

材料特性对声光可调滤波器光谱分辨率的影响

张春光 王号* 邱怡申

(福建师范大学医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建省光子技术重点实验室,
物理与光电信息科技学院, 福建 福州 350007)

摘要 声光可调谐滤波器(AOTF)是一种利用各向异性介质中的声光作用工作的快速可调谐的分光元件,通过调节所加载的超声波频率可实现对出射光波长进行灵活、快速地调节。光谱分辨率是评价声光可调滤波器性能的主要指标之一。以二氧化碲非共线声光可调滤波器为研究对象,基于声光作用基本原理,系统推导了非共线声光可调滤波器光谱分辨率公式,并分析了光谱分辨率的主要影响因素。讨论了二氧化碲材料的自身材料学特性,特别是旋光特性对光谱分辨率的具体影响机制和规律。

关键词 光电子学;可调谐滤波器;光谱分辨率;声光材料

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.032502

Influence of Material Property on Spectral Resolution of Acousto-Optic Tunable Filter

Zhang Chunguang Wang Hao* Qiu Yishen

(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract The acousto-optic tunable filter (AOTF) is one kind of fast tunable prismatic elements based on acousto-optic interaction in anisotropic material. The wavelength of the output light can be tuned fastly and flexibly by changing the frequency of the applied acoustic wave. The spectral resolution is one of the main indice for evaluating the performance of AOTF. The TeO₂ based noncollinear AOTF is selected as an object. From the basic theory of acoustic-optic interaction, the equation of the spectral resolution is deduced systematically, and the related factors are analyzed. The relationship of the essence property of TeO₂ material (particularly the rotatory property of TeO₂) and the spectral resolution is discussed.

Key words optoelectronics; tunable filter; spectral resolution; acousto-optic material

OCIS codes 250.250; 300.6550; 050.7330; 260.1440; 160.1050

1 引言

声光可调谐滤波器(AOTF)是一种利用各向异性介质中的反常布拉格衍射理论的声光器件,它在光谱分析以及光谱成像等众多领域中广泛应用^[1~12]。AOTF的主要结构包括声光晶体和键合在其上的压电换能器。压电换能器将加载于它上面的电信号转换成同频率的超声波。当满足布拉格衍射条件时,入射光波会因受到声光晶体中传播的超声波作用而发生布拉格衍射。衍射光的波长与驱动电信号的频率一一对应,改变驱动电信号的频率就可以改变衍射光的波长,达到滤波的作用。光谱分辨率是评价 AOTF 的主要性能指标之一。良好的光谱分辨性能是基于 AOTF 的探测仪器具备良好识别能力的保障,因此光谱分辨率的准确计算就显得尤为重要。前人在光谱分辨率计算公式方面做了许多有益的工作,这些公式在一定程度上对 AOTF 的光谱分辨性能的评估起到了积极的作用。传统计算公式认为,光谱分辨率主要受到声光材料的双

收稿日期: 2010-06-28; 收到修改稿日期: 2010-12-06

基金项目: 福建省自然科学基金(2010J05131;2010J05129)计划资助课题。

作者简介: 张春光(1980—),女,博士,讲师,主要从事声光器件设计及应用等方面的研究。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: haowang@fjnu.edu.cn

折射特性的影响。本文以二氧化碲(TeO_2)非共线 AOTF 为研究对象,分析了材料的双折射特性和旋光特性对于光谱分辨率的综合影响,给出了光谱分辨率的改进计算式,为光谱分辨性能的正确评估提供了新的思路。

