

# 反常大带宽声光偏转器

张泽红,何晓亮

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

**摘要:**该文介绍了一种利用反常声光相互作用原理制作的大带宽声光偏转器。该器件使用的声光相互作用介质是磷化镓晶体,声波模式是横波,采用单片换能器结构,实现了带宽与衍射效率的合理兼顾。制作的大带宽声光偏转器样品的3 dB带宽达1 040 MHz,峰值衍射效率达20.4%@1 W,这时中心频率为1.62 GHz,光波长是633 nm。

**关键词:**反常声光相互作用;声光偏转器;磷化镓;带宽(3 dB);衍射效率;光偏振态

**中图分类号:**TN65 **文献标识码:**A

## Abnormal Acousto-optic Deflector With Large-bandwidth

ZHANG Zehong, HE Xiaoliang

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

**Abstract:** This article introduces a kind of large-bandwidth acousto-optic deflector using the principle of abnormal acousto-optic interaction. This device uses GaP crystal as the acousto-optic interacting medium and shear wave as the acoustic wave mode. Considering the trade-off between the bandwidth and the diffraction efficiency, it uses the structure of single chip transducer. The prepared sample of the large-bandwidth acousto-optic deflector has a 3 dB bandwidth of 1 040 MHz and a peak diffraction efficiency of 20.4%@1 W at the center frequency of 1.62 GHz and light wavelength of 633 nm.

**Key words:** abnormal acousto-optic interaction; acousto-optic deflector; gallium phosphide; bandwidth (3 dB); diffraction efficiency; optical polarization

### 0 引言

近年来,采用线性调频、频率捷变、直序扩频、调相、跳频等方式的雷达和通讯系统,增大了发射脉冲信号的时间-带宽积,并降低了有效辐射功率(ERP)。电磁信号变得复杂,截获概率低,这给电子侦察系统提出了很高的要求。采用以大带宽声光偏转器为核心的声光信息处理系统是适应复杂电磁环境而发展起来的一种新型电子侦察设备,是未来电子信息战电子侦察、电子对抗装备的主导体制之一<sup>[1-2]</sup>。

磷化镓(GaP)晶体具有声光优值较高、声衰减较小、热导率较大及光学性能较好等优点,是常用的大带宽声光偏转器材料。GaP晶体纵波的声光优值是横波的1.5倍,因此,大带宽声光偏转器(带宽大于500 MHz)通常采用纵波模式制作。但纵波模式工作的声光器件会在1级衍射与2级衍射之间出现多余的衍射光斑(“假点”)<sup>[3]</sup>,使系统出现虚假信号,故采

用声光优值较低的横波模式。我们研制了一种利用反常声光相互作用原理制作的大带宽声光偏转器,实现了带宽与衍射效率的合理兼顾。本文介绍了这种大带宽声光偏转器的基本原理及样品的主要性能。

### 1 基本原理

超声波在声光相互作用介质中传播时,它使声光相互作用介质的折射率发生周期性的分布,对入射光波产生衍射作用,这种现象称为声光相互作用或声光衍射。根据入射光和衍射光的偏振态,声光衍射可分为正常和反常声光衍射两大类。入射光和衍射光的偏振态相同时叫做正常声光衍射,此时, $n_i = n_d$ ,其中, $n_i$ 为入射光的折射率, $n_d$ 为衍射光的折射率;入射光与衍射光的偏振态不同时叫做反常声光衍射,此时 $n_i \neq n_d$ ,且 $k_i \neq k_d$ ,其中, $k_i$ 为入射光的波矢量, $k_d$ 为衍射光的波矢量,故动量匹配的闭合三角形不是等腰三角形,如图1所示。图中, $\theta_i$ 和 $\theta_d$ 分别为入射角和衍射角,

收稿日期:2016-10-18

基金项目:国家重大资助项目

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

$\mathbf{K}$  为声光相互作用介质中的声波矢量<sup>[4]</sup>。

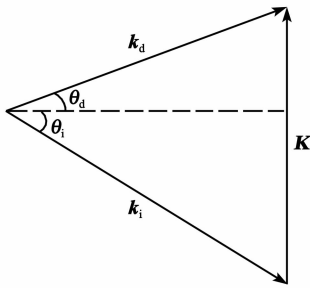


图1 反常声光衍射动量匹配三角形

采用多片换能器阵列结构的超声跟踪能适当提高相互作用长度和带宽,但工艺复杂,现有条件难以实现,因此,我们采用单片结构设计换能器。为使衍射光强度尽可能的高,器件工作模式为布喇格衍射,这时器件就成了反常布喇格衍射。对于反常布喇格衍射,其相对布喇格带宽  $\Delta F$ <sup>[5]</sup> 为

$$\Delta F = \frac{\Delta f}{f_c} = \sqrt{\frac{3 \cdot 6 L_0^{(C)}}{L}} \quad (1)$$

