

宽光谱声光可调滤光器

张泽红, 赵治国, 雷 波, 王智林, 何晓亮

(中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060)

摘 要: 由于压电换能器的工作带宽有限, 从而限制了声光可调滤光器工作的光谱范围。该文介绍了一种通过在同一个通声面上制作多片厚度不同的换能器的方式来提高声光可调滤光器的工作带宽, 进而达到提高光谱范围的方法。采用这种新方法, 理论上可制作出全光谱的声光可调滤光器。实验表明, 使用两片换能器的声光可调滤光器, 其工作带宽接近 0.9 个倍频程, 光谱范围 0.45~0.95 μm , 衍射效率大于 70%, 光谱分辨率小于 7 nm, 光孔径 $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

关键词: 声光可调滤光器; 带宽; 光谱范围; 衍射效率; 光谱分辨率

中图分类号: TN972

文献标识码: A

Acousto-optic Tunable Filter with Wide Spectral Range

ZHANG Zehong, ZHAO Zhiguo, LEI Bo, WANG Zhilin, HE Xiaoliang

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The acousto-optic tunable filter is restricted by the spectral range due to the limit of operating bandwidth of piezoelectric transducer. This article introduces a new way of improving the spectral range by improving the operating bandwidth of acousto-optic tunable filter after setting more transducers with various thickness on one sound surface. With this new method, the acousto-optic tunable filter with full spectrum can be realized in theory. The experimental results show that the proposed acousto-optic tunable filter with two transducers has an operating bandwidth of nearly 0.9 octave; its spectral range covers from 0.45 μm to 0.95 μm , diffraction efficiency is great than 70%, spectral resolution is less than 7 nm, and light aperture is $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$.

Key words: acousto-optic tunable filter; bandwidth; spectral range; diffraction efficiency; spectral resolution

0 引言

声光可调滤光器的功能是通过电调谐的方式从复杂光谱中滤出所需波长的光谱图像。与其他分光技术相比, 它具有孔径角大, 分辨率高, 全固化无可移动部件, 分光快速及波长任意切换等优点^[1]。声光可调滤光器滤出光的波长与工作频率成一一对应的关系, 即声光可调滤光器的工作带宽决定了它工作的光谱范围, 但由于声光器件的换能器带宽的限制, 声光可调滤光器工作时一般不超过倍频程的带宽, 即相对带宽 $\Delta f \leq 0.667 f_c$ (其中 f_c 为中心频率), 这样就限制了声光可调滤光器工作的光谱范围。在实际应用中, 往往希望声光可调滤光器工作的光谱范围越宽越好。为了提高声光可调滤光器工作的光谱范围, 我们在一个滤光器上设计制作了多个厚度不同的换能器, 每个换能器工作一定的带宽, 多个换能器同时工作就能大幅扩展声光可调滤光器的光谱范围, 实现宽光谱滤光。

1 结构设计

对于声光可调滤光器, 在满足动量匹配的条件下, 衍射光波长 λ_0 与声波频率 f_a 、声速 v_a 、入射角 θ_i

和衍射光在晶体内的衍射角 θ_d 之间的关系为^[2]

$$f_a = \frac{v_a}{\lambda_0} \sqrt{n_i^2 + n_o^2 - 2n_i n_o \cos(\theta_i - \theta_d)} \quad (1)$$

由式(1)可知, 衍射光波长与声波频率成一一对应的关系, 如图1所示, 输入任意一个声波频率都能滤出一个对应光波长。因此, 声光可调滤光器产生的声波频率范围越宽, 其工作的光谱范围就越宽。但由于声光器件的换能器带宽的限制, 声光可调滤光器工作时一般不超过倍频程的带宽, 即 $\Delta f \leq 0.667 f_c$, 这样就限制了声光可调滤光器工作的光谱范围。

