

# MEMS 红外探测器响应时间测量方法研究

张琛琛<sup>1,2</sup>, 毛海央<sup>2,3\*</sup>, 白乐乐<sup>4</sup>, 熊继军<sup>1\*</sup>, 王玮冰<sup>2</sup>, 陈大鹏<sup>2,3</sup>

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 动态测试技术山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中科院学院微电子研究所 智能感知研发中心, 北京 100029;

3. 江苏创芯海微科技有限公司, 江苏 无锡 214001;

4. 山西大学 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要:**传统地, MEMS 红外探测器响应时间的测量需要基于黑体辐射源、斩波器、水冷装置等设备搭建一套复杂的测量系统, 然而斩波器的遮挡区域和透光区域具有一定的面积, 其按某频率工作时消耗一定的时间, 而测试所得的器件响应时间无法排除斩波器的工作耗时, 导致测试结果存在较大误差, 所测响应时间为 14.46ms。为解决这一问题, 提出了一种以钛宝石激光器为辐射光源, 利用声光调制器构建纳秒级激光脉冲, MEMS 红外探测器响应激光脉冲的作用输出脉冲电信号, 很好地规避了测量系统中设备工作耗时引入的时间参数, 所测响应时间仅为 3.13ms。由此可见, 传统方法中斩波器工作耗时引入的时间误差甚至超过器件响应时间的 300%, 充分证明了此方法可以有效解决这一问题, 进而为 MEMS 红外探测器以及其它光学探测器性能参数的测试与计量提供了一种新的方法。

**关键词:** 激光脉冲; MEMS 红外探测器; 响应时间; 斩波器

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A

## A response time measurement method for MEMS IR detectors

ZHANG Chen-Chen<sup>1,2</sup>, MAO Hai-Yang<sup>2,3\*</sup>, BAI Le-Le<sup>4</sup>, XIONG Ji-Jun<sup>1\*</sup>, WANG Wei-Bing<sup>2</sup>, CHEN Da-Peng<sup>2,3</sup>

(1. North University of China, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, Shanxi Provincial Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, Taiyuan 030051, China;

2. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Advanced Sensing Department, Wuxi Internet of Things Innovation Center Co. Ltd., Wuxi 214001, China;

4. State key laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** As is known, response time of a MEMS infrared (IR) detector is usually measured using a complicated measurement system consisting of a blackbody radiation source, a chopper and a water-cooling apparatus. For such a system, both blocking and hollow patterns in the chopper have certain areas, which consume a certain part of time when the chopper spins at a certain frequency. In conventional measurements of response time, however, it is difficult to exclude the time consumed by a chopper, as a result, a large error is usually introduced into the system. To address such an issue, a response time measurement system for MEMS IR detectors using a fast-pulse laser as its radiation source is proposed in this work. Such a system is able to avoid extra time parameter being introduced by equipment. For a thermopile IR detector, response time measured based on traditional method is 14.46ms, while based on the newly established system, the response time is only 3.13ms. This indi-

收稿日期: 2020-04-08, 修回日期: 2020-07-20

Received date: 2020-04-08, Revised date: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61771467, 51425505, 51935011), 中国科学院青年创新促进会(2018153), 山西省“1331工程”重点学科建设基金, 广东省重点领域研发计划项目(2019B010117001)

**Foundation items:** Supported by National Natural Science Foundation of China (61771467, 51425505 and 51935011), Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (2018153), and Fund for Shanxi “1331 Project” Key Subject Construction, High Technology Research and Development Project of Guangdong (2019B010117001)

作者简介(Biography): 张琛琛(1996—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要研究领域为 MEMS 热电堆红外探测器. E-mail: Zhangchenchen@ime.ac.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: maohaiyang@ime.ac.cn

cates that the new method can perfectly avoid a 300% time error introduced by the traditional method.

