

# 快速热电探测器

冯锡淇

(中国科学院上海硅酸盐所)

邵黎坝 张添立

(上海无线电六厂)

## 提 要

本文介绍铌酸锂、钽酸锂快速热电探测器的器件设计和工艺,包括器件响应率的计算和测定,以及四种常用材料激光损伤阈值的比较;讨论了压电谐振的产生机理和消除办法。

## High speed pyroelectric detectors

Feng Xiqi

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

Shao Lixun Zhang Tianli

(No. 6 Radio Works, Shanghai)

## Abstract

In this paper, the design and fabrication of high speed pyroelectric detectors made from  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  crystals, are described, including calculation and measurement of detectors responsivities and comparison on laser damage threshold of 4 kinds of material in common use; the generation mechanism of pyroelectric resonance and its elimination are discussed.

## 一、引 言

脉冲激光的波形和能量测量,特别是宽度在10毫微秒以下的短脉冲,要求探测器有极快的响应速度、宽的线性工作范围,以及高的激光损伤阈值。热电探测器是基于激光引起热释电晶体的温度变化从而导致晶体电极

矩改变,在外电路产生相应的电流或电压变化。选择合适的吸收涂层,可使它对辐射波长无选择性,从X射线到毫米波范围内具有相当平坦的光谱响应,因此原则上适用于目前已知的任何波长的激光器。它是一种室温器件,响应速度远远超过其他热探测器,最高工作频率仅受晶格热弛豫时间常数的限制

收稿日期: 1979年11月15日。

( $10^{-12}$  秒)。已报导响应时间为 170 微微秒的热电探测器<sup>[1]</sup>, 用探测器-示波器方式直接观察了 1.06 微米的 YAG 锁模激光器的输出波形。迄今报导最快的热电探测器上升和下降时间已达 15 和 30 微微秒<sup>[2]</sup>。但热电探测器的响应速度是以牺牲电压响应率为代价的, 上升时间为毫微秒量级的器件响应率仅为  $10^{-1} \sim 10$  伏/兆瓦。虽然如此, 对于高功率激光脉冲, 这样低的响应率仍然是有价值的。

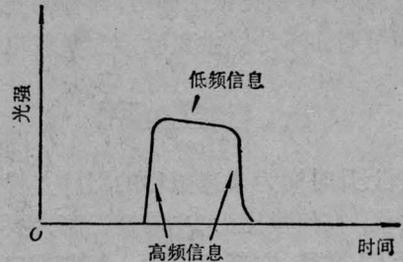
用于快速热电探测器的材料大多为  $\text{LiTaO}_3$ <sup>[1,3]</sup> 和  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ <sup>[3,4]</sup>, 至于  $\text{LiNbO}_3$  很少报导。考虑到 LN 极高的居里点以及高的激光损伤阈值, 可以预期它有更宽的线性范围及更好的稳定性。

本文介绍 LN 和 LT 毫微秒量级热电探测器的器件设计和工艺, 并简略介绍器件的初步使用结果。

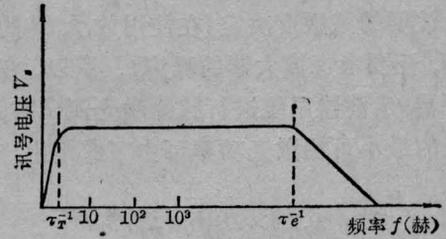
## 二、器件设计

众所周知, 任一脉冲波形都可进行傅里叶变换。为了正确地再现该脉冲, 应包括从直流到  $\infty$  之间的所有频率分量。热电探测器的频率响应受热时间常数和电时间常数的限制, 只有在  $\frac{1}{\tau_T} < \omega < \frac{1}{\tau_e}$  范围内具有平坦响应(图 1(b)),  $\tau_T$  和  $\tau_e$  分别为热和电时间常数。实际上, 现有的短脉冲激光, 除非经过特别的整形, 都是钟形或指数形脉冲, 不含有直流或低频分量, 因此短激光脉冲的波形测量主要取决于探测器的高频限, 只要有足够高的频率响应, 就能正确再现相应的激光脉冲波形。对于图 1(a) 所示含有低频分量的脉冲, 可用文献 [5] 的方法, 这里不予讨论。

