

# 基于双材料微悬臂梁阵列的太赫兹波探测系统的研究

苏 波<sup>1,2</sup> 段国腾<sup>1,2,3</sup> 张存林<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 太赫兹波谱与成像北京市重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)  
<sup>2</sup> 首都师范大学物理系, 北京 100048; <sup>3</sup> 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 采用氮化铌和铝作为制备微悬臂梁的双材料, 其中氮化铌用来吸收太赫兹波辐射, 铝作为形变材料。利用氮化铌和铝的热膨胀系数相差较大的特性以及在吸热后产生形变的特点, 与双材料微悬臂梁阵列探测红外波技术相结合, 实现对太赫兹波的探测。采用微细加工技术制作出无基底的双材料微悬臂梁阵列结构。为了防止微悬臂梁的热散失, 将微悬臂梁阵列放置在一个具有防振功能的真空腔中, 利用机械泵和分子泵保持其高真空以提高探测系统的信噪比。采用反射式可见光光学读出方式间接获取太赫兹波的信息, 并利用双图像做差的方法进行图像处理, 提高了系统的分辨率。

**关键词** 太赫兹波技术; 微悬臂梁阵列; 探测; 真空腔; 光学读出

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s111002

## Research of Terahertz Wave Detection System Based on Bi-Material Micro-Cantilever Arrays

Su Bo<sup>1,2</sup> Duan Guoteng<sup>1,2,3</sup> Zhang Cunlin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China  
<sup>2</sup> Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China  
<sup>3</sup> Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** A new detection system for detecting terahertz (THz) wave radiation is described. The niobium nitride and aluminium are used to fabricate the bi-material micro-cantilever arrays. The role of the niobium nitride is to absorb THz wave radiation, and the aluminium is the deformation material. The bi-material of niobium nitride and aluminium has the characters of a large difference in thermal expansion coefficient and deformation after absorbing heat, so it can combine the technology of bi-material micro-cantilever arrays detecting infrared and realize the detection of THz wave. The micro-electromechanical system (MEMS) technology is adopted to fabricate the substrate-free bi-material micro-cantilever arrays. In order to prevent the heat diffusion, the micro-cantilever is placed in a vacuum chamber which has the function of vibration prevention, and the mechanical pump and molecular pump are used to keep the high vacuum for improving the signal-to-noise ratio of the detection system. The reflection-type visible light optical readout way is used to acquire the THz wave information indirectly. Furthermore, the method of difference processing is used to process image for improving resolution of the system.

**Key words** terahertz-wave technology; micro-cantilever arrays; detection; vacuum chamber; optical readout

**OCIS codes** 220.4830; 160.1890; 120.6810; 100.2000

## 1 引 言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz(波长为 30~3000  $\mu\text{m}$ )范围内的电磁波(1 THz=10<sup>12</sup> Hz)。它在长波段与毫米波相重合,而在短波段与红外线

相重合。由于生物大分子的振动和转动频率均在太赫兹波段,所以它包含了丰富的科学信息,具有许多独特的性质。在检测技术方面具有发掘的潜力,在材料特性、微电子、医学诊断、环境监控、化工和生物

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-15

基金项目: 北京市教委项目(11530452701)资助课题。

作者简介: 苏 波(1975—),男,博士,副教授,主要从事太赫兹波成像方面的研究。E-mail: su-b@163.com

识别等诸多方面具有广泛的应用价值<sup>[1,2]</sup>。

太赫兹波探测是太赫兹波应用领域的一个重要方面,以连续波信号探测为主,最常用的是热效应探测器,是基于热吸收的宽波段直接探测,但是它需要冷却装置来降低热背景噪声,探测成本较高。目前,对太赫兹连续波探测的最好方法是阵列式探测,由光学元件将透过物体(或由物体表面反射)的太赫兹波直接成像到一个二维的探测器阵列上,并通过该探测器阵列实现对太赫兹波的成像探测<sup>[3,4]</sup>。探测器最常用的读出方式有电学式和光学式,采用电学读出方式的探测器对外界电磁噪声比较敏感,工作环境有限(比如不能在高温和高辐射的环境下工作),而光学读出方式摆脱了以上的局限。

微悬臂梁是一种在微电子机械系统(MEMS)中常用的结构,其多用于微小力检测、加速度检测、生物化学检测及数据存储等方面<sup>[5~7]</sup>。目前,双材料微悬臂梁已经应用在对红外波的探测和成像方面<sup>[8,9]</sup>,由于其非制冷的特性使其制造成本大幅降低<sup>[10]</sup>,因此逐渐在越来越多的领域实现了产品化。