**Key words:** laser, MEMS IR detectors, response time, chopper

**PACS: :** 85.80.Fi

## 引言

红外探测器是一种可以将红外辐射转变成电信号的传感器<sup>[1]</sup>。近年来,随着半导体、精密仪器、微机械加工技术的快速发展,红外探测器的性能也在逐步提升中。当前,高性能红外探测器已经在跟踪、成像、制导、雷达、预警等军事领域得到广泛应用,并逐渐向医疗诊断、火灾预警、家居安防等民用领域扩张。

响应时间是反映红外探测器响应速度的一个重要指标参数<sup>[2]</sup>。对于需要快速探测红外辐射信息的特定应用场合,探测器的响应时间需要控制在几个毫秒量级。如若探测器响应时间过长,不仅会出现信号反馈滞后的问题,而且会因为光热失衡产生较大探测误差,继而导致探测结果失效。因此,提高红外探测器的响应速度,缩短响应时间,设计更加精准的响应时间测量系统具有重要意义。经过多年的研究,已有研究人员提出多种结构优化的方法以提高MEMS红外探测器的响应速度<sup>[3]</sup>,缩短响应时间。然而,截至目前,针对MEMS红外探测器响应时间的测量方法却没有得到很好的发展。传统地,MEMS红外探测器响应时间的测量需要基于黑体辐射源、斩波器、水冷装置等搭建一套复杂的测量系统,利用斩波器在黑体辐射源前方的转动,使辐射光强度形成周期性变化,进而使探测器的输出电压信号发生周期性变化,并由该输出信号获得响应时间这一参数。然而,斩波器的遮挡和透光区域均具有特定面积,斩波器按一定频率转动时,探测器响应最高遮挡位置到最高透光位置这一辐射光强度变化所需的时间,不仅包含探测器自身的光(热)响应时间,同时也包括斩波器转动消耗的时间,而其中斩波器消耗的时间无法从测试结果中排除掉,导致这一参数的测试结果存在较大误差。

为了提高红外探测器响应时间的测量准确性,解决斩波器消耗时间引入响应时间误差这一问题,本文基于脉冲激光提出了一种精确测量MEMS红外探测器响应时间的新型方法及其测量系统。该测量系统以钛宝石激光器为被测探测器的辐射光源<sup>[4-5]</sup>,利用声光调制器(AOM)结合布拉格衍射原理构建了出射时间达ns级的周期性脉冲激光,并利用

这一脉冲激光对MEMS热电堆红外探测器的响应时间进行了测量。实验结果表明,该测量系统可有效规避斩波器耗时对检测结果的影响,所得测试结果具有更高的准确性。同时,该探测器响应时间测量系统也有望进一步应用到其它光学探测器的性能标定中<sup>[6-9]</sup>。

## 1 测量系统设计与原理

### 1.1 红外探测器响应时间标定原理

当一定功率的电磁辐射突然照射到探测器上(或将一定功率的电磁辐射从探测器上去除)时,探测器的输出电压会由之前的某一稳态经过一段时间上升(或下降)后达到另一稳态。输出电压在两种稳态间变化(上升或下降)所需的时间就是探测器的响应时间。如图1所示,当辐射发生变化时,在吸收辐射和去除辐射的过程中,探测器结构内部发生特定的物理变化,通过光-热-电或光-电之间的能量转化,其电学信号输出如式(1)所示。

$$U_t = U_0(1 - \exp(-\frac{t}{\tau})) \quad , \quad (1)$$

其中, $\tau$ 是探测器的特征常数,称作响应时间。 $t=\tau$ 表示辐射变化时,探测器达到稳定状态值63%所需要的时间。通常,探测器以该数值标定响应时间,如式(2)所示。

$$U_t = U_0(1 - \exp(-\frac{t}{\tau})) = U_0 63\% \quad . \quad (2)$$

### 1.2 MEMS热电堆红外探测器

MEMS红外探测器是基于斩波器以及脉冲激光的响应时间测量系统的核心部分。实验中,选用本课题组自主研发的双端梁结构的MEMS热电堆红外探测器<sup>[10]</sup>,与传统的四端梁结构热电堆红外探测器相比,双端梁结构的热电堆红外探测器器件尺寸可进一步缩小同时保持相对较高的响应率和探测率,其响应率和探测率分别达1151.14 V/W、4.15×10<sup>8</sup> cm Hz<sup>1/2</sup>/W。特别地,其响应时间在传统斩波器测量系统下为14.46ms。图2展示了MEMS双端梁结构的热电堆红外探测器电镜图,裸芯片和封装后的器件图。

