

重频脉冲激光的热释电探测方法

张磊 赵军 杨鹏翎 邵碧波 王振宝 闫燕

(西北核技术研究所激光与物质相互作用实验室, 陕西 西安 710024)

摘要 以热释电探测器的工作原理为基础,研究了热释电探测器对重频脉冲激光的瞬态响应特性,建立热释电探测器单脉冲激光辐照的工作模型,分析了影响探测器频率特性的主要因素,根据材料和结构参数模拟计算了实际应用中的响应模型,重点研究了电时间常数和热时间常数对测量的影响。设计了能够提高探测器响应速度的信号检测电路并对其进行计算仿真。完成了探测器的频率响应、脉宽响应等实验测量,验证了热释电探测器用于高重频、窄脉冲激光能量测量的可行性,并给出了目前探测单元的测量范围、线性动态范围及不确定度等指标。

关键词 激光技术; 信号检测电路; 热释电探测器; 高重频; 脉冲激光信号

中图分类号 TN209

OCIS 140.3538 040.1880

文献标识码 A

Pyroelectric Detecting of High-Repetition-Frequency Pulse Laser

Zhang Lei Zhao Jun Yang Pengling Shao Bibo Wang Zhenbao Yan Yan

(Laboratory of Laser and Material Interaction, Northwest Institute Nuclear of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract Based on the working principle of pyroelectric detector, the transient response characteristics to the pulse laser of the detector were researched. The working model of pyroelectric detector single pulse radiation was built, and the model of the response used in practical application was simulated according to the material and structure parameters. The influences of the detector material properties and structural parameters on the detector response characteristics were also analyzed through simulation, in which the influences of electricity time-constant and the hot time-constant were studied mostly. Signal extraction circuits for high-repetition-frequency pulse were designed. Finally, a number of repetition frequency laser radiation experiments on the pyroelectric detector and signal extraction circuits designed were carried out. The comparative experiments on frequency response and pulse width of the detector were completed, and the feasibility of applying the pyroelectric detector to energy measurement of high-repetition-frequency and narrow pulse laser was verified. The measuring range and other index marks of the detecting unit were given.

Key words laser technique; circuit of signal processing; pyroelectric detector; high-repetition-frequency; pulse laser signal

1 引言

在激光测量中,对重频脉冲激光参数的测量方法目前多采用光电探测的方法,这种方法存在占空比小、信号调理电路结构复杂、功耗大等问题,因此探索新的测量技术对高重频脉冲激光参数测量具有重要意义。热释电探测器具有探测率高、光谱响应范围宽、无波长选择性、可以有大面积均匀的光敏面等特点^[1],而且信号检测电路相对简单,功耗低。本文对热释电探测器及信号检测电路进行相关性能研究,对热释电材料进行了实验,对探测器结构进行了设计,并通过理论分析与实验验证,提出一种基于热释电探测器的高重频脉冲激光能量测量方法。

2 热释电探测器响应模型

热释电探测器是在垂直于晶体极轴(自发极化强度 p_s 方向)的两个面上涂敷电极,构成类似于平板电容

收稿日期: 2009-05-26; 收到修改稿日期: 2009-09-27

作者简介: 张磊(1982-),男,硕士,助理工程师,主要从事激光测量方面的研究。E-mail: thezl1982@yahoo.com.cn

器的热传感器,其工作原理是热释电效应。设晶体内部的扩散电荷起中和作用的平均时间为 τ ,当频率 $f > 1/\tau$ 时,变化的面束缚电荷不能立即被体内的扩散电荷和体外的自由电荷中和,在两极板上就会产生正比于入射辐射能量的交流信号电压^[2,3]。

探测器接收入射光辐射功率为 P 时,热释电探测器吸收热辐射后每秒接收的热量为 αP ,其中 α 为探测器的吸收率。此时探测器的温升 ΔT 由^[4]

$$\alpha P = H \frac{dT}{dt} + G \cdot \Delta T \quad (1)$$

决定。定义热时间常数为 $\tau_T = H/G$,其中 H 和 G 分别为探测器热容和热导。假设红外辐射下热释电探测器的温度分布是均匀的,以单脉冲的红外辐射来对热释电探测器进行建模,

$$P = \begin{cases} P_0, & 0 \leq t \leq \tau_0 \\ 0, & t > \tau_0 \end{cases} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可得

$$T(t) = \begin{cases} \frac{\alpha P_0}{G} [1 - \exp(-t/\tau_T)] + T_0, & 0 \leq t \leq \tau_0 \\ \frac{\alpha P_0}{G} \exp(-t/\tau_T) [\exp(\tau_0/\tau_T) - 1] + T_0, & t > \tau_0 \end{cases} \quad (3)$$