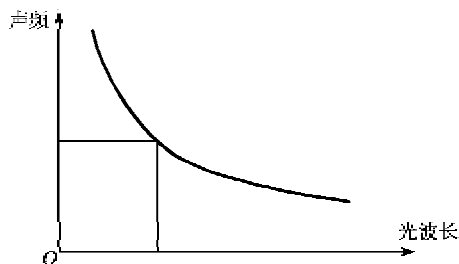


图1 光波长与声频的关系

在实际应用中, 希望声光可调滤光器工作的光

收稿日期: 2012-03-30

作者简介: 张泽红(1968-), 男, 四川达州人, 高级工程师, 学士, 主要从事声光技术的研究。

谱范围越宽越好。为了提高声光可调滤光器工作的光谱范围,我们在一个滤光器上设计制作了多个厚度不同的换能器,每个换能器工作一定的带宽,多个换能器同时工作就能大幅扩展声光可调滤光器的光谱范围,实现宽光谱滤光。其工作原理如图2所示,入射光与换能器产生的声波发生声光相互作用得到衍射光,0级光是没有发生衍射的入射光,0级光和衍射光之间的夹角为分离角。

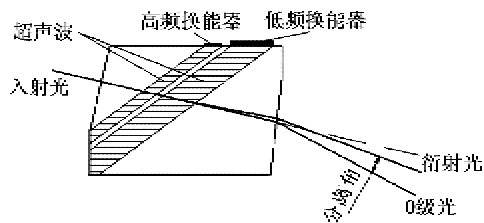


图2 入射光与声波发生声光相互作用的原理图

以制作两片换能器的宽光谱声光可调滤光器为例,其主要结构如图3所示。高频换能器工作的频率范围为 $f_1 \sim f_2$,对应滤出的光波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$;低频换能器工作的频率范围为 $f_2 \sim f_3$,对应滤出的光波长为 $\lambda_2 \sim \lambda_3$,如图4所示,这样2个换能器同时工作的光谱范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_3$,实现了宽光谱滤光。

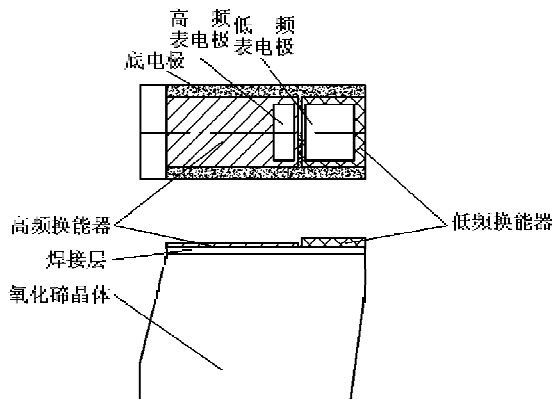


图3 宽光谱声光可调滤光器的主要结构

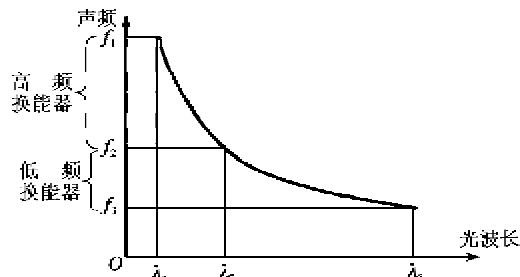


图4 宽光谱声光可调滤光器光波长与声频的关系

2 试验结果

2.1 光谱范围与工作频率

我们利用氧化碲晶体设计制作了一种宽光谱声

光可调滤光器,光孔径 $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,入射光为 e 光,入射光的极角 $\theta_i = 22.6^\circ$,波长范围为 $0.45 \sim 0.95 \mu\text{m}$,对应的工作频率为 $181.0 \sim 71.2 \text{ MHz}$,其工作带宽接近0.9个倍频程。以波长 $0.63 \mu\text{m}$ 、频率 114.8 MHz 点分段, $114.8 \sim 181.0 \text{ MHz}$ 为高频段, $71.2 \sim 114.8 \text{ MHz}$ 为低频段。光谱范围与工作频率的对应关系如表1所示,与工作频率的关系曲线如图5所示。

表1 光波长与工作频率的对应关系

频段	波长/ μm	工作频率/MHz (理论值)	工作频率/MHz (实测值)
高频段	0.45	181.0	182.8
	0.47	169.5	171.0
	0.49	159.5	160.7
	0.51	150.8	151.8
	0.53	143.1	143.9
	0.55	136.2	136.7
	0.57	130.1	130.7
	0.59	124.5	124.8
	0.61	119.4	119.7
	0.63	114.8	114.9
低频段	0.63	114.8	114.9
	0.65	110.5	110.7
	0.67	106.5	106.8
	0.69	102.9	103.1
	0.71	99.5	99.6
	0.73	96.3	96.4
	0.75	93.4	93.4
	0.77	90.6	90.6
	0.79	88.0	87.9
	0.81	85.5	85.4
	0.83	83.2	83.1
	0.85	81.1	80.9
	0.87	79.0	78.8
	0.89	77.0	76.8
	0.91	75.4	74.9
	0.93	73.1	73.0
	0.95	71.2	71.1

