

磷化镓声光偏转器

张泽红, 陆川, 何晓亮, 曹家强, 吴冉

(中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060)

摘要:该文介绍了一种利用磷化镓(GaP)晶体制作的宽带声光偏转器。该器件采用准超声跟踪结构设计,大幅提高了换能器工作的总长度,实现了带宽与衍射效率的合理兼顾。制作出声光偏转器样品 3 dB 带宽达 900 MHz,峰值衍射效率达 8% @ 1 W,衍射光在声光介质外的动态扫描角为 5.2°。在试验过程中发现了异常现象,在 1 级衍射光斑与 2 级衍射之间出现了多余的衍射光斑(“假点”),形成的机理还有待研究。

关键词:声光效应;声光偏转器;磷化镓

中图分类号: TN409 **文献标识码:** A

Study on Acousto-optic Deflector Based on Gallium Phosphide

ZHANG Zhehong, LU Chuan, HE Xiaoliang, CAO Jiaqiang, WU Ran

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

Abstract: The article introduces a kind of broadband acousto-optic deflector based on gallium phosphide crystal. The device adopts the structure of quasi ultrasound track design, which greatly improved the total work length of the transducer, and implements the reasonable consideration of the bandwidth and diffraction efficiency. The device is provided with 3 dB bandwidth of 900MHz, the diffraction efficiency 8% @ 1 W, and the dynamic scanning angle outside the acousto-optic medium of 5.2°. Meanwhile, an abnormal phenomenon is found during the experiment, a redundant diffraction light spot appears between the first-degree and secondary diffraction light spot (which is named “fake spot”). The mechanism of the fake spot needs to be further studied.

Key words: acousto-optic effect; acousto-optic deflector; gallium phosphide

0 引言

现代雷达和通讯对抗环境日趋复杂,其主要特点是信号密度高,威胁源多,频谱宽,体制多样和调制技术复杂。随着信号瞬时带宽的提高,数字采样的频率也越来越高,从而使 A/D 器件采样能力不够,信号处理的实时性较差,高速、高频电路电磁兼容性难以解决等问题。采用以宽带声光偏转器为核心器件的声光信息处理系统是适应这种要求而发展起来的一种新型电子侦察设备,它融合了宽带数字侦察接收机的优势,是新一代电子侦察、电子对抗装备的发展方向之一。

磷化镓(GaP)晶体具有声光优质高,声衰减小,硬度高,热导率大,光学性能好等优点,是制作高频宽带声光偏转器的较理想的材料之一。采用声光互作用原理制成的声光偏转器具有带宽大,响应速度快,体积小,质量小,功耗小,长期稳定性好等特点,易与计算机兼容和自动化控制,因此是一种理想的军用光电子器件。本文介绍了利用 GaP 晶体制作宽带声光偏转器的基本方法,以及样品的主要性能。

1 声光偏转器的基本原理

大带宽声光偏转器是利用声光互作用理论研制的声光器件,它主要由匹配网络、电极层、换能器、键合层、声光互作用介质、吸声层及封装外壳等组成。高频电信号传输到换能器上,换能器将高频信号转换为超声波后通过键合层耦合到声光介质内,超声波在声光介质内产生折射率光栅,入射的激光与折射率光栅发生声光互作用得到衍射光,图 1 为声光偏转器的原理图。

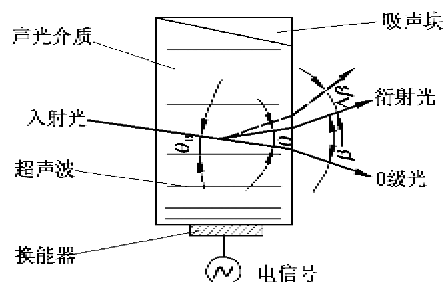


图 1 声光偏转器原理图

由声光布喇格衍射理论分析可知,光束以 θ_1 角

收稿日期:2014-03-31

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。

入射产生衍射极值应满足布喇格条件^[1],即

$$\sin \theta_B = \frac{f\lambda_0}{2nv} \quad (1)$$

$$\theta_i = \theta_d = \theta_B \quad (2)$$

式中: θ_B 为布喇格角; λ_0 为入射光在介质外的波长; f 为电信号的频率; v 为声光介质的声速; n 为声光介质的折射率; θ_i 为入射角; θ_d 为衍射角。布喇格角一般很小,即

