

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0317-06

声光可调谐滤波器多波长同时滤波的特性*

李云娜¹⁾ 胡鸿璋¹⁾ 耿 凡²⁾ 杨吉生¹⁾

(1), 天津大学理学院应用物理系, 天津 300072
(2), 中国航天机电工业总公司津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘要: 集成光学声光可调谐滤波器(AOTF)有很多优点,特别是它可以同时滤出多个波长,因此在波分复用(WDM)光纤通信网络中有重要应用。针对其这种特性,运用耦合模理论,导出了同时存在两束声波时的严格的耦合模方程。在此基础上,得到滤波特性的数值解,分析了多波长同时运用时,滤波器的主峰强度、中心波长和 3 dB 带宽随时间的波动,同时也分析了当信道间隔较小时滤波特性失真严重、噪声较高的原因。在分析了共线型声光可调谐滤波器多波长同时运用所存在缺点的基础上,提出利用准共线模转换器来改善声光可调谐滤波器多波长同时运用的性能。

关键词: 集成光学;多波长运用;TE/TM 模转换器;声光可调谐滤波器

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

集成光学声光可调谐滤波器与其他类型的滤波器相比,具有插入损耗低、滤出带宽窄、调谐范围宽、调谐速度快、控制和操作原理简单等优点,特别是当多个分立的射频信号同时加到一个宽带的叉指换能器上时,能够激发多个声表面波,可以同时滤出几个光波^[1],这一点在波分复用系统中有着重要的意义。

多波长同时运用不可避免地会引起信道间噪声,因此抑制噪声一直被认为是最关键的问题^[2,3]。多波运用中主要存在两种噪声:其一是强度噪声,它是由于单波长滤波特性不理想引起的;另一种是相干噪声,文献[2]和[3]以模转换过程中伴有多普勒频移^[4]来解释相干噪声。

但是,在多波长同时运用时,除了噪声外,滤波特性还会存在一定的波动。这一点不能用转换光伴有频移及滤波特性不理想来解释。本文基于耦合模理论,导出了同时存在两束声波时的耦合模方程,它比 Tian 和 Herrmann 由直接类比得出的方程更为严谨。利用这个与时间及信道间隔都有关的耦合模方程,分析了共线型声光可调谐滤波器多波长同时运用时滤波特性的波动。特别是,分析了滤波器的主

峰强度、中心波长和 3 dB 带宽随时间波动的现象,同时也分析了声光可调谐滤波器在信道间隔较小时存在噪声的原因及抑制噪声的方法。另外,在分析了共线型声光可调谐滤波器多波长同时运用所存在的问题的基础上,提出了利用准共线型模转换器来改善集成光学声光可调谐滤波器多波长同时滤波的特性。

2 理论模型

在集成光学声光可调谐滤波器中,光波长的选择是通过声光模转换而实现的。因此 TE/TM 模转换器是声光可调谐滤波器中的关键部分。本文用耦合模理论,对声光模转换过程加以分析。

只存在单一频率声波时的 TE/TM 模的耦合模方程^[5]是众所周知的。当存在两束不同频率的声波时,耦合模方程要改写为

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -k_1^* B \exp[-i\psi_1(z)] - k_2^* \exp(-i\Delta\Omega t) B \exp[-i\psi_2(z)], \quad (1a)$$

$$\frac{\partial B}{\partial z} = -k_1 A \exp[i\psi_1(z)] - k_2 \exp(i\Delta\Omega t) A \exp[i\psi_2(z)], \quad (1b)$$

式中 A 和 B 分别是两偏振模的复振幅, k_1 和 k_2 分别是光波与两束不同频率的声波的耦合系数,在实际情况下,所施加的两束声波的强度往往相同,因此有 $k_1 = k_2 = k_0$ 。 $\psi_{1,2}$ 由下式给出:

* 国家自然科学基金(10084001)与集成光电子学国家重点实验室资助课题。

E-mail: Liyunna@263.net

收稿日期 2001-03-08;收到修改稿日期 2001-04-16

$$\psi_j(z) = \psi_j^{(0)} + \int_0^z \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - K_j \right) dz', (j = 1, 2) \quad (2)$$