为了使探测器在再现入射脉冲波形的前提下具有尽可能大的电压响应率, 必需仔细确定器件参数。探测器-放大器-示波器或探



(a) 脉冲激光讯号



(b) 热电探测器频率响应

图 1 热电探测器的频率响应

测器-示波器系统的上升时间  $t_r$  ( $10 \sim 90\%$ )  $= 2.2R_L C_T$ <sup>[6]</sup>,  $C_T$  为器件和示波器输入电容之和, 应使系统的总上升时间  $t_r$  小于待测激光脉冲宽  $\tau$ , 对于  $R_L = 50$  欧姆的输入阻抗, 应有

$$C_T \leq \frac{\tau}{110} \quad (1)$$

进而可以确定探测器电容  $C_0$ 。例如, 若要求上升时间为 2 毫微秒, 设示波器输入电容  $C_i = 10$  微微法, 则探测器最大电容应为 8.2 微微法。

热电探测器的电压响应率由下式表示:

$$R_v = \frac{\eta A P_{(T)} \omega R_L}{G (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}} \quad (2)$$

$\eta$  为上电极吸收率,  $A$  为灵敏区面积,  $P_{(T)}$  为热释电系数,  $\omega$  为调制频率,  $R_L$  为负载电阻,  $G$  为器件对环境的总热导,  $\tau_T = H/G$ ,  $H$  为灵敏元热容,  $\tau_e = R_L C_T$ 。而在  $\frac{1}{\tau_T} < \omega < \frac{1}{\tau_e}$  范围内,  $R_v$  与频率无关,

$$R_v = \frac{\eta P_{(T)} R_L}{\rho C_p d} \quad (3)$$

$\rho$  为密度,  $C_p$  为比热,  $d$  为探测器晶片厚度。

计算表明,在宽带工作时,器件的正切损耗噪声可略而不计,主要噪声为负载电阻噪声

$$V_R = \left[ \frac{4T}{R_L \omega C_0^2} \right]^{1/2}$$

例如,上升时间为2毫微秒的器件,噪声约6.4微伏,在信噪比为10的情况下,要求信号大于64微伏,它低于驱动一般宽带示波器所需的最小信号电压,因而最小可测信号由示波器的灵敏度决定(在使用放大器的情况下,还要考虑放大器的噪声)。所以,在用探测器-示波器系统进行脉冲激光测试时,该系统的最小可测激光功率可由下式给出:

$$P_{\min} = \frac{1}{1.13 \times 10^{11} \gamma S_v R_L C_0 M_R} \quad (5)$$

$S_v$ 为示波器的灵敏度,即产生1厘米高度的信号所需的电压(厘米/伏); $M_R$ 为热释电材料的响应率优值因子(库仑·厘米/焦耳); $C_0$ 为器件电容(法拉); $R_L$ 为负载电阻。在选定了器件和示波器之后,就可以对该测试系统的能力作出估价或选定合适的激光强度,以便使探测器在最佳情况下工作。

表1列出适于制作快速热电探测器的几种材料的性能。

表1 几种材料的热释电性能

材 料	居里温度 $T_c$ (°C)	测试温度 (°C)	介电常 数 $\epsilon$	响应率优值 $M_R(\times 10^{-10})$
LiNbO <sub>3</sub>	1210	25	30	0.48
LiTaO <sub>3</sub>	618	25	54	1.35
Sr <sub>0.48</sub> Ba <sub>0.52</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	115	25	380	0.81
PbTiO <sub>3</sub> (陶瓷)	492	25	142	0.59

由表1可见就响应率而言,LT最高,但LN能承受较高功率密度的激光,并有极高的居里温度,因而也是一种良好的快速热电探测器材料。

### 三、器件结构和性能

如前节所述,快速热电探测器的灵敏区

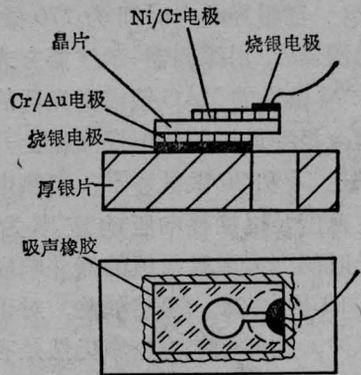


图2 快速热电探测器管芯

面积和晶片厚度是根据被测对象对器件上升时间的要求而确定的,我们取灵敏区面积为 $\phi 2.0$ 毫米和 $\phi 0.8$ 毫米,晶体厚度对LN为0.045~0.27毫米,对LT为0.060~0.40毫米,器件结构见图2,晶片的下底面用一层薄而匀的银浆烧结在银质热沉上,以利散热。金属衬底会使器件低频区的响应下降,但在高频工作时这种影响可以忽略<sup>[7]</sup>。热沉上的小孔是为了减少引出电极区的无效电容。下面还将指出上述结构还有利于抑制压电谐振。图3为器件的外形照片,器件一般为T0-5封装,少数器件直接安装在高频同轴插座上。