$$\theta_B \approx \frac{f\lambda_0}{2nv} \quad (3)$$

故衍射光与入射光间的夹角(偏转角)等于布喇格角的 2 倍,即

$$\theta = \theta_i + \theta_d = 2\theta_B = \frac{f\lambda_0}{nv} \quad (4)$$

衍射光与入射光间的在声光晶体外的夹角(偏转角)为

$$\beta = n\theta = \frac{f\lambda_0}{v} \quad (5)$$

当频率变化 Δf 时,衍射光在介质外的角度变化即扫描角为

$$\Delta\beta = (\lambda_0/v)\Delta f \quad (6)$$

从式(5)可知,衍射光在声光晶体外的偏转角与电信号的频率成一一对应的关系,声光频谱分析系统就是利用这个特性测量出电信号的频率。声光频谱分析系统的原理图如图 2 所示,天线下来的信号经过混频后得到待测频率 f ,把待测频率 f 输入声光偏转器,声光偏转器的压电换能器将其转换成相同频率的超声波,入射光与超声波发生声光互作用产生衍射光,衍射光在介质外的偏转角度线性地取

决于频率 f ,置于焦平面处的光电检测器阵列可迅速地将检测到的光信号转换为电信号,数字处理系统根据光电检测器阵列不同位置输出的电信号分析出信号 f 的频率。当声光频谱分析系统同时接收多个频率信号时,在光电检测器阵列上会同时产生多个不同空间位置的衍射光点,构成一组不同的空间频率信号,数字处理系统能根据光电检测器阵列不同位置输出的电信号同时分析出多个频率信号的频率。

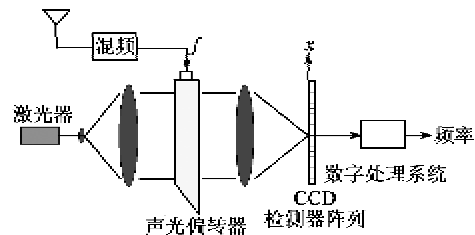


图 2 声光频谱分析系统原理图

对于电子侦察机,带宽越大,侦察处理信息的能力越强,因此,提高声光偏转器的带宽是研制大带宽声光偏转器最重要的工作之一。

2 GaP 声光偏转器的设计

声光介质材料是声波与入射光发生声光互作用获得衍射光的材料平台。不同材料产生的声光互作用的强弱不同。在设计声光器件时,根据要求,综合分析材料的性能,选择最合适的材料来设计产品。表 1 为几种常用的声光晶体材料参数。对于高频、大带宽声光偏转器,我们选择声光介质材料时主要考察声光优值、声衰减系数,同时还要考虑材料的声速、透明区、稳定性等。

表 1 声光晶体材料的性能参数

材料	声波种类	折射率	声速/(m/s)	声衰减系数/[dB/(μs×GHz ²)]	声光优值/(10 ⁻¹⁵ s ³ /kg)
GaP	纵波	3.31	6 320	3.800	44.60
LiNbO ₃	纵波	2.20	6 570	0.098	7.00
LiTaO ₂	纵波	2.18	6 190	0.062	1.37
TiO ₂	纵波	2.58	8 030	0.566	3.93
PbMnO ₄	纵波	2.32	3 632	6.300	36.10

对于带宽 1 GHz 的声光偏转器,较合适的材料是 GaP 和铌酸锂。GaP 声光优值较高,但其声衰减系数较大。铌酸锂的声衰减系数较小,但其声光优值较低。相对而言,GaP 是最合适的声光介质材料。

高频声光器件的电极尺寸很小,制作时常用单片结构。单片结构的工艺简单,易实现,但其超声波能量浪费较大,难以兼顾衍射效率和带宽间的矛盾。这是因为要得到较大的衍射效率,互作用长度 L 应

取得大,这时带宽窄,但要得到较大的带宽, L 又要取得小,这时衍射效率很低。采用平面超声跟踪结构可兼顾衍射效率和带宽间的矛盾,但标准的平面超声跟踪工艺制作难度大,难以实现,为此,我们采取了一种准超声跟踪结构设计,较好地解决了衍射效率和带宽之间的矛盾。

平面超声跟踪有同相驱动及反相驱动两种工作方式^[2]。对于同相驱动模式,相邻两换能器上所加电场方向相同,多束超声波干涉叠加产生的超声主

瓣如图 3 所示,超声主瓣包括 0、±1、±2、…等级次,对称分布在换能器晶面法线两侧,0 级主瓣的方向是固定的,其他主瓣的方向会随频率而变化。由于同相驱动模式产生的超声波能量主要集中在 0 级主瓣上,和单片结构类似,超声利用率很低,对提高带宽没有多大作用,因此不予采用。