这里, $\psi_j^{(0)}$ ($j = 1, 2$) 是声波在声光作用区起点的初相位, Δn 是 TE/TM 模的双折射率差, K_j ($j = 1, 2$) 是声波波数, $\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$, Ω_1, Ω_2 分别是两束声波的圆频率。

这两个方程是在文献 [2] 中方程 (7) 和 (8) 的基础上得到的。但是, 在这里, 两束声波的频率不同, 因此, 相对于 k_1 来说, k_2 要增加一个由于两束声波频率不同而引起的相位因子 $\exp(-i\Delta\Omega t)$ 。

引入

$$\psi(z) = \frac{\psi_1(z) + \psi_2(z)}{2} = \frac{\psi_1^{(0)} + \psi_2^{(0)}}{2} + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n z - \int_0^z \frac{K_1 + K_2}{2} dz', \quad (3)$$

$$\Delta\psi(z) = \frac{\psi_1(z) - \psi_2(z)}{2} = \frac{\psi_1^{(0)} - \psi_2^{(0)}}{2} - \int_0^z \frac{K_1 - K_2}{2} dz', \quad (4)$$

从 (1a) 式和 (1b) 式不难得到

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = -2k^*(z) \cos\left[\frac{\Delta\Omega}{2}t - \Delta\psi(z)\right] \times B \exp\left(-i\frac{\Delta\Omega}{2}t\right) \exp[-i\psi(z)], \quad (5a)$$

$$\frac{\partial B(z)}{\partial z} = 2k(z) \cos\left[\frac{\Delta\Omega}{2}t - \Delta\psi(z)\right] \times A \exp\left(i\frac{\Delta\Omega}{2}t\right) \exp[i\psi(z)], \quad (5b)$$

再引入 $B'(z)$ 和有效耦合系数 $k_{\text{eff}}(z)$

$$B'(z) = B(z) \exp\left(i\frac{\Delta\Omega}{2}t\right), \quad (6)$$

$$k_{\text{eff}}(z) = 2k(z) \cos\left[\frac{\Delta\Omega}{2}t - \Delta\psi(z)\right], \quad (7)$$

(5a) 式和 (5b) 式可以简化为

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = -k_{\text{eff}}^*(z) B' \exp[-i\Delta\psi(z)], \quad (8a)$$

$$\frac{\partial B'(z)}{\partial z} = k_{\text{eff}}(z) A \exp[i\Delta\psi(z)]. \quad (8b)$$

下面讨论一种最常见的情形, 即沿着光波导方向, 声波强度不变, 声波波数不变。在这种情形下, $k(z), K_1, K_2$ 都是不依赖于 z 的常数, 从 (3) 式、(4) 式和 (7) 式得到

$$\psi(z) = \frac{\psi_1^{(0)} + \psi_2^{(0)}}{2} + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - \frac{K_1 + K_2}{2}\right) z =$$

$$\Delta\beta z + \frac{\psi_1^{(0)} + \psi_2^{(0)}}{2},$$

$$\Delta\psi(z) = \frac{\psi_1^{(0)} - \psi_2^{(0)}}{2} + \frac{K_1 - K_2}{2} z = \frac{\Delta\psi^{(0)}}{2} + \frac{\Delta K}{2}$$

$$k_{\text{eff}} = 2k \cos\left(\frac{\Delta\Omega}{2}t - \frac{\Delta K}{2}z\right) - \frac{\Delta\psi_0}{2},$$