2 非共线声光相互作用关系

2.1 传统非共线声光作用关系

图 1 是 TeO_2 声光可调谐滤波器的非共线声光作用矢量布局方案。声光作用发生在 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 面内。如图 1(a)所示,这里认为 TeO_2 是单轴正晶体,具有双折射特性,不计 TeO_2 的旋光性。在 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 面内传播的光波存在两种线偏振的本征模式:反常 e 光和寻常 o 光。e 光和 o 光的波面分别为椭圆和圆,两者在光轴方向相切。入射光波矢 k_i 、衍射光波矢 k_d 和声波矢 K_a 之间满足 $k_i + K_a = k_d$ 。对于选定的超声波矢,对应的入射光波矢和衍射光波矢要求满足动量匹配切线平行条件,即入射光波矢和衍射光波矢在对应波矢曲面的切线相互平行。动量匹配切线平行条件使得折射率随着双折射角度的变化补偿了因角度变化而引起的动量失配,体现了大角孔径非共线 AOTF 设计的理论基础。

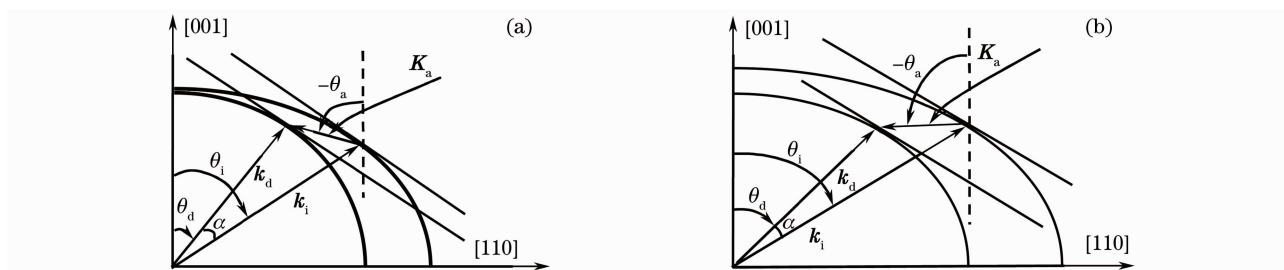


图 1 非共线声光相互作用矢量布局。(a)不计 TeO_2 晶体的旋光性,(b)考虑了 TeO_2 的旋光特性
Fig. 1 Wave vector diagram of the noncollinear acousto-optic interaction without (a) or with (b) considering the rotatory property of TeO_2

入射光波矢 k_i 、衍射光波矢 k_d 和超声波矢 K_a 的大小分别满足:

$$k_i = 2\pi n_i / \lambda_0, \quad k_d = 2\pi n_d / \lambda_0, \quad K_a = 2\pi f_a / V_a, \quad (1)$$

式中 λ_0 为真空中的光波长, n_i 和 n_d 分别为晶体内的入射光折射率和衍射光的折射率, f_a 和 V_a 分别为超声波的频率和声速。当设入射光为 e 光, 衍射光为 o 光, 由图 1(a):

$$n_i = (\cos^2 \theta_i / n_o^2 + \sin^2 \theta_i / n_e^2)^{-1/2}, \quad (2)$$

$$n_d = n_o, \quad (3)$$

式中 θ_i 为入射光极角, 表示入射光方向与光轴的夹角; n_o 和 n_e 分别为垂直于光轴方向上的 o 光和 e 光的折射率, 它们都是光波长的函数。

由动量匹配切线平行条件可得,

$$\tan(-\theta_a) = (n_i \sin \theta_i - n_d \sin \theta_d) / (n_i \cos \theta_i - n_d \cos \theta_d), \quad (4)$$

$$\tan \theta_d = (n_o / n_e)^2 \tan \theta_i, \quad (5)$$

式中 θ_d 为衍射光极角, θ_a 为超声波极角。引入 $\delta = (n_e - n_o) / n_o$, 并忽略 δ^2 以上项, (2) 式可写成:

$$n_i \approx n_o (1 + \delta \sin^2 \theta_i), \quad (6)$$

将(3), (5), (6)式代入(4)式中, 得到

$$\tan(-\theta_a) = -(2 + \tan^2 \theta_i) / \tan \theta_i, \quad (7)$$

(7)式可用来确定在固定超声波方向的入射光方向。

由三角形余弦定理, 并利用(5)和(6)式, 可以得到超声频率与衍射光波长的调谐关系^[6]:

$$f_a = (V_a / \lambda_0) (n_e - n_o) (\sin^4 \theta_i + \sin^2 2\theta_i)^{1/2}. \quad (8)$$