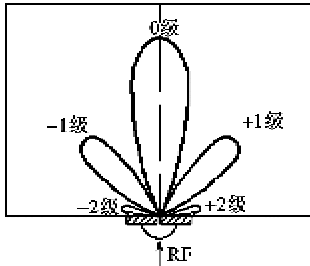


图 3 同相驱动产生的超声主瓣

对于反相驱动模式,由于相邻两换能器上所加电场方向相反,多束超声波干涉叠加产生的超声主瓣如图 4 所示,超声主瓣包括 ±1、±2、…等级次,对称分布在换能器晶面法线两侧,与同相驱动模式相比无 0 级主瓣,所有主瓣的方向会随频率变化而变化。由于能量主要集中在 ±1 级主瓣上,适当选择换能器的中心距和入射角,总能够在两个频率 f_1 和 f_2 处实现超声跟踪,再加上超声波本身具有一定的发散角,因此反相超声跟踪驱动模式可获得比同相驱动或单片模式更大的工作带宽。

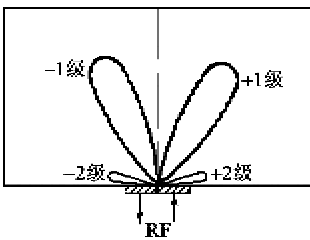


图 4 反相驱动产生的超声主瓣

本文的准超声跟踪结构采用两片反相驱动模式,与标准的超声跟踪结构相比,最大的区别是增加了每片换能器的长度。根据超声跟踪理论,标准的两片超声跟踪结构每片换能器的长度应是中心频率特征长度的 1.1 倍,我们设计的准超声跟踪结构将每片换能器的长度改为中心频率特征长度的 2 倍,这样可提高衍射效率,付出的代价是适当降低了衍射效率的均匀性。

图 5 为 GaP 声光偏转器的结构设计。声光介质材料为 GaP 晶体,键合层为金,电极层为铬,换能器为厚度 $2.2 \mu\text{m}$ 的钽酸锂晶体,表电极材料是金。换能器上有表电极的部分才会在电场激励下工作,

因此可通过设计表电极的尺寸来确定换能器的有效工作长度,进而控制产品的超声跟踪模式。

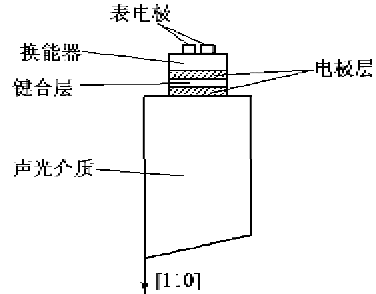


图 5 GaP 声光偏转器的结构设计

3 试验结果

声光器件通常采用锡做键合层材料,但大带宽声光偏转器的工作频率很高,用锡作键合层材料严重降低了衍射效率,因此必须选用高频特性好的金作键合层材料。金的熔点、硬度等特性与锡差异很大,使键合工作很难完成,易出现晶体压焊面开裂的情况,如图 6(a)所示。我们从真空度、温度、压力等多方面开展了研究,压焊出了合格的块体,如图 6(b)所示。

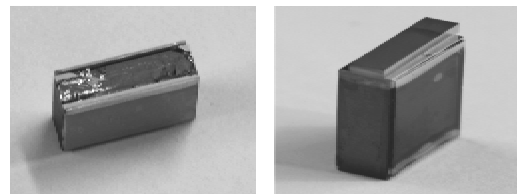


图 6 压焊后的 GaP 块体

本研究的中心频率为 1 600 MHz,中心频率的特征长度为 $82 \mu\text{m}$ 。按照标准的两片超声跟踪理论,换能器工作的总长度应为中心频率特征长度的 2.2 倍,即 $180 \mu\text{m}$,这时工作带宽很宽,但衍射效率较低。为了提高衍射效率,我们采用准超声跟踪结构,将单片换能器的长度设计为中心频率特征长度的 2 倍,这时换能器工作的总长度是中心频率特征长度的 4 倍,即 $328 \mu\text{m}$ 。实测声光偏转器样品的 3 dB 带宽达 900 MHz,峰值衍射效率达 $8\% @ 1 \text{ W}$,衍射光在声光介质外的动态扫描角为 5.2° 。