式中

$$\Delta\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - \frac{K_1 + K_2}{2}\right),$$

$$\Delta\psi^{(0)} = \psi_1^{(0)} - \psi_2^{(0)}.$$

再引入

$$B'' = B'(z) \exp\left[i\frac{\psi_1^{(0)} + \psi_2^{(0)}}{2}\right],$$

则 (8a) 式和 (8b) 式变为

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = -2k^* \cos\left(\frac{\Delta\Omega}{2}t - \frac{\Delta K}{2}z - \frac{\Delta\psi^{(0)}}{2}\right) \times B'' \exp[-i\Delta\beta z], \quad (9a)$$

$$\frac{\partial B''(z)}{\partial z} = 2k \cos\left(\frac{\Delta\Omega}{2}t - \frac{\Delta K}{2}z - \frac{\Delta\psi^{(0)}}{2}\right) \times A \exp[-i\Delta\beta z]. \quad (9b)$$

与仅存在一束声波的耦合模方程相比, (9) 式是一个与时间有关、空间加权的声光耦合方程, 这将会导致转换光在振幅和频率上的调制。这一点, 在后面的数值分析中将会看到。

当 $\Delta\Omega = 0, \Delta K = 0$ 时, 即两束声波的频率相同、波数相同时, 可以从 (9) 式求出转换效率的解析解为^[5]

$$T = \frac{4 |k \cos(\Delta\psi^{(0)}/2)|^2}{4 |k \cos[\Delta\psi^{(0)}/2]|^2 + (\Delta\beta/2)^2} \times$$

$$\sin^2 \left\{ L \sqrt{4 |k \cos[\Delta\psi^{(0)}/2]|^2 + (\Delta\beta/2)^2} \right\} \quad (10)$$

式中 L 为声光相互作用长度。当满足相位匹配时, $\Delta\beta = 0$ (10) 式简化为

$$T = \sin^2 \{ 2k \cos[\Delta\psi^{(0)}/2] L \}. \quad (11)$$

另外, 假定仅存在一束声波时转换效率达到 100%, 则 $kL = \pi/2$ 。如果两束声表面波完全相干, 它们的相位差 $\Delta\psi^{(0)}$ 是稳定的。将它们的初相位差调节到零, 则 $T = \sin^2(2kL) = 0$ 。如果两束声表面波完全不相干, 它们的相位差是随机起伏的, 则 T 的时间平均值为 50%。一般情况下, 两束声波既不是完全相干, 也不是完全不相干, 转换效率介于 0 与 50% 之间。

3 数值分析

3.1 共线型声光可调谐滤波器的双波长同时运用
为了更好地理解同时存在两束声波时的理论模

型 我们给出(9)式的数值解。首先,计算了共线型声光可调谐滤波器在一个周期 T_0 [$T_0 = 2\pi/(\Delta\Omega)$] 内的滤波特性。

图 1(a)为共线型滤波器转换效率随时间变化曲线,其中 λ 为波长, λ_0 是分别与两声波相匹配的光波波长的平均值,FWHM 代表 3 dB 带宽。两个声波的频率间隔取为 0.16 MHz,与每个声波相匹配的光波的波长间隔为 1.4 nm(即信道间隔为 1.4 nm)。可以看出,每一个光波的滤波特性都有很严重的失真。

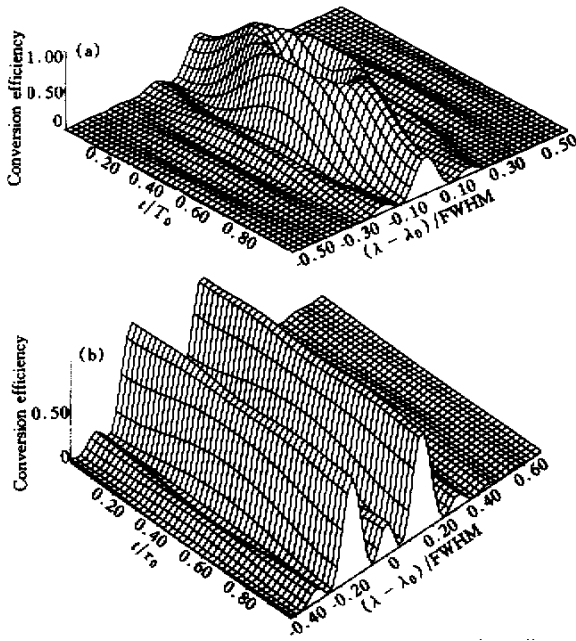


Fig.1 Time-dependent conversion efficiency of collinear acousto-optic tunable filter. (a) Channel spacing 1.4 nm ;(b) Channel spacing 4.4 nm

