

声光滤光器性能指标的计算和讨论

史 坚 金建辉 许炳活 彭国生

(中科院上海硅酸盐研究所 上海 200050)

1997年10月17日收到

摘要 以可调谐声光滤光器为元件所制造的光谱分析仪, 利用声光滤光器的电调谐分光作用, 辅以计算机控制, 以完成信息的实时处理。其中声光滤光器性能指标的好坏将直接影响光谱分析仪的设计制造。本文对用不同切向的氧化碲晶体所制成几种声光滤光器的几项性能指标进行计算和讨论, 使在设计制造光谱分析仪时对声光滤光器的声光和电性能先有一个总体认识, 以减少不必要的实验和摸索。

关键词 可调谐声光滤光器, 调谐性能, 角孔径, 分辨率

Calculation and discussion of some properties of acousto-optic tunable filter

Shi Jian Jin Jianhui Xu Binghuo Peng Guosheng

(Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract Taking advantage of the acousto-optic tunable filter (AOTF) as wavelength sorter, we can process the information in real time with the computer controlling. The AOTF is thus usually uses as an element of the spectrometer. The design of this spectrometer will be affected by the property of the AOTF. In this report, we calculate the effect of several properties of the AOTF made by a TeO_2 crystal. This may enable us to predict the acousto-optic and electric properties of AOTF before designing and making the spectrometer, and cut down unnecessary tests.

Key words Acousto-optic tunable filter, Optical wavelength tuning, Angular aperture, Resolution

1 引言

可调谐声光滤光器的一个重大优点是, 具有很高的集光能力, 因而不仅可用来分析光源的光谱成分, 而且可以立即得到彩色图像的分色像。最近, 国内外正兴起用可调谐声光滤光

器来制造光谱分析仪^[1]; 利用可调谐声光滤光器的电调谐分光作用, 辅以计算机控制, 完成信息的实时处理。作为这种光谱分析仪的"心脏", 可调谐声光滤光器各性能指标的好坏将直接影响光谱分析仪的设计制造。本文将通过

应用声学

· 11 ·

对可调谐声光滤光器性能指标的计算, 来讨论一下可调谐声光滤光器各性能指标对光谱分析仪设计制造的影响。

声光器件有声光偏转器、声光调制器和可调谐声光滤光器几种。声光偏转器和声光调制器一般以激光束作为光源, 激光具有极好的单色性和方向性。而可调谐声光滤光器则是一个色散元件, 用具有复杂光谱成分的自发辐射作为光源。声光器件都满足于动量匹配条件^[2](见图 1) :

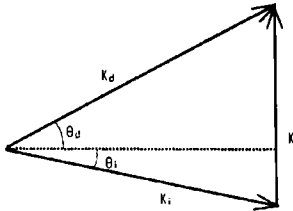


图 1 布拉格衍射动量三角形闭合条件

$\Delta K_1=0$ (文中斜黑体字代表矢量), 相当于下列能量 - 动量守恒定律 (相当于在作用时交换了一个声子) :

$$\omega_d = \omega_i + \Omega \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_i \pm \mathbf{K} \quad (2)$$

其中 (2) 式中各矢量的模为 $k_i = 2\pi n_i / \lambda_0$, $k_d = 2\pi n_d / \lambda_0$, $K = 2\pi / \Lambda = 2\pi f / V$ (n_i 为入射光折射率, λ_0 为光在真空中的波长, n_d 为衍射光折射率, Λ 为超声波长, f 为超声频率, V 为超声波速)。由此可导出:

$$K = \pm(k_i F(\theta_i) - k_d F(\theta_d))$$

$$\text{即 } f\lambda_0 = \pm V(n_i F(\theta_i) - n_d F(\theta_d)) \quad (3)$$

其中 (3) 式中 $F(\theta_i)$ (或 $F(\theta_d)$) 为关于 θ_i (或 θ_d) 的函数。可调谐声光滤光器的工作原理是利用布拉格衍射的选择性, 当超声波和入射光方向一定时 (即 $F(\theta_i)$ 为确定值时), 对于某个超声频率 f (由此确定矢量 \mathbf{K} 从而确定了 $F(\theta_d)$), 只有某个波长为 λ_0 的入射光能使动量匹配条件严格成立而被衍射, 从而起到滤光器的作用。