P. A. Gass^[7]在文献[6]的理论的基础上, 从提高非共线 AOTF 的设计精度的角度出发, 给出了设计理论。其特色在于采用入射折射率一般表达式(2)代替折射率的一级近似式(6), 相应的超声极角 θ_a 与入射光极角 θ_i 的关系为

$$\tan(-\theta_a) = -[2 + \tan^2\theta_i + \delta(4 - \tan^2\theta_i)]/\tan\theta_i. \quad (9)$$

2.2 改进的非共线声光作用关系

实际上, TeO₂ 声光材料不仅具有双折射特性, 还具有旋光特性。以往不计及材料旋光性质的相关研究会对非共线声光作用理论有一定的影响。图 1(b) 是考虑材料的旋光性情况的 TeO₂ 非共线声光可调谐滤波器的声光相互作用矢量布局。对于一般的入射光方向, TeO₂ 晶体内两个本征振动模式分别为右旋椭圆偏振模式(右旋 e 光)和左旋椭圆偏振模式(左旋 o 光)。设入射光为右旋 e 光, 衍射光为左旋 o 光。入射光折射率 n_i 和衍射光折射率 n_d 分别满足:

$$n_i = [\cos^2\theta_i/[n_o^2(1+\sigma)^2] + \sin^2\theta_i/n_e^2]^{-1/2}, \quad n_d = [\cos^2\theta_d/[n_o^2(1-\sigma)^2] + \sin^2\theta_d/n_o^2]^{-1/2}, \quad (10)$$

式中 σ 是一个与晶体旋光率 ρ 有关的量。

根据图 1(b) 所示的几何关系和切线平行动量匹配关系, 考虑材料旋光性质, 非共线声光可调谐滤波器设计理论——即改进的非共线声光作用关系为

$$\tan(-\theta_a) = \frac{\tan\theta_i \{ [n_o^4 n_e^2 (1+\sigma)^6 \tan^2\theta_i + n_e^6 (1-\sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^4 (1+\sigma)^6 \tan^2\theta_i + n_o^4 n_e^2 (1+\sigma)^4]^{1/2} \}}{[n_o^4 n_e^2 (1+\sigma)^6 \tan^2\theta_i + n_e^6 (1-\sigma^2)^2]^{1/2} - [n_o^4 n_e^2 (1-\sigma)^4 (1+\sigma)^2 \tan^2\theta_i + n_e^6 (1-\sigma)^4]^{1/2}}. \quad (11)$$

理论计算发现, 对于确定的超声方向, 由(7)和(11)式计算的入射光极角会存在明显差别。如对应相同的超声极角 $\theta_a = 80^\circ$, 由(7)和(11)式计算出的入射光极角 θ_i 分别为 20.7° 和 23.8° , 说明在应用中考虑声光材料双折射性质和旋光性质的必要性。

3 光谱分辨率

3.1 传统的光谱分辨率计算公式

AOTF 是利用布拉格衍射的波长选择性, 当超声波和入射光方向一定时, 对于某个超声频率 f_a , 只有某个波长 λ_0 的入射光能够使动量匹配条件 $\Delta k_1 = 0$ 严格成立而被衍射, 从而起到滤波器的作用。然而, 布拉格衍射总有一定的布拉格带宽, 设对于波长为 $\lambda_0 \pm \delta\lambda_0$ 的入射光, 位相失配 $\delta_1 = \pm 0.45$, 则此波长光的衍射强度将下降为中心波长 λ_0 处的一半, $\Delta\lambda = 2\delta\lambda_0$ 即为谱线的光谱宽度。

