang. Light coupling between two parallel CO₂ laser written long-period fiber grating[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(26): 17645-17651.
- [8] BAI Yu-kun, CHIANG K S. Analysis and design of long-period waveguide grating couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(12): 4363-4373.
- [9] BAI Yu-kun, LIU Qing, LOR K P, et al. Widely tunable long period waveguide grating couplers[J]. *Optical Express*, 2006, **14**(26): 12644-12654.
- [10] CHOW C K, CHIANG K S, LIU Qing, et al. UV-written long-period waveguide grating coupler for broadband add/drop multiplexing [J]. *Optics Communication*, 2009, **282**(3): 378-381.
- [11] CHIANG K S, CHOW C K. Band-Rejection filter with widely tunable center wavelength and contrast using metal long-period grating on polymer waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(9): 1109-1111.
- [12] ZHANG Ming, REN Jian-wen, CHEN Wen, et al. Design and analysis of photorefractive long-period waveguide grating coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 313002.
张明, 任建文, 陈文, 等. 光折变长周期波导光栅耦合器的设计和分析[J]. *光学学报*, 2015, **35**(3): 313002.
- [13] LIAO Jin-kun, TANG Xiong-gui, GAO Yuan, et al. Polarized correction of dispersion characteristics of TM modes in polymer optical rib waveguides[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 526-533.
廖进昆, 唐雄贵, 高原, 等. 聚合物脊形光波导 TM 模式色散特性的偏振修正[J]. *发光学报*, 2015, **36**(5): 526-533.
- [14] LI Jun-hui, CHEN Kai-xin. Low driving voltage long-period waveguide grating based on LiNbO₃ [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, **32**(6): 793-796.
李俊慧, 陈开鑫. 低驱动电压 X 切铌酸锂长周期波导光栅[J]. *半导体光电*, 2011, **32**(6): 793-796.
- [15] OKAMOTO K. Fundamentals of optical waveguides[M]. New York: Academic Press, 2006, 159-203.
- [16] 孔勇发, 许京军, 张光寅, 等. 多功能光电材料[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 129-140.
- [17] 刘思敏, 郭儒, 许京军. 光折变非线性光学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 28-32.
- [18] YAN Guan-guo, ZHANG Ai-ling, HE Pei-dong, et al. Influence of temperature difference between wafer and photoresist on loss of waveguide[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, **12**(3): 8-11.
闫广拓, 张爱玲, 何培栋, 等. 晶片与光刻胶温度差对波导损耗的影响[J]. *光通信技术*, 2015, **12**(3): 8-11.
- [19] ZHANG Ai-ling, LI Yu-xiang. Design of multi-parameter tunable Bragg waveguide grating filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0823001.
张爱玲, 李玉祥. 多参量可调谐的 Bragg 波导光栅滤波器设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0823001.