### 1.3 基于斩波器的MEMS红外探测器响应时间测

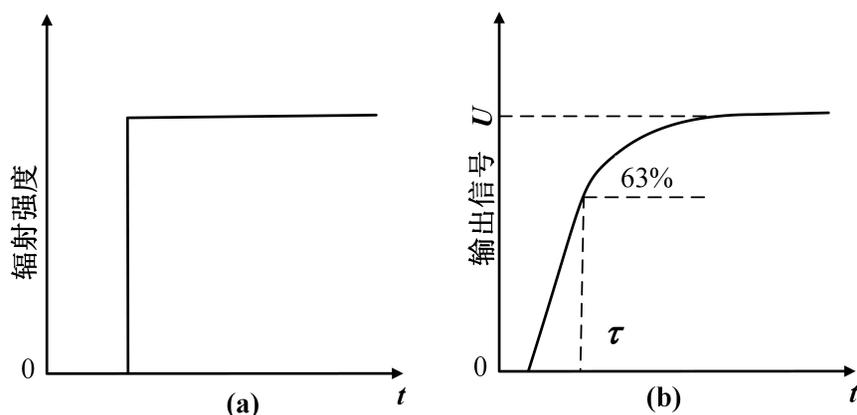


图1 红外探测器响应时间的标定原理示意图:(a)红外辐射强度随时间的变化曲线;(b)红外探测器输出信号随时间的变化  
Fig. 1 Schematic diagram of response time calibration principle for IR detectors, (a)The curve of radiation intensity with time;  
(b)The curve of output signal with time.



图2 MEMS热电堆红外探测器:(a)芯片电镜图;(b)裸芯片;(c)封装后器件  
Fig. 2 MEMS thermopile IR detector:(a) SEM image of chip; (b)Bare chip; (c)Packaged detector

## 量系统

传统地,铁电薄膜红外探测器、 $\text{VO}_2$ 氧化钒薄膜红外探测器、TFT非晶硅薄膜晶体管室温红外探测器、热释电红外探测器、热电堆红外探测器等MEMS红外探测器<sup>[11-13]</sup>的探测率、响应率、响应时间等需要依赖黑体、斩波器进行测试及标定工作。

如图3所示,基于斩波器的MEMS红外探测器响应时间测量系统由黑体辐射炉、斩波器、水冷装置、电测设备以及被测红外探测器共同构成<sup>[14]</sup>。其中,斩波器和水冷装置由各自的控制器调节参数,分别实现对斩波频率和探测器冷端温度的控制。探测器的响应时间输出信号通过电测设备得到。

该系统中,斩波器将红外辐射调制成交变信号,红外探测器吸收红外辐射而输出与斩波器同频率的交变电压信号,并通过半导体特性分析仪采集得到。本实验中测试时,红外探测器选用我组自主研发的MEMS热电堆红外探测器,黑体温度为227度,也即500K(通常500K作为MEMS热电堆红外探

测器工业标定的黑体温度),在此温度条件下,黑体辐射率归一化为1。环境温度为22.1度,环境湿度为36%RH。黑体距离探测器的距离为90mm,黑体辐射孔径为130mm。

## 1.4 基于脉冲激光的MEMS红外探测器响应时间测量系统

基于脉冲激光的MEMS红外探测器响应时间测量系统以单频可调谐连续钛宝石激光器(Model: SolsTis-3500-SRX-XF)为激光光源,以示波器(Tektronix TDS1012B-BC)、波长计(Advantest WAVELENGTH METER TQ8325)为辅助装置,构建器件响应时间的测量系统,其原理示意图如图4所示。

实验中,首先调制1级衍射光(脉冲激光)。调制过程中,1级衍射光部分先由绿光激光器(532nm)泵浦可调波长钛宝石激光器(600~1000nm),使钛宝石激光器输出波长为795nm,同时与经过3000倍功率放大后的射频信号共同作用,通过AOM后产生0级衍射光(由于0级光不受RF射频信号的控制,无

