

大孔径可见光声光可调滤光器

王晓新,张泽红,刘玲,周益民,吴中超

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:为了提高光谱成像系统的通光能量,该文介绍了一种可见光波段的大孔径(20 mm×20 mm)声光可调滤光器,与常用声光可调滤光器(光孔径 10 mm×10 mm)相比,其光通量提高了 3 倍。该文还首次推导了包含声波衰减系数、工作频率、光到换能器距离的声光可调滤光器衍射效率公式。根据这个公式可以更准确地计算出声光可调滤光器的衍射效率。实验表明,这种双换能器声光可调滤光器工作带宽接近 0.95 个倍频程,滤光范围为 0.4~0.9 μm,衍射效率大于 60%,光谱分辨率小于 10 nm。

关键词:声光可调滤光器;光孔径;光谱范围;衍射效率;光谱分辨率

中图分类号:TN65;TM23 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.05.005

Large Aperture Visible Light Acousto-optic Tunable Filter

WANG Xiaoxin, ZHANG Zehong, LIU Ling, ZHOU Yimin, WU Zhongchao

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

Abstract: In order to improve the light energy of spectral imaging system, a visible light AOTF with light aperture of 20 mm×20 mm is presented in this paper. Compared with the common AOTF (light aperture of 10 mm×10 mm), its light flux is increased by three times. In this paper, the diffraction efficiency formula of AOTF including the attenuation coefficient of sound wave, operating frequency and the distance from light to transducer is also derived for the first time. The diffraction efficiency of AOTF can be calculated more accurately by using this formula. The experimental results show that the AOTF with two transducers has a operating bandwidth of nearly 0.95 octave, filtering range 0.4 μm to 0.9 μm, diffraction efficiency of greater than 60%, spectral resolution of less than 10 nm.

Key words: acoustooptic tunable filter; light aperture; spectral range; diffraction efficiency; spectral resolution

0 引言

声光可调滤光器(简称“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,具有孔径大,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,是光谱成像系统常用的分光元件,其滤光特性直接影响光谱成像系统的性能。目前常用声光可调滤光器的光孔径约为 10 mm×10 mm,限制了光谱成像系统的通光能量^[1],同时也难以与焦平面阵列探测器相匹配,为此我们设计制作了一种大孔径声光可调滤光器。

1 结构设计

滤光器是利用各向异性介质氧化碲晶体设计的反常布喇格器件,为了增加滤光器的光谱范围,器件

设计了高频换能器和低频换能器两个换能器,原理示意图如图 1 所示^[2]。高频换能器的工作频率为 $f_1 \sim f_2$,对应滤出的光波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$;低频换能器的工作频率为 $f_2 \sim f_3$,对应滤出的光波长为 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ (见图 2),这样两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。

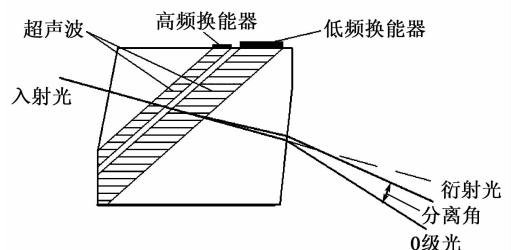


图1 原理示意图

收稿日期:2019-03-04

作者简介:王晓新(1975-),男,江苏人,高级工程师,主要从事声光技术的研究。通信作者:张泽红(1968-),男,主要从事声光技术的研究。
E-mail:13637790568@163.com。

