

# 磷化镓晶体的声光特性及应用

吴畏,郝建华,令狐梅傲,朱吉,周建国,高维松,谭江丽

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

**摘要:**磷化镓晶体具有高声光优值、高声速和低声衰减系数,是制作声光调制器的优良材料之一。对磷化镓晶体的关键声光参数进行了测试评估,并基于磷化镓晶体研制了光脉冲上升时间为 6.6 ns 的高速光纤声光调制器,移频频率为 1.5 GHz 的高频空间声光调制器,以及 3 dB 移频带宽 125 MHz 的大带宽光纤声光调制器。

**关键词:**磷化镓晶体;声光调制器;高速;高频;大带宽

**中图分类号:**TN65 **文献标识码:**A

## Acousto-Optic Properties and Applications of GaP Crystal

WU Wei, HAO Jianhua, LINGHU Meiao, ZHU Ji, ZHOU Jianguo, GAO Weisong, TAN Jiangli

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

**Abstract:** GaP crystal is an excellent material for developing acousto-optic modulators (AOMs) because it possesses a high acousto-optic (AO) figure of merit, outstanding sound velocity, and a low acoustic attenuation coefficient. In this study, important GaP crystal AO parameters were tested and evaluated. A high-speed fiber AOM with an optical pulse rise time of 6.6 ns, a high-frequency AOM with shift frequency of 1.5 GHz, and a large-bandwidth fiber AOM with 3 dB shift bandwidth of 125 MHz based on GaP crystal were developed.

**Key words:** GaP crystal; acousto-optic modulators; high speed; high frequency; large bandwidth

### 0 引言

声光调制器利用声光互作用原理对激光束进行调制、移频处理,是一种重要的光学基础器件,广泛应用于工业/医疗激光、光纤分布式传感、激光测风雷达、冷原子物理等领域。随着相关技术的发展,要求声光调制器具有更快的调制速度、更高的移频频率以及更大的移频带宽,同时对调制器所用声光介质材料提出了新的挑战。GaP 声光材料因具有高声光优值、高声速、低声衰减的优点而成为制作高速、高频、大带宽声光调制器的理想材料之一。

本文对 GaP 声光材料的声光性能进行研究,经测试获得关键的声光参数,并根据所测声光参数开发了基于 GaP 声光材料的高速、高频、大带宽声光调制器产品。

### 1 GaP 声光介质材料

声光介质材料是声波与入射光发生声光互作

用获得衍射光的平台<sup>[1]</sup>,是声光调制器的核心,其声光特性参数,如声光优值、声衰减系数、声速、折射率等直接影响着声光调制器的衍射效率、光脉冲上升时间、可靠性等关键指标。

20 世纪 70 年代,I. C. Chang<sup>[2]</sup>对 3 种基本类型的声光器件(偏转器、调制器和可调滤波器)材料选择给出了相应的标准。而具有光学各向同性的 GaP 是声光调制器应用中的最佳材料。相比于调制器应用最多的 TeO<sub>2</sub> 声光材料,GaP 声光材料具有以下优点:

1) 更高的声速,更低的声衰减系数,是制作高频高速声光调制器的理想材料。

2) 更高的声光优值,能在更低的驱动功率下达到所需的衍射效率。

3) 作为三五族化合物半导体材料,热导率比传统晶体材料高几个数量级,同时材料各向热膨胀系数一致,具有更好的可靠性和热稳定性。

表1为TeO<sub>2</sub>和GaP的主要性能参数对比。

表1 TeO<sub>2</sub>和GaP的主要性能参数

材料	TeO <sub>2</sub>	GaP
透光范围/ $\mu\text{m}$	0.35~5.00	0.6~10.0
声光优值 $M_2/(10^{-15} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	34.5 <sup>[3]</sup>	44.6 <sup>[4]</sup>
声衰减系数 <sup>[5]</sup> / $[\text{dB} \cdot (\text{cm} \cdot \text{GHz}^2)^{-1}]$	15.0	6.0
声速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4 200	6 320
热导率/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	3.27~2.19@	1 100 <sup>[2]</sup>
	[100] <sup>[6]</sup>	
	4.17~2.81@	
热膨胀系数/ $(10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	[001] <sup>[6]</sup>	5.3 <sup>[2]</sup>
	21@[100] <sup>[7]</sup>	
	5.5@[001] <sup>[7]</sup>	