如图 1(a), 设 Δk_1 为沿垂直于介质表面方向的动量失配 Δk_1 的模,

$$\Delta k_1 = (\mathbf{k}_i + \mathbf{K}_a - \mathbf{k}_d) \cdot \mathbf{k}_i / k_i = k_i - k_d \cos\alpha + \mathbf{K}_a \cdot \mathbf{k}_i / k_i, \quad (12)$$

令 ϕ_i 和 ϕ_a 分别表示入射光波矢和声波矢的方位角, 再根据 \mathbf{K}_a 和 \mathbf{k}_i 的方向余弦, 可知:

$$\mathbf{K}_a \cdot \frac{\mathbf{k}_i}{k_i} = K_a [-\cos\theta_a \cos\theta_i + \sin\theta_a \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_i)], \quad (13)$$

$$\Delta k_1 = k_i - k_d + K_a [-\cos\theta_a \cos\theta_i + \sin\theta_a \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_i)], \quad (14)$$

入射和衍射光折射率在忽略介质旋光性时分别满足式(2)和(3)式。 n_i 采用一级近似, 可得:

$$\frac{n_i}{n_d} = 1 + \frac{\Delta n}{n_o} \sin^2\theta_i, \quad \Delta n = n_e - n_o. \quad (15)$$

引入 $a = K_a/k_d$, 得到动量失配 Δk_1 的表达式:

$$\Delta k_1 = \frac{2\pi n_o}{\lambda_0} \left\{ \frac{\Delta n}{n_o} \sin^2\theta_i - a [\cos\theta_a \cos\theta_i + \sin\theta_a \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_i)] \right\}. \quad (16)$$

AOTF 的大角孔径要求 θ_i 和 ϕ_i 满足下列条件:

$$\left. \frac{\partial \Delta k_1}{\partial \phi_i} \right|_{\Delta k_1=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Delta k_1}{\partial \theta_i} \right|_{\Delta k_1=0} = 0, \quad (17)$$

将(16)式代入(17)式可得:

$$\phi_i = \phi_a, \quad a \sin(\theta_a - \theta_i) = \frac{\Delta n}{n_o} \sin 2\theta_i, \quad (18)$$

将(16)式在 $\Delta k_1 = 0$ 附近按泰勒级数展开, 取到 $\delta\lambda_0$ 的一次项和 $\delta\theta_i, \delta\phi_i$ 的二次项,

$$\Delta k_1 = \left. \frac{\partial \Delta k_1}{\partial \lambda_0} \right|_{\Delta k_1=0} \cdot \delta\lambda_0 + \left. \frac{\partial^2 \Delta k_1}{\partial \theta_i^2} \right|_{\Delta k_1=0} \cdot \frac{\delta\theta_i^2}{2} + \left. \frac{\partial^2 \Delta k_1}{\partial \phi_i^2} \right|_{\Delta k_1=0} \cdot \frac{\delta\phi_i^2}{2}, \quad (19)$$

对(16)式求导,得

$$\left. \frac{\partial \Delta k_1}{\partial \lambda_0} \right|_{\Delta k_1=0} = 2\pi \sin^2 \theta_i \frac{\partial}{\partial \lambda_0} \left(\frac{\Delta n}{\lambda_0} \right) = \frac{\sin^2 \theta_i}{\lambda_0^2} b, \quad (20)$$

式中 b 为色散系数, $b = 2\pi \lambda_0^2 \frac{\partial}{\partial \lambda_0} \left(\frac{\Delta n}{\lambda_0} \right) = 2\pi \left(\Delta n - \lambda_0 \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda_0} \right)$ 。

利用光谱半宽度条件 $\delta_1 = \Delta k_1 L / 2\pi = \pm 0.45$, 可知光谱宽度的计算公式:

$$\Delta \lambda = 2\delta \lambda_0 = 1.8\pi \lambda_0^2 / (bL \sin^2 \theta_i). \quad (21)$$