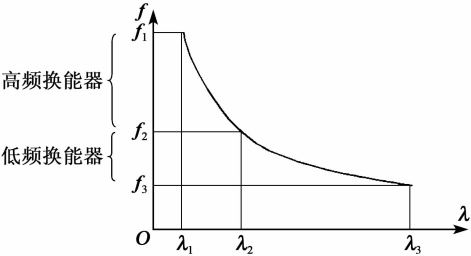


图2 滤光器光波长与声频的关系

2 主要参数设计

2.1 光谱范围与工作频率

滤光器采用具有大孔径的非同向工作模式设计,其波矢量布局如图3所示。图中,[001]轴为晶体光轴, n_e 和 n_o 分别为寻常光线o光和非常光线e光的折射率。由图3可知,o光和e光的折射率曲面分别为圆和椭圆。取入射光为e光,则衍射光为o光。 K_i 、 K_d 和 K_a 分别为入射光波矢量、衍射光波矢量和超声波矢量。

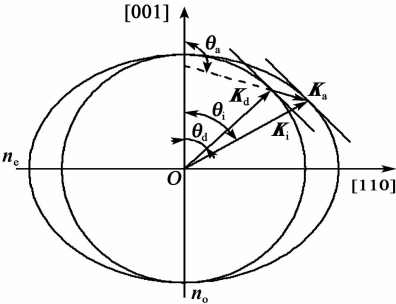


图3 波矢量图

根据非同向大孔径声光可调滤光器理论^[3],入射光是e光,其折射率为

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

式中 θ_i 为入射光的极角。衍射光在晶体内的衍射角 θ_d 为

$$\theta_d = \arctan \left[\left(\frac{n_o}{n_e} \right)^2 \times \tan \theta_i \right]$$
 (2)

工作频率(f)与光波长(λ_0)的调谐曲线:

$$f = \frac{v}{\lambda_0} \sqrt{n_i^2 + n_o^2 - 2n_i n_o \cos(\theta_i - \theta_d)}$$
 (3)

式中 v 为声波速度。光孔径20 mm×20 mm的滤光器,声波传输距离大,设计时必须考虑声波的衰减影响。氧化碲晶体内声波衰减与工作频率的平方成正比,工作频率越高,声波衰减越大,衍射效率越低,因此,设计时需尽量降低器件的工作频率。

器件工作频率与衍射光分离角成正比。工作频率越低,分离角就越小,需要分开衍射光的距离越

长,成像系统的体积越大;反之,工作频率越高,分离角就越大,需要分开衍射光的距离越短,成像系统的体积越小,因此,从减小成像系统体积的角度,希望工作频率尽可能高。

经过综合考虑,入射光取e光, $\theta_i = 15^\circ$,这时衍射光分离角大于 3.9° 。 $\lambda_0 = 0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 时对应的 f 为139.2~49.8 MHz,其工作带宽约0.95个倍频程。以 $\lambda_0 = 0.6 \mu\text{m}$ 、 $f = 79 \text{ MHz}$ 点分段,139.2~79 MHz为高频段,对应的光波长为 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$;79~49.8 MHz为低频段,对应的 $\lambda_0 = 0.6 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。 λ_0 与 f 的对应关系如表1所示。

表1 λ_0 与 f 的对应关系

频段	λ_0/nm	f/MHz (理论值)
高频段	400	139.2
	450	115.6
	500	99.7
	550	88.0
	600	79.0
低频段	600	79.0
	650	71.8
	700	65.9
	750	61.0
	800	56.7
	850	53.1
	900	49.9

2.2 衍射效率

滤光器是反常布喇格衍射模式,其衍射效率^[4]为

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right]$$
 (4)

式中: M_2 为氧化碲晶体的声光优值; P_a 为超声功率; H 为光孔径; L 为声光互作用长度。 P_a 与驱动电功率(P)的关系:

$$P_a = \frac{k}{\sigma} P$$
 (5)

式中: σ 为声波衰减系数; k 为换能器机电耦合系数。氧化碲晶体的 σ 为

$$\sigma = 10^{-19} \times \mu\text{m} f^2$$
 (6)

式中: $\mu = 290 \text{ dB}/(\text{cm} \cdot \text{GHz}^2)$ 为1 GHz声波在距离换能器10 mm处的声波衰减系数; m 为光到换能器的距离(见图4)。将式(5)、(6)代入式(4)中,滤光器的衍射效率为