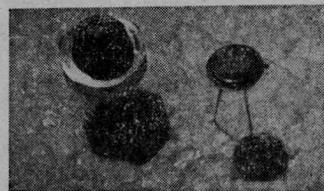


图3 探测器外形图

晶片正面为细磨面,上电极为Ni/Cr合金(Ni80, Cr20),背面抛光,采用Ni/Cr和Au双层电极,它使穿过晶片尚未被吸收的那部分入射辐射折回晶体内。上电极方块电阻为200~250欧姆/□,膜层厚度由方块电阻估算为50Å,从干涉显微镜的测量也证实厚度远小于它的测量下限(300Å)。因而该层金属的热时间常数文献[3]可近似由下式表达:

表2 一些LN热电探测器的电压响应率测试结果

编 号	灵敏区直径 D (毫米)	晶片厚度 d (厘米)	电 压 响 应 率 $R_v$ (伏/兆瓦)		相对误差
			计 算 值 ( $\eta=0.6, R_L=75$ 欧姆)	测 量 值 ( $R_L=75$ 欧姆)	
LN22	$\phi 0.8$	0.0045	14	16	14%
LN63	$\phi 0.8$	0.0045	14	12	14%
LN34	$\phi 0.8$	0.015	4.3	5.7	32%
LN55	$\phi 2.0$	0.015	4.3	2.9	32%
LN45	$\phi 2.0$	0.027	2.4	2.2	8%

$$\tau_T \approx \rho C_p x^2 / K \quad (6)$$

$x$  为膜厚,  $K$  为它的热导率, 即使以  $x=300\text{\AA}$  推算, 器件的热时间常数应小于 280 微微秒 ( $x=50\text{\AA}$ , 则  $\tau_T \approx 8$  微微秒)。可见 Ni/Cr 上电极可以满足快速热电探测器的热设计要求。测量了带 Ni/Cr 膜的 LN、LT 晶片 (厚度与器件上电极相当) 在 1.06 微米下的反射率约为 30~40%, 由此估计上电极的吸收率约 0.6。

器件电压响应率的测试设备与文献[6]所述相同, 图4为器件对脉冲激光的响应波形, 即脉冲激光的瞬时功率波形, 它近似为三角形, 它的面积对应于单次脉冲能量  $E$ , 即

$$E = \frac{1}{2} P_p \tau \quad \text{或} \quad P_p = \frac{2E}{\tau} \quad (7)$$

$\tau$  为脉冲总宽度, 对应三角形底边;  $P_p$  为峰值功率, 对应三角形的高。这样就可由激光光斑面积确定功率密度。探测器的响应电压直接由示波器测得。表2列出一些LN器件的响应率测量结果, 并与设计结果相比较。考虑到激光功率密度测量的较大误差, 以及各个器件上电极吸收系数的差异, 可以认为计算结果与测量值是接近的。

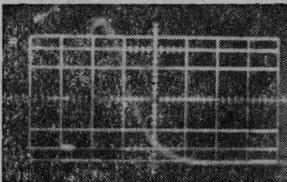


图4 探测器对单次脉冲激光的响应(LT19)

图5为LN探测器的输出特性, 测试设备与文献[7]相同, 仅YAG激光器的参数略作调整, 单次脉冲激光能量0.58焦耳/次, 脉宽0.25毫秒, 由图可见至少在约45千瓦/厘米<sup>2</sup>以下, LN探测器的输出是线性的。

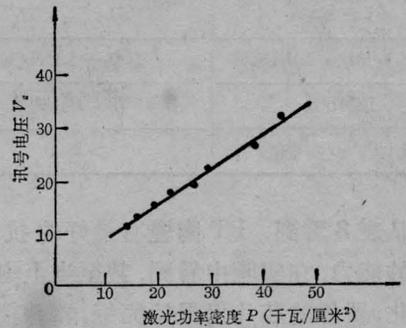


图5 LN热电探测器的输出特性(脉冲光)