## 2 声光参数测试方法

晶体材料的声光性能参数是声光器件设计中的重要依据。在研制GaP晶体声光器件前有针对性地对晶体声光优值、声衰减系数、声速等重要物理参数进行测试评估尤为必要。

### 2.1 声光优值测试评估方法

采用比较法对晶体材料的声光优值参数 $M_2$ 进行测试评估。选择已知声光优值的融石英玻璃作为陪测材料进行测试样品的加工。在融石英材料通声面制作的压电换能器用作测试的声场激励源。利用真空冷压焊工艺将融石英材料下通声面与声光介质的上通声面进行键合。声光优值测试原理如图1所示<sup>[5]</sup>。

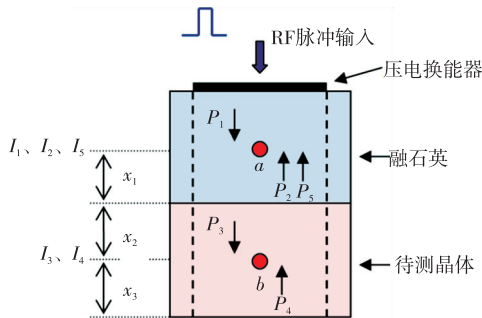


图1 声光优值参数测试原理

外部驱动器在压电换能器上添加被周期性调制的高频载波信号,压电换能器激发的单一脉冲声场信号进入融石英和待测晶体组成的测试样品中,信号在压电换能器下表面和待测晶体底部界面间连续反射。当脉冲声波行至测试点 $a$ 处(与

融石英下端面的距离为 $x_1$ ),其声功率为 $P_{a1}$ ,此时引起的衍射光强为 $I_1$ ;经过点 $a$ 后,继续传输至融石英与待测晶体界面处,部分声功率被反射进入融石英晶体,部分声功率透射进入待测晶体。设融石英和待测晶体的声衰减系数分别为 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ ,介质表面声场反射率为 $R$ ,则反射到测试点 $a$ 处的声功率 $P_{a2}$ 为

$$P_{a2} = RP_{a1}e^{-2\alpha_1 x_1} \quad (1)$$

由此引起的衍射光强为 $I_2$ 。透射进入待测晶体的脉冲声波传输到测试点 $b$ 处(与待测晶体上端面的距离为 $x_2$ ,与待测晶体下端面的距离为 $x_3$ )时,其声功率 $P_{a3}$ 为

$$P_{a3} = (1-R)P_{a1}e^{-(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} \quad (2)$$

由此引起的衍射光强为 $I_3$ 。脉冲声波在经过测试点 $b$ 后继续传输,经过待测样品与空气界面反射后再次回到测试点 $b$ 。设待测样品和空气界面的反射率为 $R'$ ,此时声功率 $P_{a4}$ 为

$$P_{a4} = R'(1-R)P_{a1}e^{-(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + 2\alpha_2 x_3)} \quad (3)$$

由此引起的衍射光强为 $I_4$ 。声脉冲继续向前传输至融石英和待测晶体界面,部分透射进入融石英并传输至点 $a$ ,此时声功率 $P_{a5}$ 为

$$P_{a5} = R'(1-R)P_{a1}e^{-2(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_2 x_3)} \quad (4)$$

由此引起的衍射光强为 $I_5$ 。在弱声光互作用条件下,声光器件的声光优值 $M_2$ 越高,声功率 $P$ 越大,衍射效率越高,则所测衍射光强 $I$ 越强,由此可得:

$$I_{1,2,5} \propto M_{20} P_{1,2,5} \quad (5)$$

$$I_{3,4} \propto M_2 P_{3,4} \quad (6)$$

$$\frac{I_3 I_4}{I_1 I_5} = \frac{M_2^2 P_3 P_4}{M_{20}^2 P_1 P_5} \quad (7)$$

将式(2)-(6)代入(7)可得:

$$M_2 = \sqrt{\frac{I_3 I_4}{I_1 I_5}} M_{20} \quad (8)$$

式中 $M_{20}$ 为融石英材料的已知声光优值。通过光电探测器测试 $I_1$ - $I_5$ 的光脉冲幅度,并利用式(8)计算出待测声光材料的声光优值参数。