图 2(a)分别为在 $t = 0, T_0/4, T_0/2, T_0$ 时刻的转换效率,由图可见转换效率存在波动,某些时刻仅滤出一个光波,转换效率仅为 50%。有时,即使有两个光波滤出,两光波间的旁瓣(信道间串扰)却高达主峰的 84%。某些时刻,也可以很好地滤出两个光波,但这种瞬间特性不能用于波分复用系统。将信道间隔增加到 4.4 nm,它的滤波特性如图 1(b)所示,失真要比图 1(a)中的小得多,两主峰间的旁瓣也较低。图 2(b)为它在 $t = 0, T_0/4, T_0/2, T_0$ 时刻的滤波特性,可见,波动也比图 2(a)小得多。

在多波长同时运用时,每一光波不仅和与之相匹配的声表面波相互作用,而且还受到其他声表面波的调制。由(7)式可见,由于多个声波之间线性叠加导致声波强度、空间分布都随时间变化,从而引起有效耦合的变化,导致滤波特性与时间及两声波的

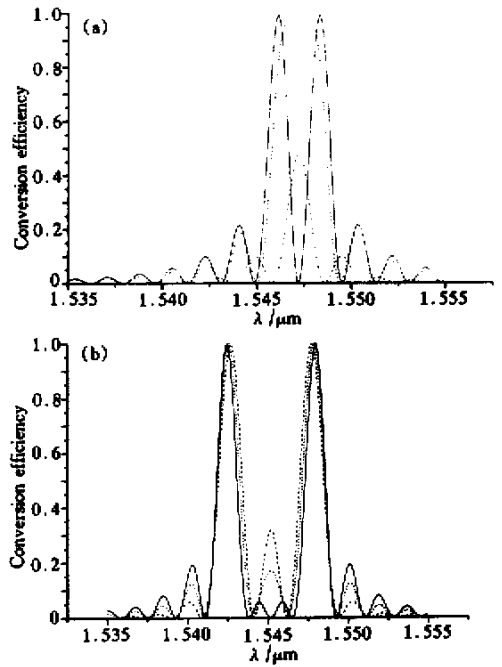


Fig.2 The conversion efficiency of collinear acousto-optic tunable filter at $t = 0, T_0/4, T_0/2, T_0$. (a) Channel spacing 1.4 nm ;(b) Channel spacing 4.4 nm

间隔都有关。滤波特性与两声波的间隔有关,即与信道间隔有关,必然影响光波受其它声表面波的调制深度,这一点从图 1 和图 2 可见,图 1 的两光波间隔较小,耦合光受到其它声表面波的调制深度较大,滤波特性的畸变较大,而增大信道间隔可以得到较好的滤波输出,滤波特性与时间有关将造成滤波特性随时间的波动,引起耦合波受到调制。从图 1 中可以看到,随着时间的变化,强度有高低起伏变化,这表明,耦合光波的振幅受到调制;从图 2,我们还可以看到中心波长也随时间变化,这表明,耦合光波的频率也受到调制。为了更清楚地看到双波同时运用时的这种特性,我们由(9)式,计算了在信道间隔为 4.4 nm 时,共线型声光可调谐滤波器一个周期内,主峰强度、中心波长和 3dB 带宽随时间的变化,如图 3 所示,主峰强度的波动有 5%,3 dB 带宽的波动有 0.23 nm,中心波长的波动有 0.15 nm,这种波动会引起信号不稳定、增加噪声及误码率。

从上述分析可见,多波长同时运用时,滤波特性并不是单波长滤波特性的简单叠加,要达到稳定的滤波输出,往往要增大信道间隔。除了滤波特性的波动外,噪声也是影响多波长同时运用性能的原因。引起噪声的原因,一方面是因为单波长滤波特性不理想,旁瓣较高,多波长同时滤波时两光波间的旁瓣