3.2 改进的光谱分辨率计算公式

TeO_2 晶体具有旋光性, 晶体旋光性应当对光谱宽度公式有一定的影响。相应地, 可以给出光谱宽度的改进表达形式, 以改善 AOTF 光谱分辨率的计算精度。根据 AOTF 的大孔径条件, $\phi_i = \phi_a$ 仍然满足, 说明入射光波矢与超声波矢处于同一平面内。从动量失配 Δk_1 的表达式(14)以及动量失配 Δk_1 泰勒级数展开式(19)可得:

$$\left. \frac{\partial \Delta k_1}{\partial \lambda_0} \right|_{\Delta k_1=0} = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0^2} \right) \left\{ \left[\frac{\partial (n_i - n_d)}{\partial \lambda_0} \right] \lambda_0 - (n_i - n_d) \right\} = -b' / \lambda_0^2, \quad (22)$$

式中 b' 为定义的等效色散系数,

$$b' = 2\pi \left\{ (n_i - n_d) - \left[\frac{\partial (n_i - n_d)}{\partial \lambda_0} \right] \lambda_0 \right\}, \quad (23)$$

由(10)式可计算等效色散系数 b' 。 b' 与光波长 λ_0 和入射光极角 θ_i 有关, 这体现了双折射性质的影响; 同时 b' 与 σ 有关, 也体现了晶体旋光性的影响。进一步, 可以根据光谱半宽度条件给出考虑旋光性影响后的光谱宽度改进表达式:

$$\Delta \lambda = 2\delta \lambda_0 = 1.8\pi \lambda_0^2 / (b'L). \quad (24)$$

4 影响光谱分辨率的主要因素分析

从光谱分辨率的表达式(21)和(24)不难看出, 光谱分辨率与声光材料的性质存在必然的联系。

4.1 材料特性对色散系数的影响

分析光谱分辨率计算式(21)和(24)看出, 光谱分辨率与声光材料的色散性质有一定关系。为了更好地获知材料特性对光谱分辨率的影响, 首先分析声光晶体色散系数的影响因素很有必要。图 2(a)给出了忽略声光晶体的旋光性时的材料色散系数 b 与入射光波长 λ_0 的关系。分析图 2(a)和表达式(20), 传统色散系数 b 只与光波长有关。如图 2(a), 色散系数 b 随着光波长的增加而减小。

在考虑声光晶体旋光特性的情况下, 等效色散系数 b' 不仅与光波长 λ_0 有关, 还与 AOTF 的入射光极角 θ_i 有关。由图 2(b)和图 3, 对于确定的入射光极角 θ_i , 等效色散系数 b' 随着光波长 λ_0 的增加而减小; 对于确定

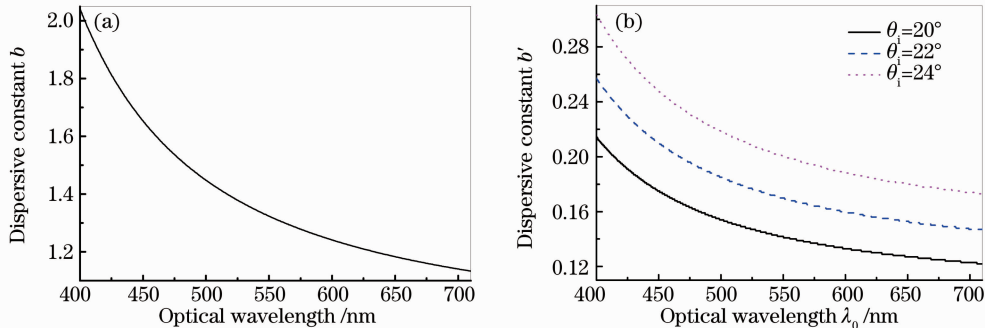


图 2 色散系数与光波长的关系。(a)传统色散系数 b 与光波长 λ_0 的关系(不考虑旋光), (b)在一系列确定的入射光极角 θ_i 下, 等效色散系数 b' 与光波长 λ_0 的关系(考虑旋光)