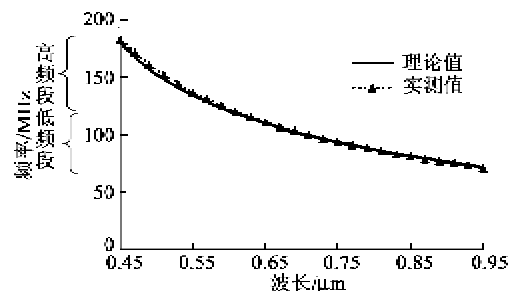


图5 光谱范围与工作频率的关系曲线

2.2 衍射效率

声光可调滤波器的设计为反常布喇格衍射模式,布喇格模式的一级衍射效率为

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_0 \sqrt{2H}} \sqrt{M_2 L P_s} \right) \quad (2)$$

式中: M_2 为氧化碲晶体的声光优值; λ_0 为光波长; P_s 为超声功率; H 为光孔径; L 为声光互作用长度。

换能器采用 X 切 LN, 其机电耦合系数为 0.68。

当氧化碲晶体工作在横波模式时, 它的声光优值很高, 但随着声波频率的增加, 声波衰减急剧增加。声波衰减系数 k_2 与声波频率 f 和到换能器的距离 m 有关, 则

$$k_2 = kmf^2 \quad (3)$$

式中 k 为 1 GHz 声波在距离换能器 10 mm 处的声波衰减系数。显然, 频率越高, 到换能器的距离越大, 声波衰减系数也越大, P_s 就越小, 衍射效率就越低。

对于高频段, 换能器厚度取 $16 \mu\text{m}$, H 为 8 mm, L 为 3 mm, 电功率取 2 W, 距离换能器 1 mm 处的衍射效率、距离换能器 7 mm 处的衍射效率和实测的衍射效率如表 2 所示, 衍射效率与光波长的关系如图 6 所示。

表 2 高频段衍射效率与光波长的关系

光波 长/ μm	1 mm 处衍射效 率/%(理论值)	7 mm 处衍射效 率/%(理论值)	实测衍射 效率/%
0.41	67.1	60.6	23.5
0.43	72.1	68.4	56.3
0.45	76.9	73.8	77.3
0.47	81.3	77.4	78.6
0.49	85.1	79.8	85.6
0.51	88.2	81.3	81.6
0.53	90.7	82.2	78.6
0.55	92.6	82.6	83.9
0.57	93.9	82.7	92.9
0.59	94.7	82.5	88.5
0.61	95.0	82.1	83.9
0.63	94.9	81.4	85.6
0.65	94.4	80.7	71.2
0.67	93.7	79.8	65.2
0.69	92.7	78.8	61.4
0.71	91.5	77.8	52.1
0.73	90.1	76.6	38.9

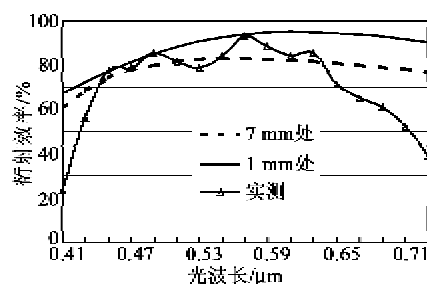


图 6 高频段衍射效率与光波长的关系

对于低频段, 换能器厚取 $26 \mu\text{m}$, L 为 7 mm, 电功率取 2 W, 距离换能器 1 mm 处的衍射效率、距离换能器 7 mm 处的衍射效率和实测的衍射效率如表 3 所示, 衍射效率与光波长的关系如图 7 所示。