### 2.2 声衰减系数、声速测试方法

采用脉冲反射法评估材料的声衰减系数。脉冲声波在声光晶体通声方向两端面多次反射,产生了多个衍射光脉冲。根据衍射光脉冲的幅度计算声衰减系数,测试原理如图2所示。

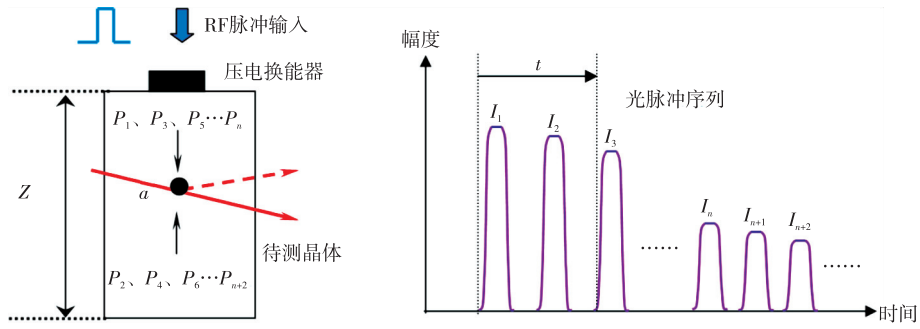


图 2 声衰减系数、声速测试原理

在弱声光相互作用条件下,衍射效率计算公式简化为

$$\eta = \frac{I_{1\text{级衍射光}}}{I_{\text{输入光}}} = \frac{\pi^2 M_2 L}{2\lambda^2 H} P_a \quad (9)$$

式(9)中衍射效率与声功率成正比。因此,通过测算衍射光强度,即可得到声场中各点的相对声强  $P^{[8]}$ 。外部驱动器将射频脉冲信号加载于压电换能器,激发出的单一脉冲声场信号传入待测晶体并在其上、下端面来回反射,而每经过一次测试点将产生一个衍射光脉冲。由于声功率在传播过程中不断减少,故衍射光在时域上构成了逐渐衰减的脉冲序列。利用光电探测器采集衍射光序列,通过数字示波器测

试脉冲幅度,得到声光介质的声衰减系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{10}{2Z} \lg \frac{I_n}{I_{n+2}} \quad (10)$$

同理,通过测量衍射光脉冲的时域延时可推算出材料声速  $v$ :

$$v = \frac{2Z}{t} \quad (11)$$

式中  $t$  为脉冲触发后出现的第 1 个与第 3 个光脉冲前沿的时间间隔。

### 3 GaP 晶体声光参数测试

建立了 GaP 晶体的声光优值、声速和声衰减系数测试系统框图如图 3 所示。

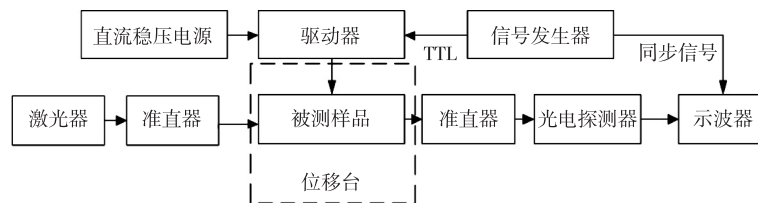


图 3 测试框图

制备测试用声光晶体时,不做吸声处理,使声脉冲在通声方向的两界面来回反射,进而产生多个衍射光脉冲,并根据衍射光脉冲的幅度计算声光参数。图 4 为测试用 GaP 声光晶体。

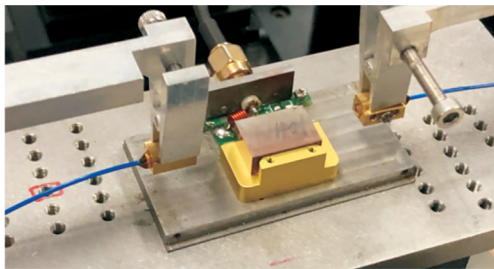


图 4 测试用 GaP 声光晶体

图 5 为测试声光优值时,探测所得幅度  $I_1-I_5$  的衍射光脉冲。

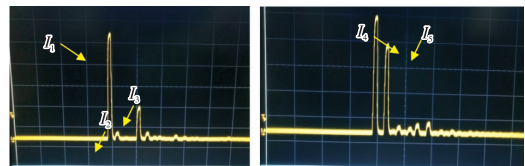


图 5 声光优值测试时产生的衍射光脉冲

通过脉冲反射法对声光材料的声衰减系数和声速进行测试,测试光脉冲幅度如图 6 所示。

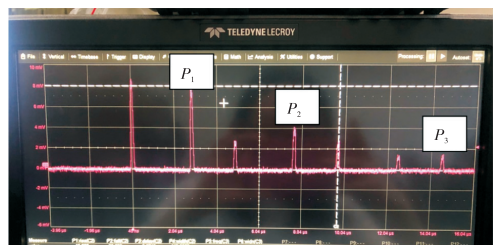


图 6 声衰减系数测试时产生的衍射光脉冲

通过测试得到所用 GaP 晶体材料的声光参数如表 2 所示。

表 2 GaP 晶体声光参数测试结果

参数	理论值	实测值
声光优值/ $(10^{-15} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	44.6	37.8
声衰减系数/ $[\text{dB} \cdot (\text{cm} \cdot \text{GHz}^2)^{-1}]$	6.0	5.4
声速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6 320	6 269.6