Fig. 2 Relationship between dispersive constant and optical wavelength. (a) dispersive constant b versus the optical wavelength λ_0 (without considering rotatory property), (b) dispersive constant b' versus the optical wavelength λ_0 at different incident polar angle θ_i (considering rotatory property)

的入射光波长 λ_0 , 等效色散系数 b' 随着入射光极角 θ_i 的增加而增加。

4.2 声光材料旋光特性对光谱分辨率的影响

忽略声光晶体旋光特性和考虑其旋光特性情况下的光谱分辨率的两个计算公式在形式上的差别也体现了材料自身的旋光特性对于光谱分辨率存在影响。分析考虑和忽略旋光性两种情况下各种因素对光谱分辨的影响规律并加以比较, 对于更好地认识和把握 AOTF 的光谱分辨特性有重要意义。

4.2.1 光谱分辨率与入射光极角的关系

根据(21)和(24)式, 分别得到了不考虑和考虑旋光性时确定的光波长下光谱宽度随入射光极角变化的规律。从图 4 看出, 无论是否考虑声光晶体的旋光性, 对于每个确定光波长 λ_0 , 光谱宽度 $\Delta\lambda$ 均随着入射光极角 θ_i 的增加而减小。通过比较还发现, 在相等的光波长 λ_0 下, 考虑晶体旋光性时的光谱宽度明显大于忽略旋光性时的光谱宽度, 这直观地说明了晶体的旋光性对 AOTF 的光谱分辨率存在影响, 在较高精度要求的情况下不能忽略。

4.2.2 光谱分辨率与光波长的关系

图 5 给出了分别在忽略和考虑声光晶体旋光特性情况下光谱宽度与光波长的关系。如图 5 所示, 无论是否考虑声光晶体旋光性, 对于每个确定入射光极角 θ_i , 光谱宽度 $\Delta\lambda$ 均随着光波长 λ_0 的增加而增加。在相等的入射光极角 θ_i 下, 考虑晶体旋光性情况的光谱宽度 $\Delta\lambda$ 明显大于忽略旋光性情况的光谱宽度 $\Delta\lambda$, 这再次表明晶体的旋光特性对 AOTF 的光谱分辨率存在影响。对于高精度要求的 AOTF 设计, 考虑声光晶体自身的旋光特性很必要。

5 结 论

从非共线 AOTF 的基本工作原理出发, 在忽略 TeO_2 声光材料自身的旋光特性和考虑旋光特性两种情况下, 推导出光谱宽度的表达式, 这对保证 AOTF 的光谱分辨率的计算精度具有现实意义。基于光谱宽度的计算式, 对光谱分辨率的主要影响因素展开讨论。通过是否考虑声光晶体的旋光特性两种情况的对比, 得到了声光材料的旋光特性对 AOTF 光谱分辨率产生作用的有关规律。研究表明, 在对 AOTF 设计提出较高精度要求的情况下, TeO_2 非共线 AOTF 的光谱分辨性能的评估需要考虑声光材料自身旋光性的作用。本研究对于更好地改善 AOTF 的光谱分辨性能具有现实指导意义。

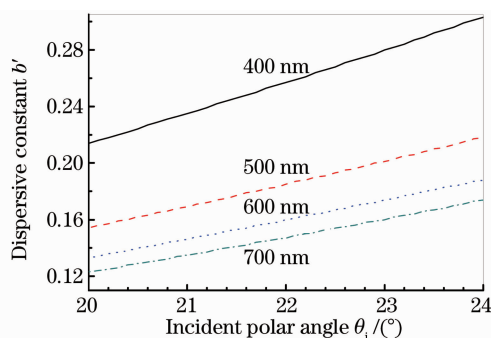


图 3 在一系列确定光波长 λ_0 下, 等效色散系数 b' 与入射光极角 θ_i 的关系

Fig. 3 Dispersive constant b' versus the incident polar angle θ_i at different optical wavelength λ_0