一般光谱分析仪都希望有较高的精度、小巧的体积和低廉的成本, 这就要求声光滤光器

有较高的光谱分辨率和较大的角孔径; 而正常布拉格衍射器件不可能二者兼得, 因此实际使用的可调谐声光滤光器是反常布拉格衍射器件。现在可调谐声光滤光器的制造基本上都用氧化碲晶体, 该晶体具有双折射性能。下面我们将举用 1.6° 、 11.9° 和 12.9° 切向的氧化碲晶体所制造的可调谐声光滤光器作为例子, 讨论滤光器的性能指标。

2 性能指标的计算和讨论

2.1 三种切向声光滤光器调谐性能的比较

计算公式^[3] :

$$f = \Delta n(\lambda) V(\alpha) \sin^2 \theta_i / (\lambda \sin(\theta_i - \alpha)) \quad (4)$$

其中 $\Delta n(\lambda)$ 是由于双折射引起的折射率差, $V(\alpha)$ 是超声波在切向为 α 的氧化碲晶体中的声速, θ_i 为光入射角, α 为切向角, λ 为光波长。经过计算可以发现, 调谐频率随晶体切向的减小而降低; 调谐频率随光波长的变长而降低。从图 2 可以看到: 对 1.6° 切的可调谐声光滤光器来说, 在光波长 $\lambda=450\text{--}700\text{nm}$ 时, 调谐频率 $f=80\text{--}45\text{MHz}$, 而且当它在长波长 ($\lambda > 700\text{nm}$) 时要达到一定的分辨率, 则其调谐频率的间隔也越窄, 因而从驱动电源制作的难易程度来说, 1.6° 切的可调谐声光滤光器只适合用于可见光范围 ($45\text{--}700\text{nm}$)。而 12.9° 切的可调谐声光滤光器在光波长 $\lambda=1000\text{--}2500\text{nm}$ 时调谐频率 $f=92\text{--}35\text{nm}$; 11.9° 切的可调谐声光滤光器在光波长 $\lambda=1000\text{--}2500\text{nm}$ 时调谐频率 $f=80\text{--}30\text{MHz}$, 因而这两种可调谐声光滤光器可用于红外光谱仪上。另外, 在可调谐声光滤光器制作过程中, 由于受换能器减薄工艺的限制 (频率越高, 换能器的厚度就越薄, 制作起来就比较困难); 我们在设计可调谐声光滤光器时也往往选择适当的晶体切向, 使可调谐声光滤光器工作频率在一个比较合适的范围内。通过对可调谐声光滤光器调谐性能的讨论, 我们可以看到: 在光谱分析仪的设计制造时, 选择合适的声光滤光器, 将可以减轻在电路设计方面的负担, 使整套光谱分析仪系统更便于设计和制造。

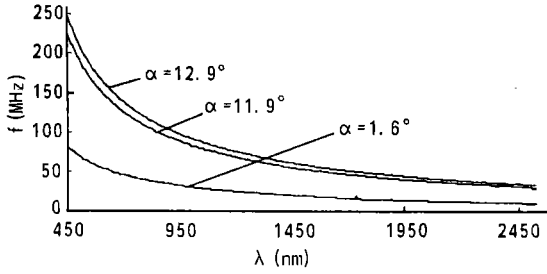


图2 声光滤波器调谐曲线

2.2 角孔径性能的比较

计算公式^[4]：

$$\delta\theta_i = n_0(0.9\lambda_0/(\Delta n L |F_0|)^{1/2} / \sin\theta_i) \quad (5)$$