#### 4 GaP 晶体声光调制器设计及应用

为制作性能良好、质量可靠的声光调制器,首先制备了直径 2 英寸(1 in=2.54 cm),长度 235 mm 的非掺高质量光学级磷化镓单晶,如图 7 所示,并加工成尺寸为 15 mm×10 mm×5 mm 的磷化镓晶体,如图 8 所示。基于所测试的 GaP 晶体声光参数,开发了高速、高频、大带宽声光调制器产品,其作为已成熟的 TeO<sub>2</sub> 材料声光调制器的重要补充,可应用于更多细分领域。



图 7 光学级非掺磷化镓单晶



图 8 磷化镓晶体

#### 4.1 高速光纤声光调制器

利用高声速 GaP 晶体材料研制了工作波长 0.6~1.6 μm,工作频率 300 MHz,上升/下降时间 <8 ns 的高速光纤声光调制器系列产品,如图 9 所示。将其应用于激光测风雷达系统,可减小探测盲区,提高探测精度;应用于超快激光器,可满足 80 MHz 高重频光脉冲选择;应用于光纤水听器时分复用系统<sup>[9]</sup>,则可提高系统时域探测分辨率和携带阵列的能力。产品主要测试指标如图 10 和表 3 所示。



图 9 高速光纤声光调制器产品实物

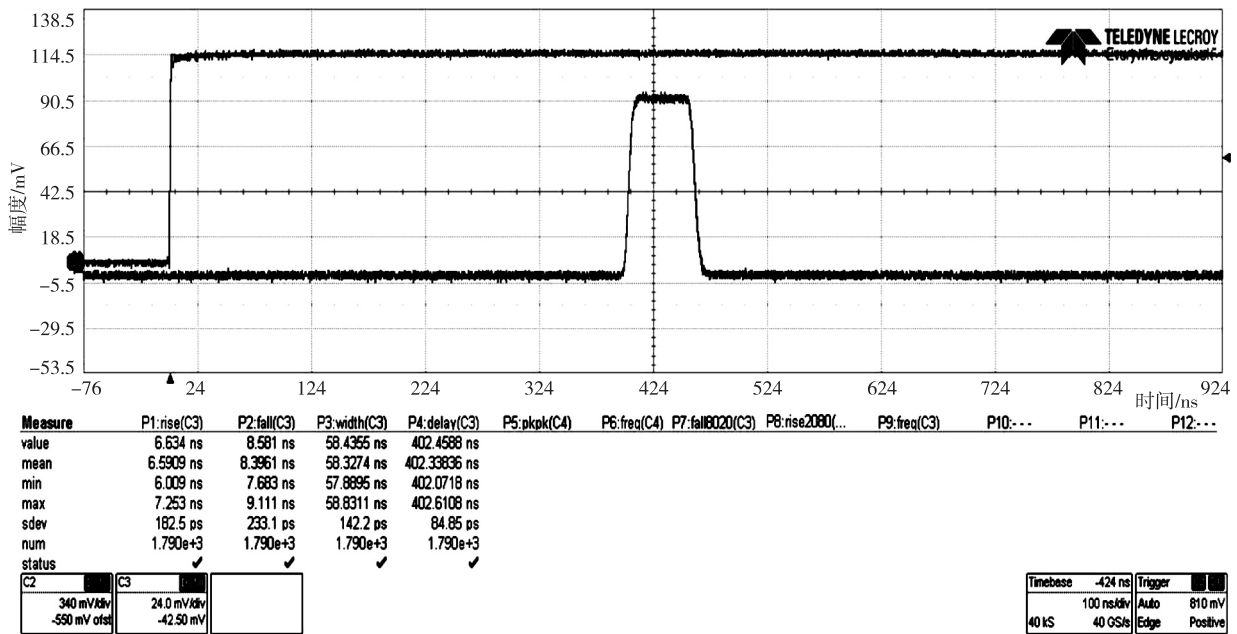


图 10 产品光脉冲上升/下降时间测试图



表 3 产品参数测试表

序号	指标名称	SGTF300-1550-1P 型保偏光纤声光调制器
1	工作波长/nm	1 550
2	光脉冲上升时间/ns	6.6
3	光脉冲下降时间/ns	8.4
4	插入损耗/dB	2.17
5	偏振消光比/dB	31.48