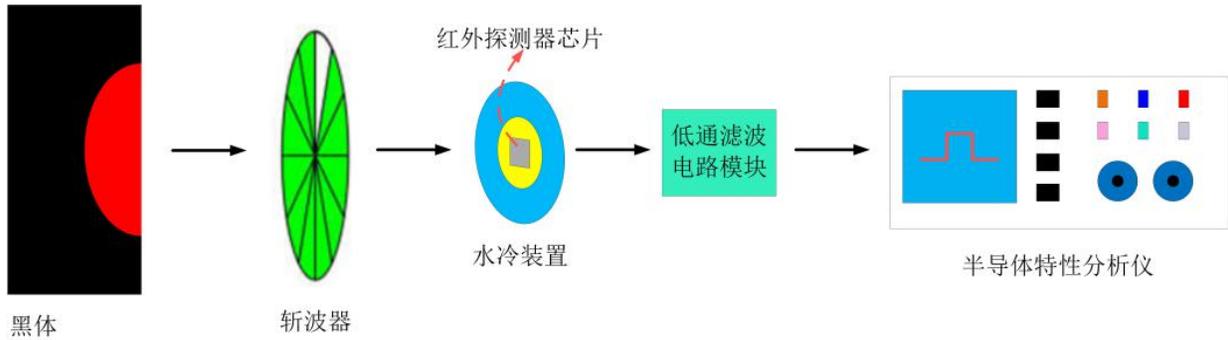


图3 基于斩波器的响应时间测试原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a response time measurement system using a chopper

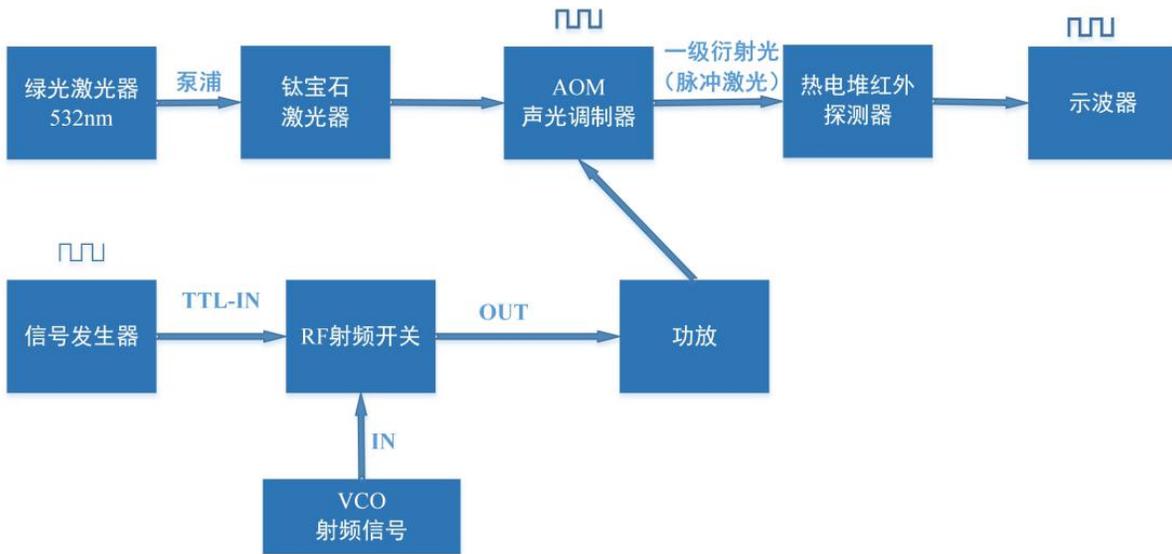


图4 基于脉冲激光的MEMS红外探测器响应时间测量系统

Fig. 4 A response time measurement system for MEMS infrared detectors using a pulsed laser

法调制为所需脉冲信号,实验中会对其进行遮挡,以免产生干扰)和1级衍射光。脉冲光部分先由信号发生器提供一个方波信号,再由射频开关进行开启与断开,由此经方波信号与射频开关的共同控制可产生脉冲激光。由于光电响应中存在惰性因素,响应时间不仅与入射光波长有关,还与入射光的调制频率相关,且存在函数关系

$$A(\omega) = \frac{1}{(1 + (\omega\tau)^2)^{1/2}}, \omega = 2\pi f \quad , \quad (3)$$