本文将双材料微悬臂梁技术应用在对太赫兹波的探测方面,通过优化悬臂梁的结构,采用对太赫兹波有更强吸收的材料以及增加隔热装置等方法来实现对太赫兹波的探测。

## 2 双材料微悬臂梁阵列的探测原理

微悬臂梁阵列是整个探测系统的核心,阵列上的每个悬臂梁单元由两种热膨胀系数差别很大的材料制备而成,其中一种材料能够反射可见光,另一种材料可以吸收太赫兹波辐射。当太赫兹波辐射到微悬臂梁阵列上后(微悬臂梁阵列通常放在真空腔中,以防止热散失),入射的太赫兹波能量将使微悬臂梁的温度升高,从而引起微悬臂梁的形变,导致微悬臂梁偏转角发生变化。温度不同,每个微悬臂梁的偏

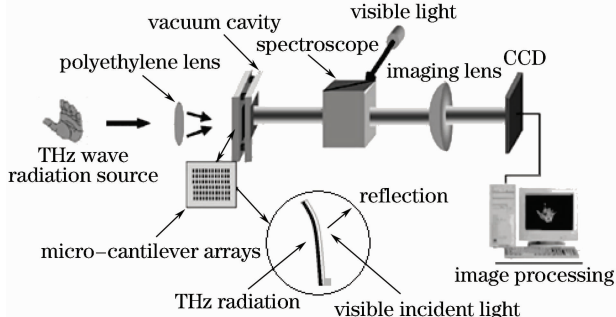


图1 太赫兹波探测系统示意图

Fig. 1 Sketch map of THz wave detection system

转角变化也不同,然后通过面阵 CCD 检测微悬臂梁对可见反射光的变化解读出微悬臂梁转角的变化及分布,以光强图像的方式将被测物体的温度场显示出来。该检测方法不需要制冷装置和光电转换电路,使得整个系统体积小,重量轻,功耗低。太赫兹波探测系统示意图如图 1 所示。

## 3 微悬臂梁阵列的设计

微悬臂梁阵列的设计要求主要有:对于每一个微悬臂梁阵列单元,当太赫兹波辐射能量一定时,微悬臂梁单元要产生最大的温升;相同温升时微悬臂梁单元的形变量要达到最大;微悬臂梁的热响应时间要和图像的采集帧频一致。为此,需要考虑双材料的选择以及微悬臂梁的最佳制作工艺。

### 3.1 微悬臂梁阵列材料的选择

制备微悬臂梁的双材料应满足如下要求<sup>[11]</sup>:

- 1) 一种材料必须对太赫兹波辐射有较强吸收,而另一种材料必须对可见光有很好的反射率,以适用于光学读出;
- 2) 两种材料的热膨胀系数必须相差很大;
- 3) 两种材料的 MEMS 加工工艺兼容;
- 4) 两种材料具有好的化学稳定性;
- 5) 两种材料薄膜的本征应力必须很小,以防止悬臂梁自弯曲;
- 6) 至少有一种材料具有好的热绝缘性,防止热流失。

### 3.2 微悬臂梁阵列的制作

微悬臂梁阵列采用了无基底的结构,这主要是因为其具有以下特点:

- 1) 太赫兹波和可见光可以分别从两边直接入射到氮化铌层和铝层,减小了能量的损失;
- 2) 采用光学读出方式,不产生读出电流的附加热量,不需要复杂布线和金属连接,有良好的热隔离;
- 3) 无基底微悬臂梁阵列结构的制备过程,不需要牺牲层工艺,降低了微悬臂梁阵列的制作难度,避免了 MEMS 结构中出现的粘连现象;
- 4) 由于微悬臂梁没有基底,从而消除了传统制作的微悬臂梁与基底间的  $2\ \mu\text{m}$  左右的空气间隙,避免了由间隙导致的高温梯度的热传导,使空气的热传导减少为原来的  $1/10$ 。

设计的微悬臂梁阵列是基于 MEMS 技术制作的,主要包括四个工作步骤:在硅基上生长氮化铌膜,刻蚀氮化铌图形,溅射铝层和去除部分硅基。其中氮化铌的制备采用磁控溅射的方法进行,在制备

的过程中用氩气和氮气作为保护气,但是氩气和氮气的流量比对氮化铌表面的粗糙程度有直接的影响。通过研究发现,当氩气和氮气的流量比为 15:1 时,氮化铌表面效果最好。

制备的微悬臂梁阵列具有  $100 \times 68$  个单元,整个微悬臂梁阵列的尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,每个微悬臂梁单元的尺寸为  $150 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,其中回折梁部分的尺寸为  $90 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,反射面的尺寸为  $100 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ ,悬臂梁的梁宽度为  $5 \mu\text{m}$ ,微悬臂梁的结构示意图如图 2 所示。微悬臂梁阵列的实物图如图 3 所示。