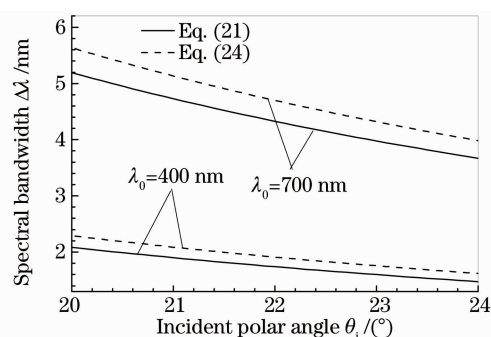


图 4 在一系列确定光波长 λ_0 下, 光谱宽度 $\Delta\lambda$ 与入射光极角 θ_i 的关系

Fig. 4 Spectral bandwidth $\Delta\lambda$ versus the incident polar angle θ_i at different optical wavelength λ_0

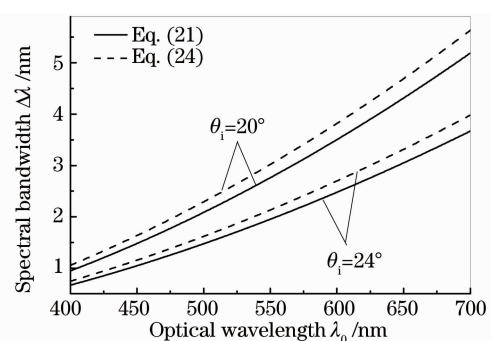


图 5 在一系列确定的入射光极角 θ_i 下, 光谱宽度 $\Delta\lambda$ 与入射光波长 λ_0 的关系

Fig. 5 Spectral bandwidth $\Delta\lambda$ versus the optical wavelength λ_0 at different incident polar angle θ_i

参 考 文 献

- 1 N. Gupta, V. B. Voloshinov. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(7): 1081~1088

- 2 V. B. Voloshinov, K. B. Yushkov, B. B. J Linde. Improvement in performance of a TeO_2 acousto-optic imaging spectrometer[J]. *J. Opt. A*, 2007, **9**(4): 341~347
- 3 J. W. You, J. Ahn, S. Kim *et al.*. Efficient double-filtering with a single acousto-optic tunable filter[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21505~21511
- 4 Chunguang Zhang, Zhonghua Zhang, Yu Yang *et al.*. Design and analysis of a noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2417~2419
- 5 Chunguang Zhang, Zhonghua Zhang, Hao Wang *et al.*. Analysis of the optimum optical incident angle for an imaging acousto-optic tunable filter[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19): 11883~11888
- 6 I. C. Chang. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(7): 370~372
- 7 P. A. Gass, J. R. Sambles. Accurate design of noncollinear acousto-optic tunable filter[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 429~431
- 8 N. Uchida. Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO_2) [J]. *Phys. Rev. B*, 1971, **4**(10): 3736~3745
- 9 D. R. Suhre, J. G. Throdore. White-light imaging by use of a multiple passband acousto-optic tunable filter[J]. *Appl. Optics*, 1996, **35**(22): 4494~4501
- 10 I. C. Chang. Analysis of the noncollinear acousto-optic filter[J]. *Electron. Lett.*, 1975, **11**(25): 617~618
- 11 I. C. Chang, P. Katzka. Enhancement of acousto-optic filter resolution using birefringence dispersion in CdS[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(11): 535~536
- 12 L. J. Denes, B. Kaminsky, M. S. Gottlieb *et al.*. Image processing using acousto-optical tunable filtering[C]. *SPIE*, 1997, **2962**: 111~121