探测器及信号检测电路的输入阻抗为

$$Z = \frac{1}{1/R + j\omega C} = \frac{R}{1 + j\omega C R} \quad (4)$$

式中 R 为探测器及信号检测电路的电阻, C 为回路电容。定义 $\tau_e = RC$ 称为电时间常数。当探测器接收红外辐射时,其产生的极化电流为

$$i(t) = Ap \frac{dT(t)}{dt} \quad (5)$$

式中 A 为光敏元面积, p 为热释电系数,激光辐照探测器后所产生的电流 $i(t)$ 在阻抗 Z 上产生的电压 $V(t)$ 由

$$C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{1}{R} V(t) = i(t) \quad (6)$$

决定,可得

$$i(t) = \begin{cases} Ap \frac{\alpha}{H} P_0 \exp(-t/\tau_T), & 0 \leq t \leq \tau_0 \\ Ap \frac{\alpha}{H} P_0 \exp(-t/\tau_T) [1 - \exp(\tau_0/\tau_T)], & t > \tau_0 \end{cases} \quad (7)$$

将电流响应表达式代入电压响应方程,并解微分方程,得

$$V(t) = \begin{cases} Ap \frac{\alpha}{H} P_0 \frac{\tau_T R}{\tau_T - \tau_e} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right) \right], & 0 \leq t \leq \tau_0 \\ Ap \frac{\alpha}{H} P_0 \frac{\tau_T R}{\tau_T - \tau_e} \left\{ \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{\tau_0}{\tau_T}\right) \right] - \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{\tau_0}{\tau_e}\right) \right] \right\}. & t > \tau_0 \end{cases} \quad (8)$$

基于对热释电探测器的理论分析,对几种常见的热释电材料的温度、电压响应特性进行计算模拟,各材料的特性参数如表1所示^[5]。探测器光敏面面积取 1 mm^2 ,上表面入射辐射功率为 4.5 mW 。

表1 几种常见的热释电材料的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of some pyroelectric material

Materials	Measuring temperature / °C	Pyroelectric coefficient p / [$10^{-8} \text{ C}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$]	Volume specific heat C_v / [$\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$]	Coefficient of heat transfer h / [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$]
LiTaO ₃ crystal	25	2.3	3.5	0.035
PZT ceram	25	4.6	3.0	0.010
TGS crystal	25	3.9	2.5	0.007
LiNbO ₃ crystal	25	0.8	2.8	0.030

几种不同材料的温度响应和电压响应曲线分别如图1所示。通过比较可以看出,在光敏元面积、探测器

厚度以及入射光功率一致的情况下, LiTaO₃ 材料的热释电探测器的时间最短。在晶体类热释电探测器中, LiTaO₃ 具有优良的热释电特性, 适用于测量激光功率和激光脉冲波形。

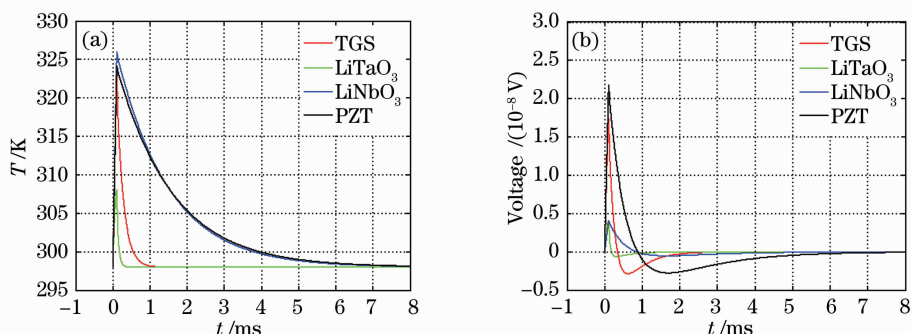


图 1 不同材料热释电探测器的响应情况。(a) 温度曲线, (b) 电压响应曲线

Fig. 1 Responses of pyroelectric detectors of different materials. (a) temperature curve, (b) voltage response curve