式中: $\Delta f$  为声光偏转器的带宽; $f_c$  为声光偏转器的中心频率; $L$  为声光相互作用长度; $L_0^{(C)}$  为声光器件中心频率的特征长度。

对于单片结构的声光偏转器,换能器产生的超声波是发散的,如图2所示。只有特定角度的  $\mathbf{K}$  才能与  $\mathbf{k}_i$  声光相互作用,进而得到  $\mathbf{k}_d$ 。 $L$  与超声波发散角  $\Delta\theta$  的关系为

$$\Delta\theta = \frac{v}{fL} \quad (2)$$

式中: $v$  为超声波速率; $f$  为工作频率。 $L$  越小, $\Delta\theta$  越大, $\Delta f$  越大。同时, $L$  还与衍射效率有关,衍射效率和带宽都是表征声光偏转器的重要指标。衍射效率是指1级衍射光的光强占透过声光介质总光强的百分比,器件工作模式为布喇格衍射,因此,其衍射效率<sup>[6]</sup> 为

$$\eta = \sin^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right] \quad (3)$$

式中: $P_a$  为超声功率; $\lambda_0$  为光波长; $M_2$  为声光优值; $H$  为光孔径。

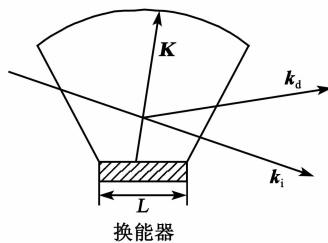


图2 换能器产生的超声波

由式(1)、(3)可见, $L$  与带宽和衍射效率的关系

密切,因此,在带宽与衍射效率之间找到一个最佳的平衡点。

$\eta$  与驱动的  $P_a$  成正比,提高  $P_a$  能提高器件的  $\eta$ 。这个方法对很多声光器件都适用,但大带宽声光偏转器却不能采用,因为大带宽声光偏转器的换能器工作面积很小,拟制作的声光偏转器的换能器工作面积为  $0.095 \text{ mm} \times 0.075 \text{ mm} \approx 0.007 \text{ mm}^2$ ,功率过大易烧坏器件,所以要尽量提高器件的性能,降低驱动功率,确保产品的可靠性。

## 2 试验结果

GaP 是一种橙红色透明晶体,它是一种由 n 族元素镓(Ga)与 VA 族元素磷(P)人工合成的 m-V 族化合物半导体材料,其晶体结构为闪锌矿型。GaP 纵波和横波的特性如表1所示。为了消除“假点”,我们放弃了声光优值较高的纵波模式(其声光优值为  $44.6 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ),使用声光优值较低的横波模式(其声光优值为  $29.2 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ )。横波的声衰减系数较小,仅为纵波的 73%,这对制作高频声光器件更有利。

表1 磷化镓晶体特性

模式	声速/ (m/s)	折 射 率	声衰减系数/ [dB/( $\mu\text{s} \times$ GHz <sup>2</sup> )]	优值 $M_2$ / ( $10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ )
纵波	6 320	3.31	3.80	44.6
横波	4 100	3.31	2.80	29.2

GaP 横波声速为 4 100 m/s,中心频率设计为 1.65 GHz,这时 GaP 晶体中心频率的特征长度为  $36 \mu\text{m}$ 。设  $L = 95 \mu\text{m}$ ,  $H = 75 \mu\text{m}$ ,此时  $\Delta F = 1.168$ ,理论上  $\Delta f$  可达 1.927 GHz。

需要说明的是,拟制作的声光偏转器的低频端频率为 1.1 GHz,其低频端特征长度  $L_0^{(L)}$  为  $76 \mu\text{m}$ , $L$  仅为特征长度  $L_0^{(L)}$  的 1.25 倍,器件在低频端不满足布喇格衍射的条件。这样设计的目的是通过减少  $L$  来增加器件的带宽,缺点是降低了低频端的衍射效率,但实际制作出的器件在低频端的衍射效率较高,因此这种设计可行。

为了提高衍射效率,采用了机电耦合系数较高的 X-切铌酸锂换能器。X-切铌酸锂换能器能激励横波机电耦合系数(0.68)是纵波换能器(0.49)的 1.38 倍,即其产生的横波声功率是纵波的 1.38 倍,这样可提高衍射效率。X-切铌酸锂换能器的频率常数为 2 400,因此将换能器的厚度设计为  $1.45 \mu\text{m}$ 。