相互叠加,导致两光波间噪声升高,即强度噪声。另一方面,入射光波与两个声表面波同时相互作用,而且由于声光相互作用存在频移,导致多波长同时滤波中,会产生一系列偏振态为 TE/TM 模且具有不同频移的光波,导致转换光波主信号成分的减少,噪声信号的增大,即相干噪声。相干噪声的影响比强度噪声要难以克服。抑制强度噪声只要将每一个光波选在其它光波滤波特性的低旁瓣处(甚至滤波特性的零点)就可以减小强度噪声。而相干噪声是由于多波长同时运用中内在的调制引起的,要减小相干噪声,就必须从根本上改善滤波器本身特性,例如可以采用双折射切趾^[6]、权重声光耦合^[7]等来达到改善滤波特性目的。

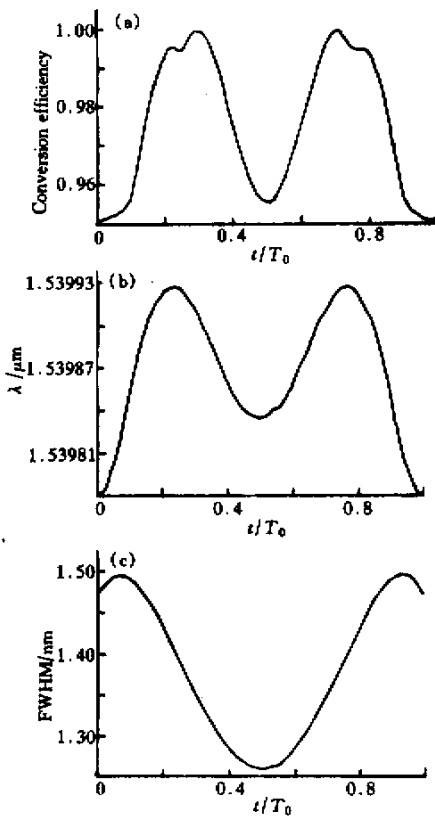


Fig. 3 The fluctuation of the filtering characteristics of collinear acousto-optic filter with respect to time. (a) The intensity of main peak vs time (b) central wavelength vs time (c) FWHM vs time

3.2 准共线型声光可调谐滤波器的双波长同时运用

从上述分析可见,共线型声光可调谐滤波器由于其固有的滤波特性不理想,要得到较好的多波长同时滤波的特性,必须增大信道间隔,这与密集波分复用系统中要求减小信道间隔是矛盾的。因此,我

们提出了用准共线型声光可调谐滤波器来改善多波长同时运用的滤波特性。

与共线型滤波器不同的是,在单波运用时,准共线型声光可调谐滤波器的耦合系数就是空间加权的,所以对于该种滤波器,多波运用时其耦合模方程应修改为

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = -2k^*(z) \cos\left[\frac{\Delta\Omega}{2}t - \frac{\Delta K}{2}z - \frac{\Delta\psi^{(0)}}{2}\right] \times B'' \exp(-i\Delta\beta z), \quad (12a)$$

$$\frac{\partial B''(z)}{\partial z} = 2k(z) \cos\left[\frac{\Delta\Omega}{2}t - \frac{\Delta K}{2}z - \frac{\Delta\psi^{(0)}}{2}\right] \times A \exp(-i\Delta\beta z). \quad (12b)$$

Kar-Roy 等人的计算表明^[8],当耦合系数 $k(z)$ 的分布具有最优汉明函数形式时,既有理想的侧瓣抑制能力,又有较好的滤出带宽,因此我们适当调节准共线型声光可调谐滤波器结构参数,使 k 随 z 的变化逼近该函数。