表 3 低频段衍射效率与光波长的关系

波长/ μm	1mm 处衍射效 率/%(理论值)	7mm 处衍射效 率/%(理论值)	实测衍 射效率/%
0.57	74.4	94.1	45.8
0.59	79.0	94.0	65.3
0.61	82.8	93.9	75.6
0.63	86.1	93.6	78.5
0.65	88.8	93.3	85.3
0.67	90.9	92.9	85.6
0.69	92.5	92.4	90.5
0.71	93.7	91.8	88.6
0.73	94.5	91.1	87.5
0.75	94.9	90.3	84.1
0.77	95.0	89.5	80.3
0.79	94.8	88.6	82.1
0.81	94.4	87.6	86.5
0.83	93.8	86.6	87.4
0.85	95.0	92.1	89.8
0.87	95.0	91.4	91.2
0.89	94.8	90.6	92.3
0.91	94.4	89.7	95.8
0.93	93.9	88.8	93.2
0.95	93.2	87.8	91.2
0.97	92.4	86.7	93.5
0.99	91.5	85.7	87.6
1.01	90.4	84.5	78.3
1.03	89.4	83.4	56.8
1.05	88.2	82.2	39.5

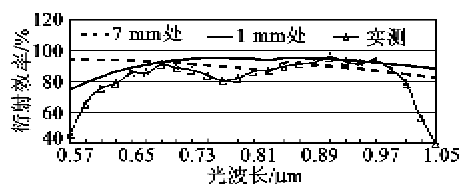


图 7 低频段衍射效率与光波长的关系

测试衍射效率时使用的是充满入射光孔的、准直的单色光。衍射效率的实测值与理论值有一定的差异,主要是因为声光可调滤光器与驱动器之间阻抗的不匹配引起的,对于高频大带宽器件,这是正常现象。

高频段工作的波长范围为 $0.45 \sim 0.63 \mu\text{m}$, 对应的工作频率为 $182.8 \sim 114.9 \text{ MHz}$ 。低频段工作的波长范围为 $0.63 \sim 0.95 \mu\text{m}$, 对应的工作频率为 $114.9 \sim 71.1 \text{ MHz}$ 。整个产品的波长范围为 $0.45 \sim 0.95 \mu\text{m}$, 对应的工作频率为 $182.8 \sim 71.1 \text{ MHz}$, 在整个波长范围内,衍射效率大于 70% , 因此,利用两片换能器突破了单片换能器对带宽的限制,大幅提高了声光可调滤光器工作的波长范围,这时光波长与衍射效率的关系曲线如图 8 所示。

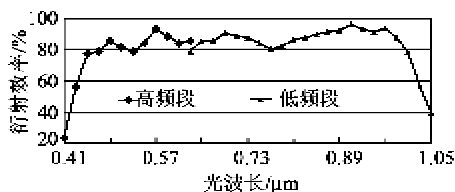


图 8 两片换能器同时工作时衍射效率与光波长的关系

2.3 光谱分辨率

对于声光可调滤光器,在满足动量匹配的条件下,光谱分辨率为

$$\Delta\lambda = \frac{1.8\pi\lambda_0^2}{bL} \sin \theta_i^2 \quad (4)$$

式中 b 为氧化碲晶体的色散系数。

高频段的相互作用长度取 3 mm , 低频段的相互作用长度取 8 mm , 光波长与光谱分辨率的对应关系如表 4 所示,光谱分辨率随波长的变化如图 9 所示。

表 4 光波长与光谱分辨率的对应关系

频段	波长/ μm	光谱分辨率/nm(理论值)	光谱分辨率/nm(实测值)
高频段	0.45	2.13	2.3
	0.47	2.48	2.6
	0.49	2.85	2.9
	0.51	3.24	3.3
	0.53	3.64	3.5
	0.55	4.06	4.2
	0.57	4.50	4.5
	0.59	4.95	4.9
	0.61	5.41	5.4
	0.63	5.89	6.1

续表

频段	波长/ μm	光谱分辨率/nm(理论值)	光谱分辨率/nm(实测值)
低频段	0.63	2.49	2.7
	0.65	2.70	2.8
	0.67	2.92	3.0
	0.69	3.14	3.2
	0.71	3.37	3.3
	0.73	3.61	3.4
	0.75	3.86	3.6
	0.77	4.11	3.8
	0.79	4.37	4.0
	0.81	4.63	4.3
	0.83	4.90	4.7
	0.85	5.18	5.0
	0.87	5.46	5.3
	0.89	5.76	5.9
	0.91	6.06	6.3
	0.93	6.36	6.6
	0.95	6.67	6.9