其中,  $A(\omega)$  表示归一化后的幅频特性;  $\omega$  为调制圆频率;  $f$  为调制频率;  $\tau$  为响应时间。

在实验过程中,响应信号以电压形式输出,由此可以得到响应时间和输出电压的关系

$$V(\omega) = \frac{V_0}{(1 + (\omega\tau)^2)^{1/2}}, \omega = 2\pi f \quad , \quad (4)$$

其中,  $V_0$  是入射光调制频率为0时的输出电压。为

了方便描述这种特征,通常引入截止频率  $f_c$ 。  $f_c$  表示当  $V(\omega)/V_0 = 1/\sqrt{2} = 0.707$  时的频率,即  $f_c = 1/2\pi\tau$  为信号的调制频率,通常  $f_c$  频率点又称三分点或拐点。

另外,可以通过幅度调节来减小光电响应时间,获得理想的脉冲信号。本系统使用AOM调制对控制激光光束的强度进行调节<sup>[15]</sup>。声光调制的物理基础是声光效应,是指光波在介质中传播时,被超声波场衍射或散射的现象。如图5所示,声光调制器由声光介质和压电换能器构成。声光介质因受机械应力波作用引起弹光效应而改变折射率,形成超声光栅。当光束入射到介质内时,会与声波发生相互作用而改变传输方向,产生衍射。衍射光的强度、频率和方向等,会随着超声场的变化而变化。本系统利用了布拉格衍射<sup>[16-17]</sup>,由于布拉格衍射1级衍射光(+1级或-1级)极大,因此衍射效率高,一

般可大于 85%。

为验证 MEMS 红外探测器响应时间测量方法的正确性,实验过程在超净间的精密光学平台上搭建实验平台,以输出为 795nm 钛宝石激光器作为辐射源,搭建系统并供电。在响应时间测试之前,本系统产生的脉冲激光信号首先通过商用光电探测器(New focus 2051)进行测试,并将其电压响应信号在示波器上显示,如图 6 所示。此时,信号发生器与射频开关两者相结合实现对射频信号与 AOM 产生的一级衍射光的控制,经测试分析,系统脉冲激光信号的响应误差在纳秒级。

响应时间测试过程中,使激光器输出 2.5Hz 脉

冲激光信号;同时调整 MEMS 红外探测器的吸收区与调制的一级衍射光(脉冲激光)垂直对准,使激光光束完全照射在红外探测器的吸收区上。为了使 MEMS 红外探测器在不同强度辐射条件下保持稳定的性能,测试中在 AOM 前加入了半波片和偏振分光器(PBS),用于将激光分为两束。同时,旋转半波片可以精准地控制激光的分配。测试过程中,分别调节脉冲信号的功率从 100mW 增大到 600mW(变化步长为 50mW),并同步进行测试、记录数据。通过示波器输出红外探测器的电压信号,得到电压强度值和响应时间的值。