对这种滤波器,根据 $k(z)$ 的形式^[8]和(12)式进行叠代计算,结果如图 4 所示。两信道间噪声仅 -15 dB。需要特别指出的是,对于准共线型声光可调谐滤波器,在一个周期主峰强度波动仅 0.8%,中心频率的变化仅 0.05 nm,3 dB 带宽的变化也仅 0.04 nm,可见该种滤波器在降低信道间噪声、稳定输出方面有很大改善。

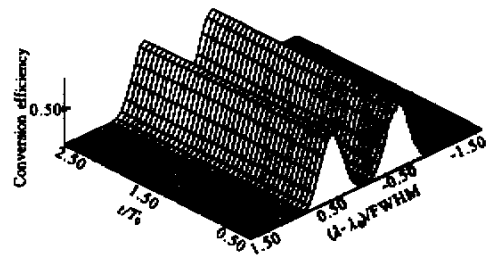


Fig. 4 Time-dependent conversion efficiency of quasi-collinear acousto-optic tunable filter

4 实验测量

为了研究声光可调谐滤波器在双波长同时运用的性质,我们在本实验室已经研制成功的依赖于偏振的声光可调谐滤波器^[9]的基础上,对一束光波同时与两束声波相互作用的转换特性进行了研究。实验装置如图 5 所示。光波波长为 1.523 μm,单模光纤将光波耦入声光可调谐滤波器中。两个射频信号合并、放大后加到叉指换能器上,激励起两个具有不同频率的声表面波。在未加 RF₂ 时,调节 RF₁ 的频

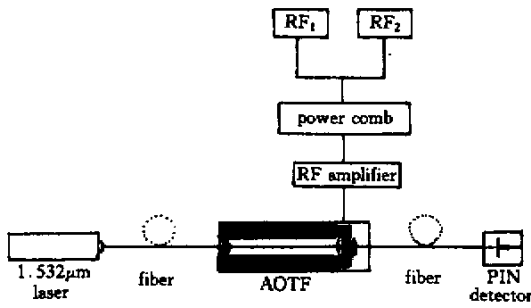


Fig. 5 Schematic of experimental setup

率及功率,使输入光转换效率达到 99% 以上,加入 RF_2 , 则光波不仅受到与之相匹配的声波(由 RF_1 激励的声表面波 SAW_1 , 其频率为 172.78 MHz)的作用,而且受到另一声波(由 RF_2 激励)的调制,其转换效率理论值如图 6 虚线所示。实验中扫描 RF_2 频率,转换光由光纤输入到探测器上,测量输出功率。实验结果如图 6 实线所示。

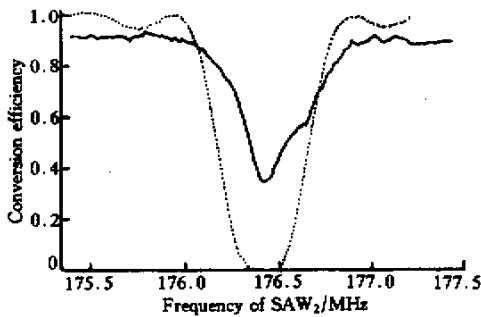


Fig. 6 The conversion efficiency of 1.523 μm laser interaction with two SAW simultaneously (frequency of SAW_1 is regulated to match 1.523 μm laser, abscissa is frequency of SAW_2). The solid and the dashed lines show experimental and calculated results, respectively

实验中发现,在两声波均调到满足相位匹配条件的频率时,尽管当单一声波存在时的转换效率可达 99%,但当两束声波同时存在时,模式转换约 30%。这是一方面是由于本实验中所用的两射频信号源及射频信号线性叠加的不稳定性,两个射频信号合并、放大加到叉指换能器后,激励起的两声表面波之间会存在随机的初相位差 $\Delta\psi_0$, 在本文的第二部分已经讨论了这种随机的初相位差 $\Delta\psi_0$ 对转换效率的影响。正是由于这种随机的初相位差 $\Delta\psi_0$ 的存在,导致本实验中转换效率不为零。另一原因是在两声波频率相同时,相当于声波功率增大,造成器件温度上升,增加了器件的中心与两端的温度差,改变了光波导内部的双折射率分布,从而使达到模