#### 四、激光损伤阈值与压电谐振

为了获得大的信号输出, 要求探测器能忍受尽可能高的激光功率。对于高居里点材料, 最大输出信号取决于探测器晶片或上电极所能忍受的最大能量密度。当探测脉宽为一百微微秒或更窄的超短脉冲时, 上电极来不及将热量传入晶体, 因而探测器所能承受的最大功率由上电极的温升决定, 对应于上电极的熔点。由于这里测量的是毫微秒量级的脉冲, 如上所述, 上电极热传输时间远小于此, 因而探测器能够承受的最大功率将取决于晶片本身。

我们选择了 LN、LT、SBN<sub>(Ba=0.48)</sub> 晶体和 PbTiO<sub>3</sub> 陶瓷, 在大致相同的条件下测定了它们在单次脉冲激光作用下的损伤阈值。测试样品尺寸为 2.4×1.7×0.05 毫米, 垂直于 C 轴, 二面细磨, 上电极 Ni/Cr 膜, 下电极 Ni/Cr 和 Au 双层膜, 然后用薄层银浆烧结在氧化铝基片上, 用 YAG 激光器的 1.06 微米的单次脉冲激光进行照射, 脉宽 0.3 毫秒, 每次脉冲 1.1 焦耳, 功率密度用光斑大小加以调节, 晶片的上电极区在光斑中所处位置用一辅助的 He-Ne 激光束定位。以晶片开始出现明显裂纹、碎裂作为损伤阈值。测得的损伤阈值见表 3。

表 3 四种常用材料的激光损伤阈值

材 料	损伤阈值 $P_d$ (千瓦/厘米 <sup>2</sup> )
LiTaO <sub>3</sub>	54 < $P_d$ < 57
Sr <sub>0.52</sub> Ba <sub>0.48</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	略低于 LiNbO <sub>3</sub>
LiNbO <sub>3</sub>	72 < $P_d$ < 84
PbTiO <sub>3</sub> (陶瓷)	> 1300

从表 3 看到, PT 陶瓷有最好的抗激光辐照的能力, 在实验中看到, 甚至当上电极开始熔化, 器件的芯片仍保持完好, 器件能承受的激光功率密度实际上由 Ni/Cr 电极所限定。在三种晶体中, 以 LN 的损伤阈值最高, 而 LT 最低, 这就部分地弥补了 LN 器件电压响应率较低的缺点。应该指出, 由于测量损伤阈值时所用的激光脉宽与实际使用时不同, 而且测试样品尺寸和衬底也不同于实际器件, 再则测试的样品不够多, 因而表 3 所列结果只有相对意义。

压电谐振是快速热电探测器实际使用中十分讨厌的副效应, 严重时足以使器件无法工作。LN 和 LT 有良好的压电性, 它们的压电系数如表 4 所示。

热电探测器中的 LN 和 LT 晶片垂直于极化 C 轴, 当接收入射辐射时, C 轴方向的电位移变化为各项影响之和:

表 4 LN 和 LT 晶体的部分压电系数

材 料	压电系数 (×10 <sup>-11</sup> 库仑/牛顿)		
	$d_{31}$	$d_{32}$	$d_{33}$
LiNbO <sub>3</sub>	-0.086	-0.086	1.62
LiTaO <sub>3</sub>	-0.30	-0.30	0.92

$$\Delta D_3 = \varepsilon_{33}^T \Delta E_3 + P_{(T)} \Delta T + \sum_{j=1}^3 d_{3j} \Delta \theta_j \quad (8)$$

$\varepsilon_{33}^T$  为介电常数,  $\Delta \theta_j$  为应力变化, 则探测器总的电信号为:

$$\Delta V = AR_L \frac{\partial D_3}{\partial t} \quad (9)$$

A 为器件面积。在进行短脉冲激光探测时, 器件是非均匀受热的, 因为热流从上电极进入晶体需要时间, 而且电极下的晶体与周围晶体受热情况也不同, 这种急剧的应力变化在晶体中激发起声波, 在晶片或电极尺寸所决定的频率上谐振, (8) 式中的第三项即为相应的压电谐振信号。

对 LN、LT 探测器在电激励情况下的谐振特性进行了测量, 测量结果归纳如下: (i) 低频区 (<2 兆赫) 的振动模式相当零乱, 与晶片或电极尺寸无明显的对应关系; (ii) LN 器件的谐振峰一般比 LT 为低, 而且不明显。 (iii) 在与晶片厚度相对应的频率附近未观察到谐振峰; (iv) 在晶片四周涂以含铅的吸声橡胶, 谐振峰明显降低。