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{10^{19} \times M_2 L k P}{2H \mu\text{m} f^2}} \right]$$
 (7)

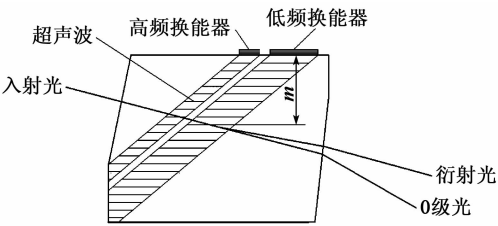


图 4 光到换能器距离

根据式(7)可以更准确地计算出不同 f 、 m 的声

光可调滤光器的衍射效率。显然,声光可调滤光器的 η 与 f 、 m 密切相关。 f 越高、 m 越大,则 μ 也越大, P_a 会越小, η 就越低;反之, f 越低、 m 越小,则 μ 也越小, P_a 会越大, η 就越高。

光到换能器不同距离的光波长-衍射效率如表 2 所示。由表可知, λ_0 越短, f 越高, η 受 m 的影响就越大,这与声波衰减理论相吻合。

表 2 光到换能器不同距离的光波长-衍射效率

m/mm	λ_0/nm (高频段)				λ_0/nm (低频段)			
	400	450	500	600	600	700	800	900
1	39.8	60.1	76.6	96.1	90.4	94.0	96.8	98.7
3	69.1	77.7	86.8	98.4	94.5	96.2	98.0	99.3
5	89.7	90.4	94.0	99.7	97.3	97.9	98.9	99.7
7	99.1	97.6	98.3	100.0	99.1	99.1	99.5	99.9
9	98.9	100.0	100.0	99.5	99.9	99.8	99.9	100.0
11	92.2	98.4	99.3	98.2	99.8	100.0	100.0	100.0
13	81.9	93.8	96.9	96.3	99.0	99.8	99.9	99.8
15	70.3	87.4	93.1	93.9	97.4	99.3	99.6	99.5
17	58.8	79.8	88.2	91.1	95.2	98.4	99.1	99.1
19	48.2	71.7	82.7	88.0	92.6	97.1	98.4	98.6
21	39.0	63.7	76.9	84.5	89.6	95.7	97.5	97.9
P/W	2.20	2.25	2.30	2.35	1.00	1.25	1.50	1.75
f/MHz	139.2	115.6	99.7	79.0	79.0	65.9	56.7	49.8
平均衍射效率/%	71.5	83.7	90.3	95.1	95.9	97.9	98.9	99.3

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 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{1.8\pi\lambda_0^2}{bL} \sin^2\theta_i \tag{8}$$

式中 b 为氧化碲晶体的色散系数。

高、低频段的 L 分别为 3 mm 和 8 mm, λ_0 与 $\Delta\lambda$ 的对应关系如表 3 所示。

表 3 λ_0 与 $\Delta\lambda$ 的对应关系

频段	λ_0/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$ (理论值)
高频段	400	2.1
	450	3.4
	500	4.9
	550	6.6
	600	8.4
低频段	600	3.1
	650	3.9
	700	4.7
	750	5.5
	800	6.4
	850	7.4
	900	8.5

3 实验结果

我们利用两片换能器实现了 0.4~0.9 μm 的滤光范围,实测工作频率为 140.8~48.6 MHz,相对带宽接近 0.95 个倍频程。器件外形如图 5 所示,外形尺寸为 54 mm×45 mm×39 mm。