其中 n_0 为折射率， $F_0 = 2\cot^2\theta_i - 1$ ， L 为换

能器长度， λ_0 为光波长。从图 3(a)-(d) 可以看出：换能器长度 L 越长，可调谐声光滤波器的角孔径就越小；光波长越长，可调谐声光滤波器的角孔径就越大；晶体切向越大，可调谐声光滤波器的角孔径就越大。因此在一定光波长下，为获得较大的角孔径，就需要使换能器长度短一些，使晶体切向大一些。对光谱分析仪来说，声光滤波器的角孔径越大，对光谱分析仪光源的准直性要求就越低；这就意味着在制造光谱分析仪时，可简化光谱分析仪光源的准直光路，缩小光谱分析仪的体积，降低光谱分析仪的制造成本。

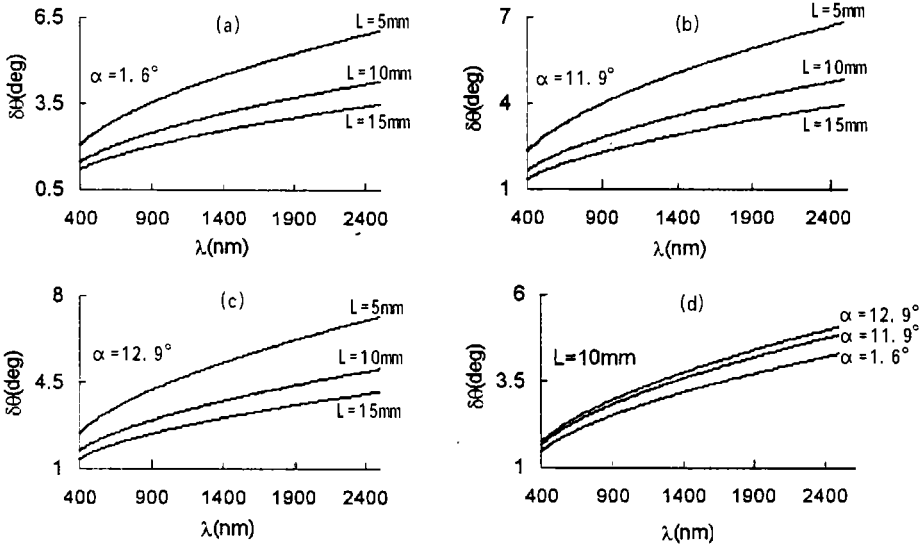


图3 声光滤波器角孔径性能曲线

2.3 分辨率性能的比较

计算公式^[4]：

$$R = \lambda / \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = 0.9\lambda^2 \cos(\theta_i - \alpha) / (D\Delta n L \sin^2\theta_i) \quad (6)$$

其中 L 为换能器长度， $D = 1 + (\Delta n - b)\lambda / \Delta n(\lambda - \lambda_c)$ ， Δn 为折射率差， λ 为光波长， b 为一常数^[5]。从图 4(a)-(d) 可以看出：光波长越长， $\Delta\lambda$ 就越大而分辨率就越

差；换能器长度 L 越长， $\Delta\lambda$ 就越小而分辨率就越好；晶体切向越大， $\Delta\lambda$ 就越小而分辨率就越好。因此在一定光波长下，为获得较高的分辨率就需要使换能器长度长一些，晶体切向大一些。分辨率的提高，对光谱分析仪来说就意味着精度的提高。在实际工作中，有些样品往往会有复杂的光谱成分，只有提高光谱分析仪的精度，才能将这些谱线一一分辨出来，确定样品的成分。