4.2 高频声光调制器

冷原子物理中需要利用声光调制器的移频特性改变激光束的频率,并提升频率稳定性,从而匹配不同原子的特定能级跃迁。特别是,在铷原子的应用中用于囚禁铷原子同位素的激光频率差都是 GHz 量级<sup>[10]</sup>。利用 GaP 材料声衰减系数低的特点开发了高频声光调制器产品,如图 11 所示,其最高移频频率达到 1.5 GHz,在波长 633 nm 下可达到 40%的衍射效率。

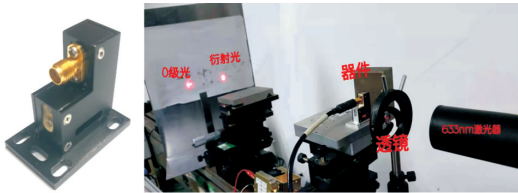


图 11 1.5 GHz 声光调制器产品实物及衍射效率测试系统

4.3 大带宽光纤声光调制器

在光纤声光调制器应用中,若声速越快,带内衍射光偏转角越小,则器件的集光能力越强,器件的 3 dB 移频带宽越大。利用 GaP 材料高声速的特点开发了 3 dB 带宽达到 125 MHz 的光纤声光调制器产品,其应用于宽带线性扫频激光测距(FM-CW)<sup>[11]</sup>中,将大幅提高距离分辨率。

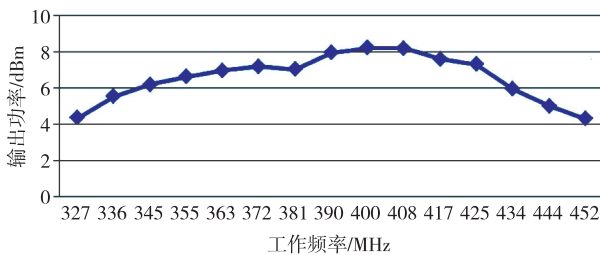


图 12 大带宽光纤声光调制器实测带宽

5 结束语

本文介绍了 GaP 晶体在声光调制器应用中的优点,并依据声光材料参数的测试方法对 GaP 晶体进行声光参数测试。根据参数测试结果设计开发了基于 GaP 晶体的高速、高频、大带宽系列声光调制器产品,产品光脉冲上升时间达到 6.6 ns,移频频率达到 1.5 GHz,3 dB 移频带宽达到 125 MHz,进一步推动了光纤水听器时分复用、超快激光、相干激光雷达等领域的发展。

参考文献:

- [1] 张泽红,陆川,何晓亮,等. GaP 声光偏转器[J]. 压电与声光,2014,36(5):694-697.
- [2] CHANG I C, 黄显淑. 声光器件的材料选择[J]. 压电与声光,1986(2):59-65.
- [3] 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.
- [4] 朱吉,吴畏,王智林,等. 基于磷化镓材料的高速光纤声光调制器[J]. 压电与声光,2020,42(1):21-24.  
ZHU Ji, WU Wei, WANG Zhilin, et al. The high speed fiber acousto-optic modulator based on InP[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2020,42(1):21-24.
- [5] 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.
- [6] 李星亮. TeO<sub>2</sub> 晶体生长及其热、力学性能研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2018.
- [7] 蔡起善. 二氧化碲晶体的结构与物理性能[J]. 压电与声光,1981(2):55-60.
- [8] 朱劲松. 晶体物理研究方法[D]. 南京:南京大学出版社,1990.
- [9] 陈华志,周建国,吴中超,等. 超高速光纤耦合声光调制器的设计及其应用[J]. 应用声学,2019,38(2):166-172.
- [10] 郝恺,周林,汤彪,等. 85Rb 和 87Rb 双磁光阱的同时实现及特性研究[J]. 量子电子学报,2013(3):169-174.
- [11] 邹峰,郑天雄,张官扬,等. 基于 AOM 声光调制器线性扫频测距研究[J]. 应用激光,2020,40(6):1132-1137.