图 5 器件外形

滤光器孔径角与 λ_0 有关,用 532 nm 激光测试高频段孔径角为 5.8°,用 633 nm 激光测试低频段

孔径角为 4°。滤光器分离角也与 λ_0 有关,用 532 nm 激光测试高频段分离角为 4.3°,用 1 064 nm 激光测试低频段分离角为 3.8°。

滤光器的 f 、 η 、 $\Delta\lambda$ 与 λ_0 的关系如表 4 所示。由表可知,实测结果与理论值吻合。

表 4 f 、 η 、 $\Delta\lambda$ 与 λ_0 的关系

频段	λ_0/nm	f/MHz	$\eta/\%$	$\Delta\lambda/\text{nm}$
高频段	400	140.8	60	2.2
	450	116.1	77	3.5
	500	100.3	81	5.2
	550	88.4	79	7.1
	600	79.3	76	9.0
低频段	600	78.2	74	3.1
	650	71.1	88	4.5
	700	65.3	87	5.3
	750	60.5	95	6.0
	800	56.1	95	6.9
	850	52.7	94	8.0
	900	49.7	74	9.1

4 结 束 语

通过优选入射极角和工作频率,滤光器较好地兼顾了光孔径、衍射效率和分离角等参数间的制约关系。滤光器采用双换能器设计,突破了单片换能器对带宽的限制,扩大了滤光器的工作频率与滤光范围,这样能充分利用焦平面阵列探测器的光谱探

测能力,提高光谱成像系统探测的光谱范围。
文章推导了包含声波衰减系数、工作频率、光到换能器距离的声光可调滤光器衍射效率公式。根据这个公式,可以更准确地计算出不同工作频率、光到换能器不同距离的声光可调滤光器的衍射效率。

在 $P<3\text{ W}$ 的前提下,滤光器实现了 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的光孔径、在全光谱范围内衍射效率大于 60% 的指标。与光孔径 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的滤光器相比,光孔径 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的滤光器的光通量提高了 3 倍,这样能大幅提高光谱成像系统的视场和通光能量,为大幅提高光谱成像系统的灵敏度和探测距离奠定了基础。

参考文献:

[1] 白鑫,张淳民,景春元,等.干涉成像光谱仪光通量的计算与分析[J].物理学报,2011,60(7):173-180.
[2] 张泽红,赵治国,雷波,等.宽光谱声光可调滤光器[J].压电与声光,2013,35(1):19-23.
ZHANG Zehong,ZHAO Zhiguo,LEI Bo,et al. Acousto-optic tunable filter with wide spectral range[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2013,35(1):19-23.
[3] 郑颖君,鲁波,余桂英,等.红外声光可调滤光器的性能测试及理论分析[J].激光与红外,2005,35(6):454-456.
[4] 徐介平.声光器件的原理、设计和应用[M].北京:科学出版社,1982.

(上接第 634 页)

参考文献:

[1] LEI W, SHUMING C, JINYING Z, et al. High performance 33.7 GHz surface acoustic wave nanotransducers based on AlScN/diamond/Si layered structures [J]. Applied Physics Letters,2018,113(9):0935. 3.
[2] AKIYAMA M,KAMOHARA T,KANO K,et al. Enhancement of piezoelectric response in scandium aluminum nitride alloy thin films prepared by dual reactive cosputtering[J]. Advanced Materials,2009,21(5):593.
[3] IWAZAKI Y, YOKOYAMA T, NISHIHARA T, et al. Highly enhanced piezoelectric property of co-doped AlN[J]. Applied Physics Express,2015,8(6):061501.
[4] THOLANDER C,TASNÁDI F,ABRIKOSOV I A,et

al. Large piezoelectric response of quarternary wurtzite nitride alloys and its physical origin from first principles[J]. Physical Review B,2015,92(17):174119.
[5] TASNÁDI F, ALLING B, HÖGLUND C, et al. Origin of the anomalous piezoelectric response in wurtzite $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ alloys[J]. Physical Review Letters,2010,104(13):137601.
[6] DENG R, EVANS S R, GALL D. Bandgap in $\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$ [J]. Appl Phys Lett,2013,102(11):2653.
[7] GILLINGER M, SHAPOSHNIKOV K, KNOBLOCH T, et al. Impact of layer and substrate properties on the surface acoustic wave velocity in scandium doped aluminum nitride based SAW devices on sapphire[J]. Appl Phys Lett,2016,108(23):231601.