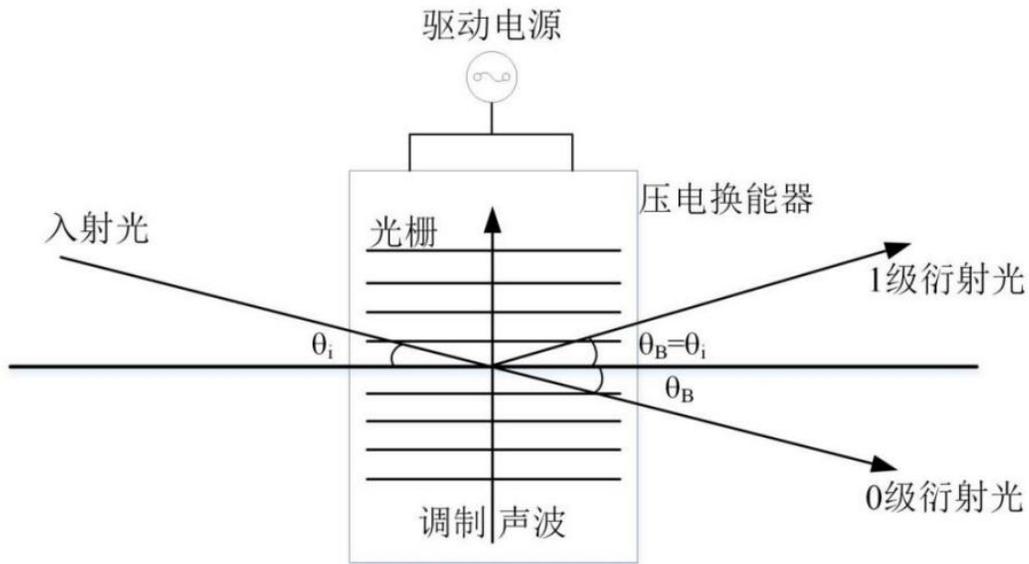


图 5 声光调制器(AOM)结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of a AOM

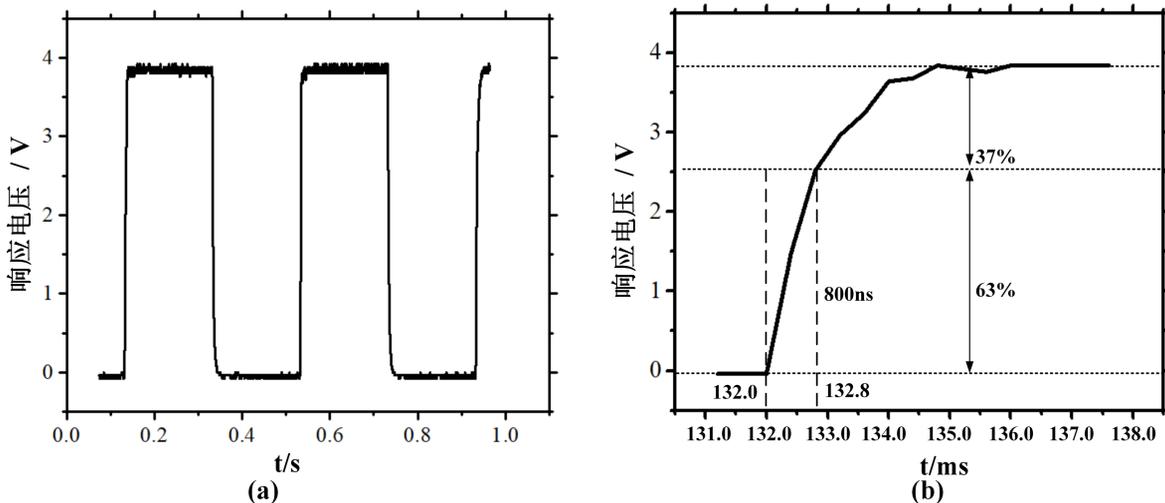


图 6 系统脉冲激光信号

Fig. 6 Pulsed signal of laser in the measurement system with a time parameter of 800ns

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 基于斩波器的响应时间测试结果及误差分析

如图7所示,结合式(1)并通过数值分析软件分析可知,由斩波器测试系统可得到MEMS红外探测器的响应时间。这种测试方法中,误差的主要来源为斩波器叶片遮挡-镂空比例不易调节、叶片转动的频率可调性差以及采样点时间间隔较大。图7(a)为热电堆红外探测器三个周期的响应电压波形曲线,测试结果显示探测器在黑体辐射500K、斩波频率4Hz条件下的响应输出电压为7.47mV;图7(b)为(a)中波形曲线某一上升沿横坐标放大后的波形曲线,结果显示探测器的响应时间为14.46ms。

### 2.2 基于脉冲激光的响应时间测试结果与数据分析

如图8所示,结合式(1)并通过数值分析软件分

析可知,由激光脉冲测试系统可得到MEMS红外探测器的响应时间。图8(a)为热电堆红外探测器2个周期的响应电压波形曲线,测试结果显示探测器在激光功率450mW、激光脉冲频率为2.5Hz条件下的响应输出电压为5.76V;图8(b)为(a)中波形曲线某一上升沿横坐标放大后的波形曲线,结果显示探测器的响应时间为3.10ms。随后,利用所搭建的测量装置对输出脉冲激光功率从100mW增大到600mW(变化步长为50mW),频率为2.5Hz的光辐射进行实验。结合式(1)和MEMS热电堆红外探测器的输出电压值,通过数值分析软件分析计算不同功率条件下的MEMS红外探测器响应时间,得到数据如表1所示。由表1求MEMS红外探测器的平均响应时间为3.13ms。由此可见,传统方法中斩波器工作耗时引入的时间误差甚至超过器件真实响应时间的300%。