通过理论分析可知, 热释电探测器响应时间主要取决于热释电常数和电时间常数。通过 LiTaO₃ 晶体材料的热释电探测器来研究这两个时间常数对测量的影响。热时间常数 $\tau_H = H/G$ 由探测器的热容量和热导决定, 而热容量 $H = C_v AD$ 取决于材料的体积比热容 C_v , 探测器光敏面积 A 以及探测器的厚度 D 。将探测器的光敏面积选为 1 mm^2 , 对不同厚度探测器的仿真结果如图 2 所示。

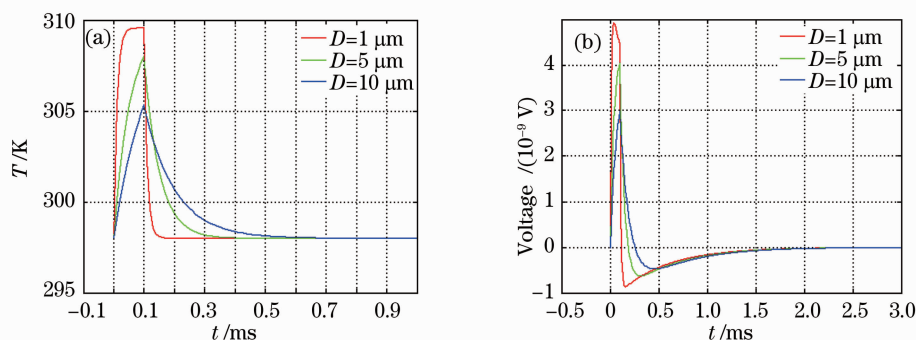


图 2 不同探测器厚度的响应曲线。(a) 温度曲线, (b) 电压响应曲线

Fig. 2 Response curves of detectors of different thickness. (a) temperature curve, (b) voltage response curve

可以看出, 随着探测器光敏元厚度减小, 探测器的热容量减小, 对同样的脉冲光辐照所引起的温升增大, 同时散热加快。然而, 探测器光敏元厚度较薄, 热容量较小, 与此同时探测器的饱和阈值也较低。对于电压响应, 在未达到探测器饱和阈值以前, 探测器光敏元厚度与电压响应率成反比。对电时间常数的计算仿真如图 3 所示, 电时间常数的减小可以缩短信号恢复至基线的时间, 同时增加响应率。

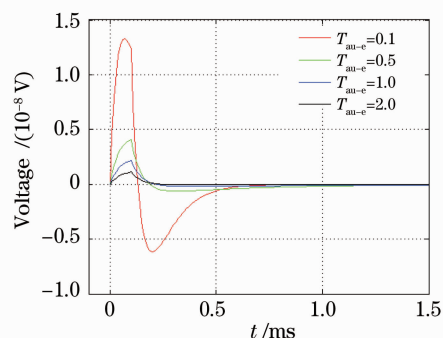


图 3 不同电时间常数的电压响应

Fig. 3 Voltage response of different electric time constant

3 信号检测电路

信号检测电路的设计主要考虑检测电路能够满足高重频脉冲信号的测量需要, 同时, 对于热释电探测器而言, 它是电容性器件, 而且制备热释电探测器的材料通常具有很高的阻抗, 因此电路设计还要兼顾到器件自身的电容和高阻抗等特点^[6]。本文针对高重频脉冲信号的特点设计了几种信号检测电路, 最终选择响应速度较快的电压放大电路和电流放大电路作为信号检测电路。电压放大是热释电探测器单元电路和阵列器件中常用的信号检测方式, 它具有电压响应率高、响应速度快, 电路结构简单、功耗小等特点。电路设计及性能