式完全转换所需要的声波波长发生改变,也就是说,两声波频率并不是模式最大转换所对应的频率,因此存在一定的模式转换。

结论 基于耦合模理论,导出了同时存在两个声波时的严格的耦合模方程。与单个声波的耦合模方程相比,双声波的耦合模方程是一个与时间有关、空间加权的声光耦合,因此转换光在振幅和频率上都将受到调制。正是这种调制的存在导致可调谐滤波器多波长同时运用存在一些缺陷,例如当信道间隔较小时信道间噪声较高以及主峰强度、中心波长和 3 dB 带宽随时间的波动问题。由于传统的共线型声光可调谐滤波器滤波特性不理想,不适用于多波长同时运用,因此我们提出采用准共线型谐滤波器来改善可调谐滤波器在多波长同时运用中的性能,理论计算表明准共线型谐滤波器在降低信道间噪声、稳定滤波特性方面有很大的改善。目前,这种准共线型谐滤波器本实验室正在研制中。

参考文献

- [1] Alessandro D, Smith D A, Baran J E. Multichannel operation of integrated acoustic-optic wavelength routing switch for WDM systems. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1994, (3) 390~393
- [2] Tian F, Herrmann H. Interchannel interference in multiwavelength operation of integrated acousto-optical filters and switches. *J. Lightwave Technol.*, 1995, 13 (6):1146~1153
- [3] Fukutoku M, Oda K *et al.*. Optical beat-induced crosstalk of an acousto-optic tunable filter for WDM network application. *J. Lightwave Technol.*, 1995, 13 (11) 2224~2235
- [4] Boyd G D, Heismann F. Tunable acousto-optic reflection filters in $LiNbO_3$ without a Doppler-shift. *J. Lightwave Technol.*, 1989, (4) 625~631
- [5] Hu H Z, Ling S D. *Principles of Applied Optics* (应用光学原理). Mechanical Industry Press, 1993. 168~210 (in Chinese)
- [6] Aronson L B, Rankin G, Trutna W R *et al.*. Reduced sidelobe integrated acousto-optic filter with birefringence apodization. *Opt. Lett.*, 1993, 18 (20) 1721~1723
- [7] Herrmann H, Schafer K, Sohler W. Taped acoustical directional couplers for polarization independent, integrated optically acoustically tunable wavelength filters/switches. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1994, (11) 1335~1337
- [8] Kar-Roy A, Tsai C S. Ultralow sidelobe-level integrated acousto-optic tunable filters using taped-gap surface acoustic wave directional couplers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1994, 12 (6) 977~982
- [9] Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang *et al.*. Development of integrated optical acousto-optic tunable wavelength filter.

Characteristics of Multiwavelength Operation of Integrated Acousto-Optical Tunable Filter

Li Yunna¹⁾ Hu Hongzhang¹⁾ Geng Fan²⁾ Yang Jisheng¹⁾

(1), *Department of Applied Physics , School of Science , Tianjin University , Tianjin 300072*)
(2), *China Spaceflight Industry Cooperation , 8358 Institute , Tianjing 300192*)

(Received 8 March 2001 ; revised 16 April 2001)

Abstract : Integrated acousto-optical tunable filters (AOTF) have potential application in WDM optical networks because of some advanced properties , especially , the unique property of simultaneous multiwavelength filtering. The exact coupling equations with two acoustic waves travelling simultaneously were derived. Based on the coupling equations , some numerical results of conversion characteristics are given and the fluctuation of the main peak , the center wavelength and the FWHM (full width of half maximum) are analyzed with respect to time. The reasons for serious distortion and the higher crosstalk for narrower channel spacings are discussed. Considering the drawbacks of the collinear integrated acousto-optical tunable filter in multiwavelength operation , use of quasi-collinear acousto-optical mode converter for improving the conversion characteristics of AOTF is proposed.

Key words : integrated-optics ; multiwavelength operation ; TE/TM mode converter ; acousto-optic tunable filter