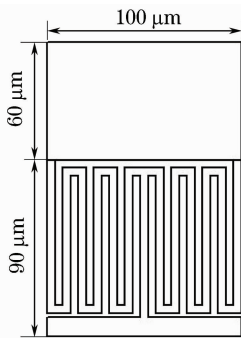


图 2 微悬臂梁结构

Fig. 2 Structure of micro-cantilever

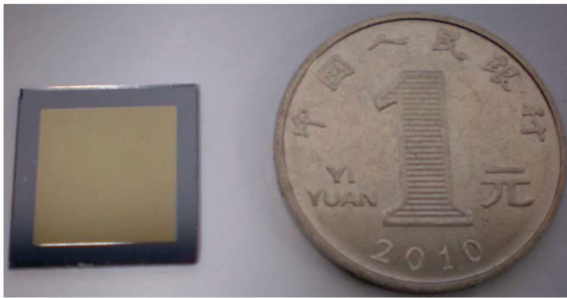


图 3 微悬臂梁阵列

Fig. 3 Micro-cantilever arrays

## 4 真空腔的设计

空气具有传热作用,如果把制备好的微悬臂梁阵列放在空气中直接对太赫兹波进行探测,微悬臂梁吸收太赫兹辐射后的热量将很快通过空气散失掉,不容易引起悬臂梁弯曲<sup>[12]</sup>。为了防止热量的散失,真空环境是必不可少的,所以设计了如图 4 所示的真空腔,图 4(a)为太赫兹波透射窗口,白色部分为聚乙烯薄板,厚度为  $0.8 \text{ cm}$ ,太赫兹波几乎能够无损耗地穿过,而红外波却很难穿透。另外,较厚的聚乙烯薄板能够保证在抽真空过程中不会变形。图 4(b)为可见光透射及反射窗口,用锗玻璃进行密

封,透过锗玻璃能够看见两个黑色的金属部件,用来固定微悬臂梁阵列,金属部件中间有弹簧,具有防振和缓冲作用。从图 4(a)和图 4(b)都能看见在真空腔的两侧各有一个接口,使用时,一个接口与传感器相接用来检测真空腔中的压强,另一个接口与分子泵相连,分子泵再与机械泵相连。将两种不同类型的泵串联起来使用以保证真空腔的高真空度。另外,微悬臂梁阵列在从抽真空后的真空腔中取出来时要缓慢放气,不然,强大的压力差很容易使微悬臂梁阵列破碎,所以,将微悬臂梁阵列单独封装非常重要。目前,将微悬臂梁阵列进行真空封装的研究正在进行中。

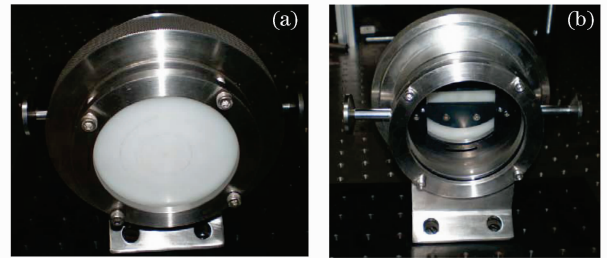


图 4 (a) 太赫兹波透射窗口;(b) 可见光透射及反射窗口

Fig. 4 (a) Transmission window of THz wave;

(b) transmission and reflection window of visible light

将悬臂梁阵列放置在密封腔中,并进行抽真空处理。这样做的优点是:1) 防止了微悬臂梁上的热散失;2) 避免了环境中温度、湿度等因素的影响。

## 5 光学读出系统的设计

### 5.1 恒定功率稳定电路的设计

可见光输出功率的稳定性对整个系统的探测性能有着重要的影响,本系统的可见光源为功率为  $0.3 \text{ W}$  的发光二极管(LED),为了稳定 LED 光源的光功率,专门设计了恒定功率稳定电路,一方面使电源具有更小的纹波,另一方面也减小了输出光功率的漂移。这种电路比市场上的恒流源供电的 LED 更加稳定。

### 5.2 图像处理

采用面阵 CCD 对发生形变后的微悬臂梁阵列的反射光进行探测以获取数字图像,为了提高探测灵敏度,采用了双图像做差的方法进行数字图像处理,即在无太赫兹波辐射时,获取一幅图像作为背景图像并进行存储,当有太赫兹波辐射时,再获取一幅图像,然后将两幅图像做差处理,实现对太赫兹波的探测。