仿真如图 4 所示,仿真结果表明,电路的时间响应较快,可以满足高重频脉冲激光信号的测量要求。

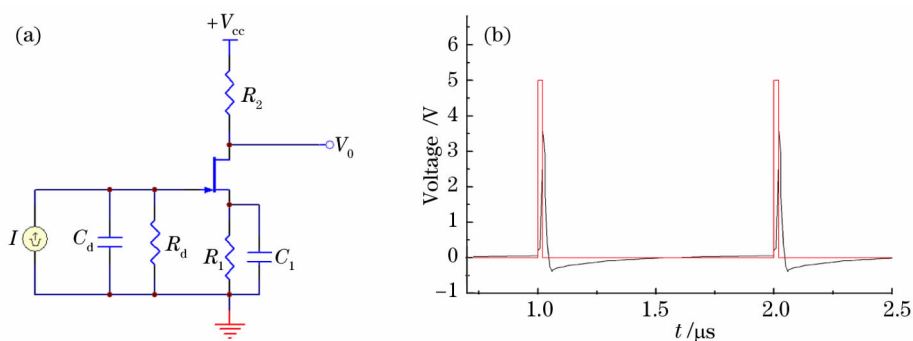


图 4 电压放大电路(a)及仿真结果(b)

Fig. 4 Voltage amplification circuit (a) and the simulation result (b)

设计电流放大电路如图 5 所示。将热释电探测器产生的电流信号直接转换为电压信号。电流放大器的优点是输入电阻非常低,理想情况下近似为零,可以满足电路快响应的要求,仿真结果也表明,电流放大电路的响应速度快于电压放大器,因此能够测量更高重复频率的脉冲激光。

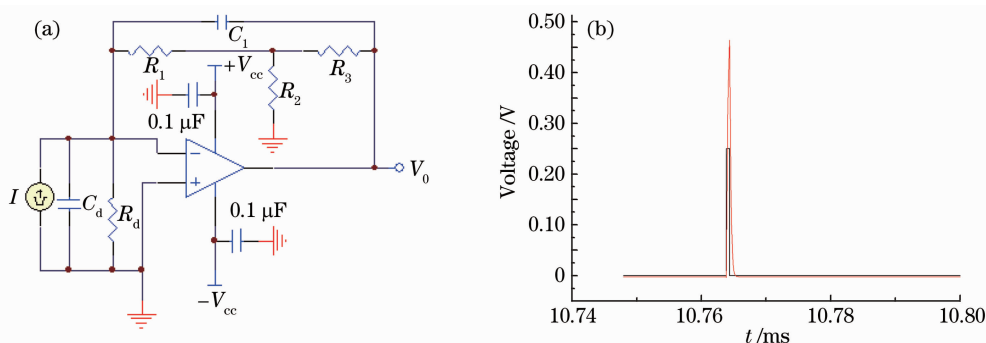


图 5 电流放大电路(a)及仿真结果(b)

Fig. 5 Current amplification circuit (a) and the simulation result (b)

4 实验验证

首先对探测器进行脉宽响应测量。不同脉冲宽度的重频激光辐照探测器,得到探测器输出电压与入射光脉宽的关系如图 6 所示。从关系曲线可以看出,当脉宽小于 $0.8 \mu\text{s}$ 时,输出电压随脉冲宽度基本成线性变化,探测器的输出电压正比于脉宽;当脉宽大于 $0.8 \mu\text{s}$ 时,输出电压和脉宽的关系开始出现非线性,探测器开始饱和;当脉宽大于 $1.5 \mu\text{s}$ 时,输出电压基本保持不变,探测器完全饱和,此时输出电压不能真实地反映入射辐射的能量值。

分别对采用电压放大电路和电流放大电路的热释电探测器进行重频响应和响应率的测量。实验结果如图 7,8 所示,输出信号波形正比于入射脉冲激光的能量值。实验结果表明,对于电压放大方式,可测脉冲信