图 7 为用 He-Ne 激光器测得的衍射效率与工作频率的关系。

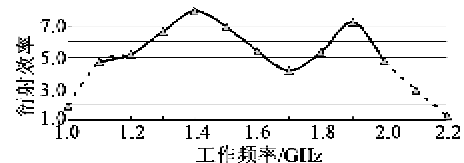


图 7 衍射效率与工作频率的关系

4 假点问题

GaP 晶体在纵波工作模式下,我们在 1 级衍射光斑与 2 级衍射之间发现了多余的衍射光斑,如图 8 所示,我们称“多余的衍射光斑”之为“假点”,改变工作频率时“假点”的位置也随着改变,且始终处于在 1 级衍射光斑与 2 级衍射之间。

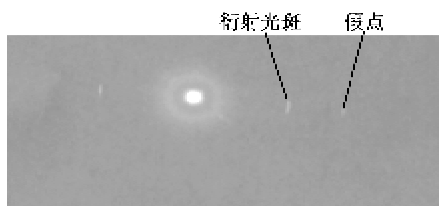


图 8 用 GaP 制作的器件出现了假点

在同等条件下我们仅将声光介质 GaP 换为铌酸锂后,“假点”消失了。因此“假点”与 GaP 晶体有

关,形成的机理还有待研究。

5 结束语

基于高频、大带宽声光偏转器的声光信息处理系统能显著提升宽带电子侦察系统的综合性能,但由于声光偏转器技术水平的限制,抑制了声光信道化接收机的发展。文章介绍了一种通过准超声跟踪结构设计来提高衍射效率的方法,实现了带宽与衍射效率的合理兼顾,为研制宽带的声光偏转器奠定了基础。

参考文献:

(上接第 693 页)

- [9] HÄRMÄS, ARTHUR W G, HARTMANN C S, et al. Inline SAW RFID tag using time position and phase encoding[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2008, 55: 1840-1846.
- [10] HARTMANN C S, CLAIBORNE L T. Anti-collision request pulse focusing system for use with multiple surface acoustic wave identification tags and method of operation thereof; U. S. Patent, 7084768[P]. 2003-08-01.
- [11] HARTMANN C S, BROWN P, BELLAMY J. Design of global SAW RFID tag[C]//Chiba, Japan; Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communications Systems, 2004; 15-19.
- [12] HARTMANN C S. Surface acoustic wave identification tag having enhanced data content and methods of operation and manufacture thereof; U. S. Patent, 6 966 493[P]. 2005-11-22.
- [13] HARTMANN C S, PLESSKY V P. Single phase unidirectional surface acoustic wave transducer and improved reflectors; U. S. Patent, 7 173 360[P]. 2007-02-06.
- [14] MALOCHA D C, PUCCIO D, GALLAGHER D. Orthogonal frequency coding for SAW device applications [C]. S. l.; IEEE Int Ultrasonics Symp, 2004; 1082-1085.
- [15] ANON. Technology focus; Norway implements of vehicle identification[J]. Microwave and RF Engineering, 1989, 61(7): 42-43.
- [16] REINDL L, SCHOLL G, OSTERTAG T, et al. Theory and application of passive SAW radio transponder as sensors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1998, 45(5): 1281-1292.
- [17] REINDL L, SCHOLL G, OSTERTAG T, et al. Theory and application of passive SAW radio transponders sensors[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 1998, 45(5): 1281-1292.
- [18] REINDL L, OSTERTAG R T, RUILE W, et al. Hybrid SAW-device for a European train control system [J]. 1994 IEEE Ultrasonics Symp, 1994; 175-179.
- [19] HARTMANN P R. A passive SAW based RFID system for use on ordnance [C]//Orlando, FL, U. S.; IEEE International Conference on RFID, 2009; 291-297.
- [20] SHULL S A, SILVER G M. Logistics information systems for human space exploration; state of the art and emerging technologies[J]. Space Ops, 2006; 1-10.
- [21] HÄRMÄS, PLESSKY V P, HARTMANN C S, et al. Z-path SAW RFID tag[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2008, 55(1): 208-213.
- [22] REINDL L. Track-changing structures on YZ-LiNbO₃ [J]. IEEE Ultrasonics Symp, 1997; 77-82.
- [23] REINDL L, RUILE W, RUPPEL C C W. Identifizierungssystem mit OFW-ID-tags; German Patent, DE4336897[P]. 1993-10-28.
- [24] BULST W E, REINDL L, RUPPEL C C W, et al. Radio scanning system using acoustical waves; U. S. Patent, 5910779[P]. 1999-06-08.
- [25] IANELLI Z, KOSLAR M. Surface-wave transducer device and identification system with such device; U. S. Patent, 6 788204[P]. 2004-09-07.
- [26] BREED G. A summary of FCC rules for ultra wide-band communications[J]. High Freq Electron, 2005, 4: 42-44.