## 6 实 验

将微悬臂梁阵列固定在真空腔中,并对真空腔进行抽真空处理,然后利用实验室功率为 5 mW,频率为 973 GHz 的太赫兹源在探测系统上进行实验,探测系统如图 5 所示。CCD 输出的数据经过处理后能够推断出微悬臂梁发生了形变,但是变化量非常小,将 CCD 输出的数据直接显示在显示屏上还不能观察到光强的变化。

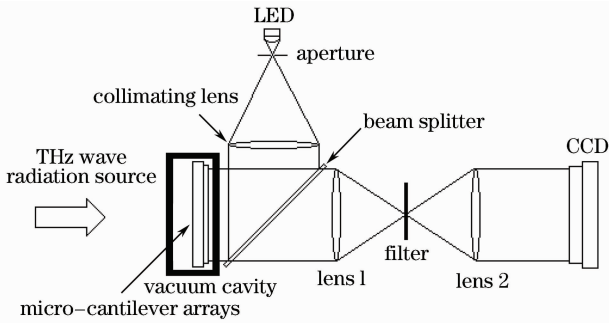


图 5 太赫兹波探测系统

Fig. 5 Detection system of THz wave

为此,将在以下几个方面进行改进:1) 继续优化悬臂梁的结构;2) 利用频率更高的太赫兹源进行实验;3) 改进探测系统的结构并优化图像处理软件;4) 进一步稳定 LED 的输出功率或者采用激光光源。

## 7 结 论

利用氮化铌和铝作为制备微悬臂梁的双材料,采用了回折式结构,增加了微悬臂梁的形变量;微悬臂梁设计为无基底结构,提高了微悬臂梁吸收层对太赫兹波的吸收。研制了具有防振功能的真空腔,利用机械泵和分子泵保持其高真空度。采用光学读出方式来获取太赫兹波的信息,为保持可见光功率的稳定性,设计了恒定功率稳定电路,并利用双图像做差的方法进行图像处理以提高系统的分辨率。利用功率为 5 mW,频率为 973 GHz 的太赫兹源进行实验,数据处理结果表明微悬臂梁已产生了形变。

## 参 考 文 献

- 1 G. Gunter, A. A. Anappara, J. Hees *et al.*. Sub-cycle switch-on of ultrastrong light matter interaction [J]. *Nature*, 2009, **458**(1038): 178~181
- 2 M. Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 97~105
- 3 S. R. Manalis, S. C. Minne, C. F. Quate *et al.*. Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70** (24): 3311~3313
- 4 Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi *et al.*. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0111001  
姚睿,丁胜晖,李琦等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0111001
- 5 Wang Weibing, Ye Tianchun, Chen Dapeng *et al.*. An uncooled infrared imaging system based on bi-material cantilever pixels [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, **7**: 404~406  
王玮冰,叶甜春,陈大鹏等. 基于双材料微悬臂梁结构的非制冷红外成像系统 [J]. *微纳电子技术*, 2003, **7**: 404~406
- 6 L. R. Senasac, J. L. Corbeil, S. Rajic *et al.*. IR imaging using uncooled microcantilever detectors [J]. *Ultramicroscopy*, 2003, **97**(1-4): 451~458
- 7 Biao Li. Design and simulation of an uncooled double-cantilever microbolometer with the potential for ~mK NETD [J]. *Sensor and Actuator*, 2004, **A112**(2-3): 351~359
- 8 Zhao Yang, Mingyao Mao, H. R. Majumdar *et al.*. Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance [J]. *J. MEMS*, 2002, **11**(2): 136~146
- 9 Fengliang Dong, Qingchuan Zhang, Dapeng Chen *et al.*. Uncooled infrared imaging device based on optimized optomechanical micro-cantilever array [J]. *Ultramicroscopy*, 2008, **108**(6): 579~588
- 10 Chaobo Li, Shali Shi, Binbin Jiao *et al.*. A novel uncooled substrate-free optical-readable infrared detector: design, fabrication and performance [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(6): 1981~1986
- 11 Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, Wu Xiaoping *et al.*. Bimaterial micro-cantilever uncooled infrared imaging system—design and fabrication of micro-cantilever array [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, **24**(6): 409~413  
董凤良,张青川,伍小平等. 双材料微阵列非制冷红外成像系统—微梁阵列的设计与制作 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(6): 409~413
- 12 Gao Jie, Zhang Qingchuan, Chen Dapeng *et al.*. Effect of reflector deformation on optical detection sensitivity for optical readout infrared imaging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2009, **28**(4): 249~253  
高杰,张青川,陈大鹏等. 光学独处红外成像中反射光板变形对光学检测灵敏度的影响 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(4): 249~253

栏目编辑: 李文洁