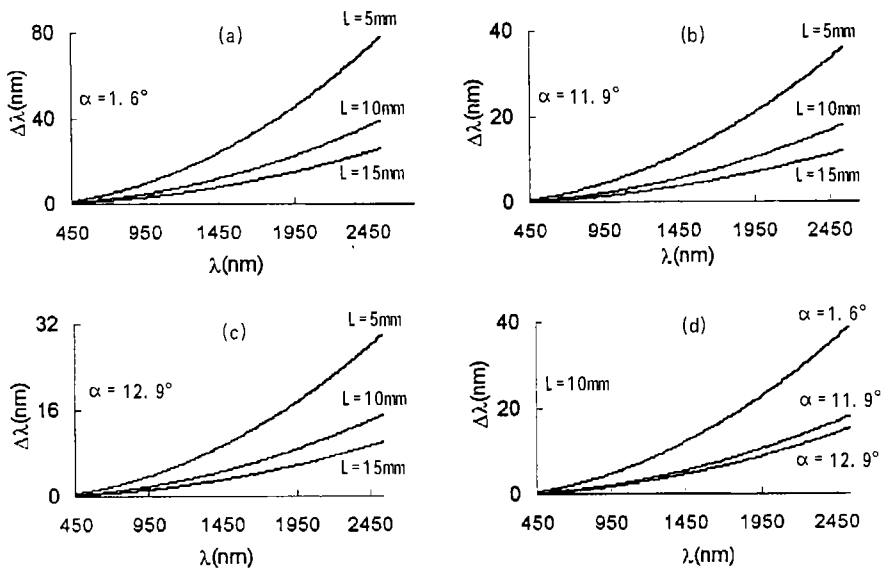


图4 声光滤光器分辨率性能曲线

2.4 其他一些性能指标的介绍

可调谐声光滤光器还有一些其他重要的性能指标如：超声渡越时间，器件扫描特性，衍射光偏转角等。通过对超声渡越时间和器件扫描特性的计算，可初步确定驱动电源的响应速度和稳定度，对光谱分析仪的电性能有所了解；通过对衍射光偏转角的计算，可以对设计光谱分析仪系统的光路有所帮助。对于其他的一些性能指标，这里就不再一一介绍了。

3 小结

综上所述，我们发现晶体切向对调谐性能的影响比对角孔径和分辨率的影响要大；因此在利用可调谐声光滤光器制造光谱分析仪时，考虑到驱动电源制作的难易程度（因为晶体切向大则调谐频率高，而高频电路制作有一定的难度；晶体切向小则调谐间隔频率窄，电路的精度就要求高，制作时也较难），所以一般应选取适中的晶体切向。由于换能器长度对角孔径和分辨率有着相反的影响，因此在选择时可根据实际情况取折中方案。从 11.9° 和 12.9° 切向可调谐声光滤光器的性能指标曲线图可以看到：虽然切向只变化了 1° ，但其对各性能指标的影响却十分显而易见，特别是分辨率 $\Delta\lambda$ 几

乎变化了 20% 左右；因此在改动可调谐声光滤光器的晶体切向时，特别要注意对分辨率的影响，防止其使整个系统的性能下降，无法进行正常工作。在实际工作中，有一次我们为了减小声光滤光器的声光介质（氧化碲晶体）的尺寸（由于氧化碲晶体很贵，这样可降低成本），将声光滤光器的切向由 12.9° 改为 11.9° ，结果整批声光滤光器都无法使用，造成不小的损失。希望通过本文的讨论，对利用可调谐声光滤光器制造光谱分析仪有所帮助，使在研制过程中首先对可调谐声光滤光器的声光和电性能有一个总体的了解和认识，减少不必要的试验和摸索。

参 考 文 献

- 1 Rider D M. *SPIE Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment*, 1990, 1298: 132-135.
- 2 Chang I C. *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, 1976, SU(23): 2.
- 3 Yano T, Watanable A. *Applied Optics*, 1976, 15(9): 2250-2258.
- 4 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用. 北京: 科学出版社, 1982, 148.
- 5 Uchida N. *Physical Review*, 1971, B4(10): 3736-3745.