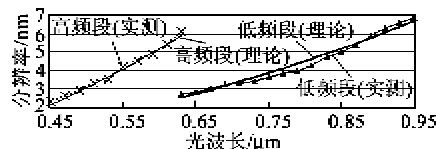


图 9 光谱分辨率随波长的变化

3 分析

我们利用两片换能器实现了从 $0.45 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 的滤光范围,相对带宽接近 0.9 个倍频程,因此,通过在同一个通声面上制作多片厚度不同的换能器的方式可大幅提高声光可调滤光器的工作带宽,理论上可制作出全光谱的声光可调滤光器,但由于受制作声光可调滤光器的声光介质的透明区的限制,声光可调滤光器的光谱范围只能局限在声光介质的透明区内。以氧化碲晶体为例,它的透明区为 $0.35 \sim 5.00 \mu\text{m}$,如果制作 6 片换能器,声光可调滤光器的光谱范围可从 $0.35 \mu\text{m}$ 扩展到 $5.00 \mu\text{m}$,如表 5 所示,这时总的相对带宽达到了 1.816 个倍频程,但每个频段的相对带宽不到 0.5 个倍频程,能充分保证各个频段的衍射效率。

表 5 光谱范围从 $0.35 \mu\text{m}$ 扩展到 $2.40 \mu\text{m}$ 的声光可调滤光器

频段	波长/ μm	换能器厚度/ μm	频率范围/MHz	相对带宽
第一频段	$0.35 \sim 0.47$	10.7	$280 \sim 169$	0.494
第二频段	$0.47 \sim 0.71$	17.7	$169 \sim 102$	0.494
第三频段	$0.71 \sim 1.09$	29.4	$102.0 \sim 61.5$	0.495

续表

频段	波长/ μm	换能器 厚度/ μm	频率范 围/MHz	相对 带宽
第四频段	1.09~1.95	48.7	61.5~37.1	0.495
第五频段	1.95~3.25	80.8	37.1~22.3	0.498
第六频段	3.25~5.00	134.1	22.3~13.5	0.492
总的工 作范围	0.35~5.00	—	280.0~13.5	1.816

4 结束语

声光可调滤光器具有大的通光孔径,可获得不同波长的光谱图,同时还具有快速电调谐、无活动部件和对比度高等优点,在光谱成像上有很好的应用前景。但由于换能器带宽的限制,声光可调滤光器

工作的光谱范围有限,本文介绍了一种通过多片换能器来提高声光可调滤光器的工作带宽的方法,实现了提高声光可调滤光器的光谱范围的目的。这种方法突破了单片换能器对带宽的限制,为研制宽光谱的滤光器奠定了基础。

参考文献:

- [1] 徐介平. 声光器件的原理设计和应用[M]. 北京:科学出版社,1982:141-151.
- [2] GEORGIEV G, GEORGIEVA E, KONSTANTINOV L. Angular and power characteristics of noncollinear acoustooptic tunable filters[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31:1-12.

网络投稿程序及稿件流程

投稿网址: <http://www.peaotec.com>

网络投稿程序:

- 1) 作者注册。
- 2) 查看投稿须知。
- 3) 查看版权协议。
- 4) 填写稿件信息。
- 5) 填写作者信息。
- 6) 上传稿件和附件。

注意:

- 1) 带 * 的内容为必添项。
- 2) 每篇文章都需要有投稿作者和通信作者,可以由同一人担任。如果是学生,通信作者应该是指导教师。
- 3) 为提高稿件的外审效率,请作者推荐合适的专家供编辑部参考。
- 4) 要把所有的署名作者一一填写,因为在打印录用通知时需要把所有的作者姓名全部打印上去。

稿件流程:

- 1) 稿件上传成功后,作者会接到系统自动发送的收稿回执及稿件登记号。
- 2) 稿件初审(合格的进入复审,不合格的退修或直接退稿)。
- 3) 复审(专家外审,一般 2 个月)。
- 4) 外审通过的稿件经终审合格后发录用通知和版面费通知(电子版,在版面费通知邮件的附件里下载)。
- 5) 稿件定文发表(一年内),作者可随时登陆网站查看稿件状态。
- 6) 稿件一经刊出,即付稿酬。期刊出版后,还将向国内外文献检索机构报送并上网,届时不再向各位作者另付酬。