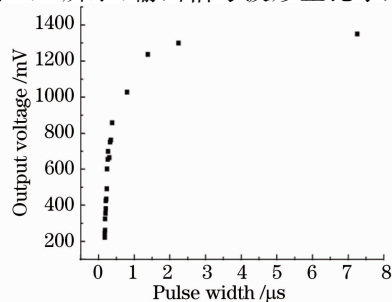


图 6 输出电压随脉宽变化关系

Fig. 6 Variance of the output voltage with the pulse width

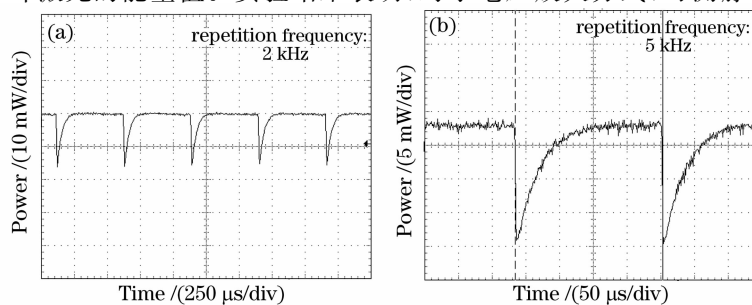


图 7 采用电压放大电路输出信号波形

Fig. 7 Output waveform of detector with voltage amplification circuit

号的重复频率可达 5 kHz。而采用电流放大电路可以大大提高探测器响应速度,可测脉冲信号的重复频率提高到 10 kHz。基于上述理论分析和实验验证,对探测器进行简单标定,测得响应率为 2.5 V/nJ。目前探测单元可以测量 10 kHz 以下重复频率的脉冲激光能量。实验测量的线性动态范围可达 110 倍,线性度为 0.99927,拟合曲线如图 9 所示。

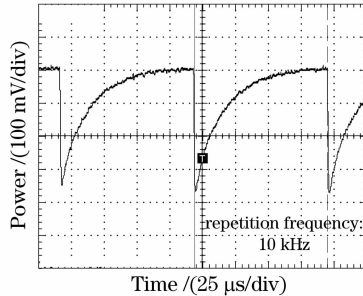


图 8 采用电流放大电路输出信号波形
Fig. 8 Output waveform of detector with current amplification circuit

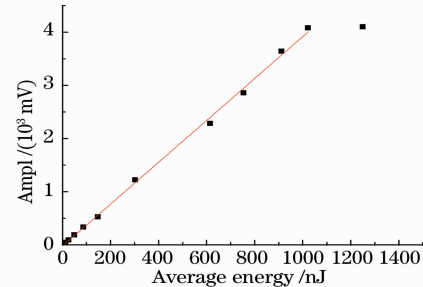


图 9 探测单元线性动态范围测量
Fig. 9 Measurement of linear dynamic range of detector unit

5 结 论

在对热释电探测器进行理论分析的基础上,通过对探测器的建模及仿真研究了探测器材料和结构参数等对温度、输出电压等响应特性的影响。结合信号检测电路的特性研究,设计了适合探测器测量高重频脉冲信号的电压放大电路和电流放大电路并进行实验测量,实验验证了基于热释电材料的高重频脉冲激光能量的可行性,为高重频脉冲激光参数测量提供了新的技术途径。

参 考 文 献

- Guo Qinglong, Feng Longling. Analyzing curve of the power of rep-rate pulse measured by the pyroelectric detector[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(suppl.): 48~52
郭庆龙, 冯龙龄. 热释电探测器测量重复率脉冲能量的曲线分析[J]. *光学技术*, 2005, **31**(增刊): 48~52
- Zheng Qinrong, Zeng Hua, Jin Zheng *et al.*. Development and analysis of optical voltage sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, **37**(4): 1~5
郑勤红, 曾 华, 金 争 等. 光学电压传感器的进展与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, **37**(4): 1~5
- Wang Zhanguo, Chen Liqun. All solid-state laser and type of new laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, **38**(9): 14~25
王占国, 陈立泉. 全固态激光器及各类新型激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2001, **38**(9): 14~25
- Wu Zongfan, Liu Meilin, Zhang Shaoju *et al.*. Infrared and Gleam Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 26~28
吴宗凡, 柳美琳, 张绍举 等. *红外与微光技术*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 26~28
- Xu Yuhuan. Ferroelectric and Piezoelectric Materials[M]. Beijing: Science Press, 1978. 51~52
许煜寰. *铁电与压电材料*[M]. 北京: 科学出版社. 1978. 51~52
- Gao Yuehua, Zhang Yigong, Huang Minshuang *et al.*. Realization of fast response circuit for pyroelectric detector[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2003, **25**(4): 334~335
高月华, 张亦工, 黄民双 等. 热释电探测器快速响应的电路实现[J]. *压电与声光*, 2003, **25**(4): 334~335