对上述结果可作如下解释: 我们的器件既不同于电极全部覆盖晶体的自由悬挂结构, 也不同于能陷型压电振子, 所以各种振动模式相互混杂; 在低频区为横向振动, 压电信号取决于  $d_{31}$  和  $d_{32}$ 。由表 4 可见, LN 器件的压电谐振幅值显然较低; 至于厚度振动模式, 由于银质衬底的声阻抗为  $38 (\times 10^6 \text{ 千克/秒} \cdot \text{米}^2)$ , 而 LN 和 LT 的声阻抗分别为 34.4 和 45.3, 相当接近, 而且过渡层为烧结银层, 因此晶体中激发的厚度模式的纵波几乎全部透过银层而进入衬底, 使晶片不能构成谐振腔, 从而消除了厚度振动模; 在晶片四

周涂复吸声橡胶,可有效地衰减低频振动模,因而基本上抑制了器件的压电谐振。

## 五、应 用

快速热电探测器可应用于激光脉冲的能量和波形测量。当然,如果灵敏度足够或配以宽带放大器,也可用于其它快速辐射过程,如等离子体辐射、激波风洞热流测量、脉冲 $\gamma$ 射线接收等。

复旦大学光学系曾将我们的 LN 探测器试用于 CO<sub>2</sub> 激光脉冲探测: 横向激励高气压 CO<sub>2</sub> 激光器,经 OFID 效应形成短脉冲,用热电探测器观察到的波形与英国 Roffin Co. 的光子牵引探测器很接近,最佳情况下测得脉宽约 2 毫微秒,但热电探测器输出信号小,后沿略长。器件灵敏区  $\phi 2$  毫米,示波器为 VP5405A 型,频响 200 兆赫,灵敏度 1 厘米/5 毫伏,电缆应尽可能短。此外, LN 和 LT 器件也已用于 TEA CO<sub>2</sub> 激光脉冲输出的波形测量,脉宽 200~300 毫微秒。

(上接第 12 页)

界面能级的,理论上估计 GaAs-GaAlAs 异质结界面上的悬挂键数目应是  $10^{12}$  厘米<sup>-2</sup>左右<sup>[7]</sup>。而 GaAs-GaAlAs 异质结一般认为晶格匹配得十分理想,但仍有界面缺陷存在。激光器的老化研究表明,界面缺陷往往是生成暗线的发源地,对寿命是有影响的,如能系统地做激光器老化前后小电流伏安特性的研究,或许能找出某种程度上预测激光器寿命的简便方法。

## 参 考 文 献

[1] C. H. Herny et al.; *J. Appl. Phys.*, **49**, 3530

为了测量更短的激光脉冲波形,器件上升时间愈短,则响应率愈低,而由于热释电晶片或上电极层损伤阈值的限制,不可能无限地提高被测激光照射的功率密度。因此有必要配置低输入阻抗(50 欧姆)的宽带前置放大器,当然,这种放大器在技术上并非轻而易举。此外,也应注意改进器件和示波器的连接方式。

## 参 考 文 献

- [1] C. B. Roundy et al.; *Opt. Commun.*, 1974, **10**, 374.  
[2] S. C. Stotlar et al.; *Inter. IEEE Symp. on Appl. of Ferroelectrics*, 1979, Digest, p. 95.  
[3] C. B. Roundy, R. L. Byer; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, 512.  
[4] Y. V. Voronov et al.; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1977, **7**, 1082.  
[5] J. G. Bergman et al.; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 308.  
[6] C. B. Roundy; *Proc. of SPIE*, Vol. 62, *Infrared Tech.*, 1975, p. 191.  
[7] 冯锡洪等;《激光》, 1979, **6**, No. 10, 46.

(1978).

- [2] J. F. Womac et al.; *J. Appl. Phys.*, **43**, 4129 (1972).  
[3] R. L. Anderson; *Solid-State Electronics*, **5**, 341 (1962).  
[4] J. P. Donnelly; *Proc. IEEE*, **113**, 1468 (1966).  
[5] A. R. Riben et al.; *Int. J. Electronics*, **20**, 583 (1966).  
[6] 史西蒙,《半导体器件物理》, 辽河实验厂译, p76 (1973).  
[7] B. L. Sharma, R. K. Purohit; *Semiconductor Heterojunctions*, 1974.