大带宽声光偏转器的工作频率大于 1 GHz,为了提高换能器吸收射频信号的能力,进而提高衍射效

率,我们采用片电容、微带线和微带短截线等分布参数元件实现了宽带匹配。由于器件在大于 1.5 GHz 的高频段的衍射效率偏低,因此我们在匹配时优先考虑高频段的吸收情况。用网络分析仪测试器件的吸收曲线,在 1.1~2.0 GHz 内,低频段 1 GHz 的吸收深度为 4.3 dB,中段频率 1.5 GHz 的吸收深度为 8.9 dB,高频段 2 GHz 的吸收深度为 8.6 dB,如图 3 所示。这种匹配曲线有利于提高高频段的衍射效率,进而提高带宽内衍射效率的均匀性。

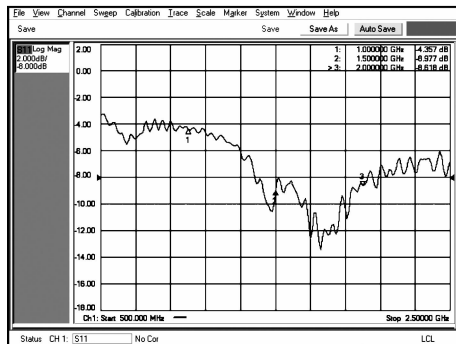


图 3 匹配后的吸收曲线

采用横波制作的大带宽声光偏转器解决了“假点”问题,衍射光斑如图 4 所示。

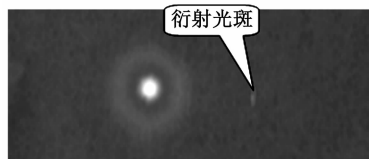


图 4 大带宽声光偏转器的衍射光斑

用格兰棱镜检验,与入射光相比,衍射光的偏振态旋转了  $90^\circ$ ,证明这种大带宽声光偏转器属于反常声光相互作用工作模式。实验发现,这种大带宽声光偏转器能同时对水平偏振光和垂直偏振光发生反常声光相互作用:将入射的水平偏振光转变成垂直偏振态的衍射光,将入射的垂直偏振光转变成水平偏振态的衍射光,且这 2 个偏振衍射光的偏转位置相同、衍射效率相同。

一般的反常声光器件产生的 2 个偏振衍射光都对称分布在 0 级光(穿过晶体的入射光)的两边,但这种大带宽声光偏转器产生的 2 个偏振衍射光的偏转位置却是相同的,即都同时处于 +1 级衍射光的位置或 -1 级衍射光的位置,具体位置由使用时调整的布喇格角决定。产生这个现象的原因是声光相互作用介质材料的性质不同,一般反常声光器件使用的声光相互作用介质材料是各向异性的晶体,而这里使用的磷化镓晶体是各向同性的。

大带宽声光偏转器衍射效率与频率的关系曲线如图 5 所示。在 1.1~2.14 GHz 内,中心频率为

1.62 GHz,3 dB 带宽为 1 040 MHz,峰值衍射效率为 20.4% @ 1 W,最低衍射效率为 10.3% @ 1 W,测试光波长为 633 nm。

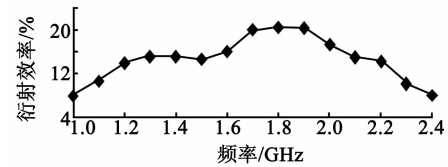


图 5 衍射效率与频率的关系曲线

大带宽声光偏转器的外形如图 6 所示,其封装尺寸为 38 mm×36 mm×24 mm。



图 6 产品外形

### 3 结束语

基于横波制作的高频大带宽声光偏转器工作在反常声光相互作用衍射模式状态,它完全消除了纵波模式下的“假点”问题。与入射光相比,这种大带宽声光偏转器的衍射光偏振态旋转了  $90^\circ$ ,这个特点使得整机可利用格兰棱镜抑制背景光,进而提高声光信息处理系统的灵敏度,为研制高灵敏度的声光信道化接收机奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 程乃平,江修富,邵定蓉. 声光信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] SLIWINSKI A. Acousto-optics and its perspectives in research and applications [J]. Ultrasonics, 1990, 28 (4):195-213.
- [3] 张泽红,陆川,何晓亮,等. 磷化镓声光偏转器[J]. 压电与声光, 2014, 36(5):694-697. ZHANG Zehong, LU Chuan, HE Xiaoliang, et al. Study on acousto-optic deflector based on gallium phosphide[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(5):694-697.
- [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.
- [5] 俞宽新,丁晓红,庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [6] 安磊. 超声跟踪反常声光器件的优化设计研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2012.