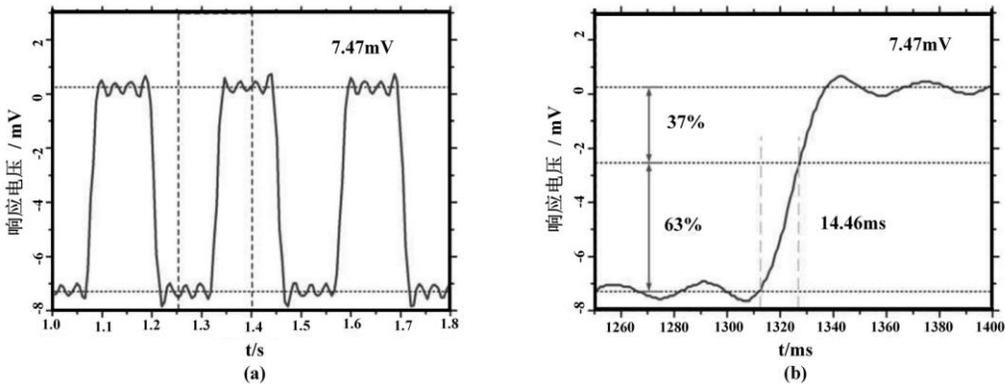


图7 基于斩波器测得的MEMS热电堆红外探测器响应时间  
Fig. 7 Response time of a MEMS thermopile IR detector measured using a chopper

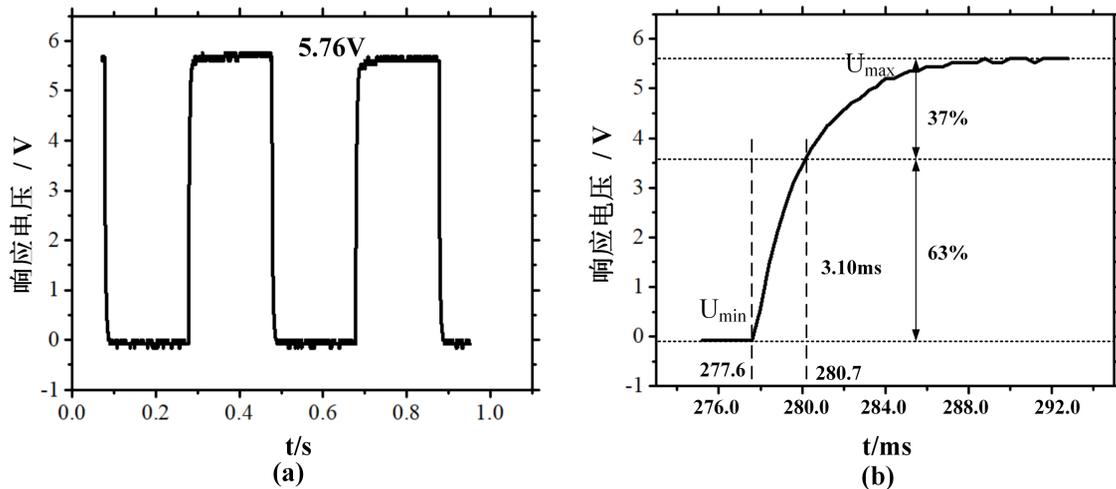


图8 基于脉冲激光测得的MEMS热电堆红外探测器响应时间  
Fig. 8 Response time of a MEMS thermopile IR detector measured using a laser

表 1 实验数据表

Table 1 Response time data table

output power	Starting time	Stationary time	2/3	Response time
mW	ms	ms	ms	ms
100	306.5	314.6	309.5	3.0
150	314.3	324.5	317.1	2.8
200	115.9	126.4	118.3	2.4
250	220.6	233.2	223.8	3.2
300	99.7	109.3	102.6	2.9
350	128.2	140.6	131.1	2.9
400	414.1	428.6	418.0	3.9
450	578.9	592.4	582.1	3.2
500	509.6	522.9	513.0	3.4
550	625.3	636.1	628.8	3.5
600	425.5	436.9	428.7	3.2
Average value				3.13

### 3 结论

由于在预警、跟踪、防灾等领域对 MEMS 红外探测器响应时间的高标准、高准确度要求,设计了以脉冲激光为红外辐射源的响应时间测试方法及系统,其声光调控激光脉冲信号的自身的时间常数在 ns 级,进而实现了对 MEMS 红外探测器响应时间的准确测试,克服了传统斩波器测试中斩波器叶片遮挡-镂空比例不易调节、叶片转动的频率调节度低难与探测器匹配以及采样点时间间隔较大的问题。实验数据表明,用传统方法测得响应时间为 14.46ms 的 MEMS 热电堆红外探测器,其真实的响应时间仅为 3.13ms,可见该器件具有响应速度快、反应灵敏的特点,能够满足特定应用场合对器件响应时间的更高要求。

### References

- [1] Xu D, Wang Y, Xiong B, *et al.*, MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review[J], *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, **12**(4): 557-566.
- [2] Shen T W, Lee Y C, Chang K C, *et al.*, Responsivity enhancement of CMOS-MEMS thermoelectric infrared sensor by heat transduction absorber design[C], 2018 31th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2018, 29-32.
- [3] Suman S, Gaitan M, Joshi Y, *et al.*, Wire-bonding process monitoring using thermopile temperature sensor[J], *IEEE transactions on advanced packaging*, 2005, **28**(4): 685-693.
- [4] Kaiser A, Rethfeld B, Vicanek M, *et al.*, Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses[J], *Physical Review B*, 2000, **61**(17): 11437.
- [5] Arregui F J, Cooper K L, Liu Y, *et al.*, Optical fiber humidity sensor with a fast response time using the ionic self-assembly method [J], *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, **83**(3): 360-365.
- [6] Mao H, Chen Y, Ou Y, *et al.*, Fabrication of nanopillar forests with high infrared absorptance based on rough poly-Si and spacer technology [J], *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, **23**(9): 095033.
- [7] Li R, Mao H, Yang Y, *et al.*, Candle soot with broadband high absorptance for applications of infrared sensors [C], 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). IEEE 2017, 882-885.
- [8] Tan Q, Tang L, Mao H, *et al.*, Nanoforest of black silicon fabricated by AIC and RIE method[J], *Materials Letters*, 2016, **164**: 613-617.
- [9] Lv P, Zhang X, Zhang X, *et al.*, High-sensitivity and fast-response graphene/crystalline silicon Schottky junction-based near-IR photodetectors [J], *IEEE Electron Device Letters*, 2013, **34**(10): 1337-1339.
- [10] Mao H Y, Lei C, Chen Y J, *et al.*, Nanofiber forests with high infrared absorptance [C], 2014 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2014, 644-647.
- [11] Chen Y S. Experimental Study on Infrared Photoresponse of Ferroelectric Thin Film Detector PbZrTiO<sub>3</sub>[J], *Institute of Physics, Academia Sinica*, (陈岩松. 铁电薄膜探测器 PbZrTiO<sub>3</sub> 的红外光电响应实验研究, *物理学报*), 1998 (8): 149-153.
- [12] Sakata M, Hamada Y, Takeuchi K, *et al.*, Characteristics of a liquid crystal IR chopper for pyroelectric IR sensors[J]. *Sensors & Actuators A*, 1994, **40**(3): 195-201.
- [13] Dong L. Study on MEMS Integrated Room-temperature Infrared Deectors[D], Tsinghua University, (董良. MEMS 集成室温红外探测器研究, 清华大学), 2004.
- [14] Lei C. Reseaerch on the Key Technologies of Double-end-beam based MEMS Thermopile IR Detector [D], North University of China, (雷程. 双端梁 MEMS 热电堆红外探测器关键技术研究, 中北大学), 2016.
- [15] Mesleh R. Acousto-optical modulators for free space optical wireless communication systems [J], *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, **10** (5) : 515-522.
- [16] Giese E, Friedrich A, Abend S, *et al.*, Light shifts in atomic Bragg diffraction[J], *Physical Review A*, 2016, **94** (6): 063619.
- [17] Itano W M, Bollinger J J, Tan J N, *et al.*, Bragg diffraction from crystallized ion plasmas[J], *Science*, 1998, **279** (5351): 686-689.