

# 一种基于双材料悬臂梁的太赫兹焦平面阵列

段国腾<sup>1,2</sup> 苏波<sup>2</sup> 张存林<sup>2</sup> 赵伟瑞<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081; <sup>2</sup>太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 提出了一种实时太赫兹 (THz) 主动成像系统。系统的关键元件是一种基于微电子机械系统 (MEMS) 技术的双悬臂梁焦平面阵列 (FPA)。由于 THz 能量小, 为了提高器件探测的灵敏度, 针对 THz 波段对器件提出了使用基于表面等离子体共振原理的光读出方案; 对微梁结构做了设计, 使微梁可以沿垂直方向移动。对设计的结构进行了有限元分析, 表明该方案是一种探测精度很高的解决方案。

**关键词** 太赫兹技术; 成像; 焦平面阵列; 悬臂梁

中图分类号 TL816<sup>+</sup>.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s111006

## Terahertz Focal Plane Array Based on Bi-Material Micro-Cantilever

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

(<sup>1</sup>School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

**Abstract** A real-time imaging system for terahertz (THz) radiation is presented. The key component of the system is the focal plane array (FPA). Which is a bi-material micro-electro mechanical systems (MEMS) detector array optimized for infrared wave lengths. In order to get a better THz image, the paper presents a modified FPA for THz region. Two main methods are explored to improve the detector performance in the THz region. The first way identified is the use of novel optical readout system based on surface plasma resonator (SPR). The second detector improvement approach involving the change of the micro-cantilever structure that the cantilever of each pixel can shift in vertical direction. A model of one pixel is set up to optimize the structure. Computer simulation results show that both approaches are effective. The manufacturing of the proposed detector are also discussed. The technological investigation shows that it is feasible to employ sacrificial layer technique related to MEMS technology.

**Key words** terahertz technology; imaging; focal plane array; cantilever

**OCIS codes** 040.1240; 110.6795; 160.1890

## 1 引言

太赫兹 (THz) 频谱范围约在 0.1~10 THz。由于它能穿透塑料、纸张和木材等非极性物质<sup>[1,2]</sup>, 所以它在隐蔽物探测、医学成像有着巨大的潜力。而且由于对探测的人或物体仅产生热效应, 所以对探测物体完全无害。但是, 在过去由于缺乏有效的 THz 产生及探测手段, 这一波段一直未被充分开发利用。直至近年来得益于 THz 产生及探测手段的进步, 其中一个重要的领域——THz 成像已成为人们的研究热点。

近年来, 有些研究小组<sup>[3~5]</sup>已经宣布通过对已有红外 (IR) 热像仪做一些改动就能实现对 1~5 THz 波段的主动式探测成像, 而且有较好的探测精度。

以氧化钽 IR 焦平面为例, 成像在焦平面上的像通过集成在其上的电子读出系统被读出, 最后将其图像显示在计算机屏幕上。但是电子读出系统的设计和加工比较贵而且复杂。更为重要的是电子读出系统的固有电子噪声直接限制了探测的精度。

为了克服以上缺点, 本文提出了一种基于微电子机械系统 (MEMS) 技术的双材料微悬臂梁探测器<sup>[6,7]</sup>, 将此探测器单元集成为阵列形式, 就可以成为焦平面阵列 (FPA)。

## 2 THz 成像系统的构建

双材料微悬臂梁 FPA 的每个像素的结构如图 1 所示。其工作原理如下: 焦平面由双材料

收稿日期: 2011-08-09; 收到修改稿日期: 2011-10-13

作者简介: 段国腾 (1984—), 男, 博士研究生, 主要从事太赫兹成像器件方面的研究。E-mail: duangt@bit.edu.cn

导师简介: 张存林 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹光谱与成像技术和光电信息功能材料等方面的研究。

E-mail: cunlin\_zhang@mail.cnu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zwrei@bit.edu.cn

(SiN<sub>x</sub>/Au)悬臂梁构成, FPA 每一个像素吸收 THz 辐射而导致其温度发生不同程度的变化。由于双材料效应, 使悬臂梁发生不同角度的偏转。

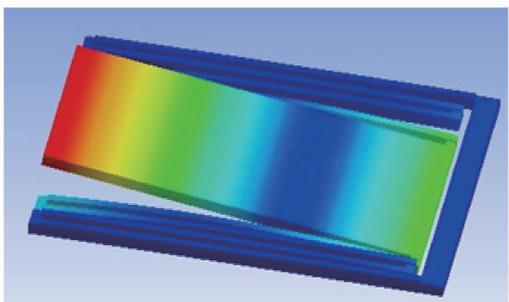


图 1 IR 焦平面单像素结构原理图

Fig. 1 Schematic of one pixel of IR-focal plane

通过特有的刀口滤波的方法, 把悬臂梁的不同偏转转换成可见光的不同光强的分布, 再通过 CCD 接收到强度图像, 从而间接得到了 THz 的强度像。即 CCD 接收的图像间接反映焦平面上 THz 的强度分布。由于采用了光学的读出方法, 从而避免了比较难处理的电子噪声问题。

作为吸收层的 SiN<sub>x</sub> 不仅在 IR 波段有很好的吸收特性, 而且在 THz 高频波段也有比较好的吸收, 透射谱如图 2 所示。

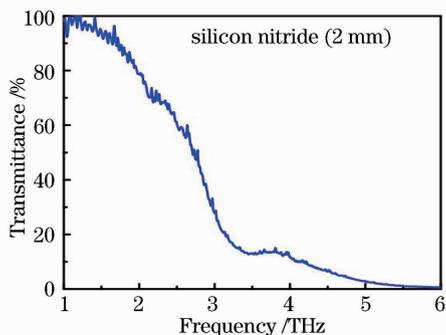


图 2 THz 辐射的透射谱

Fig. 2 Transmittance of THz radiation

基于上述原因, 在此搭建了基于 IR-FPA 芯片的 THz 成像系统, 装置的原理图如图 3 所示。回波

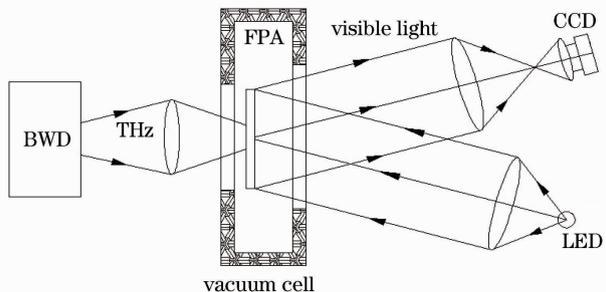


图 3 THz 成像系统的实验装置图

Fig. 3 Experiment setup for THz imaging

振荡器(BWO)发出的 THz 波被焦平面吸收从而使双材料微悬臂梁发生偏转。偏转通过刀口滤波转化成可见光的强度变化。最后在 FPA 上的 THz 强度反映在 CCD 上。FPA 被放置在真空腔中以减少 FPA 的热损失, 这样可得到比在大气中更高的灵敏度。

### 3 THz 焦平面的改进

由于 THz 辐射功率低, 探测器需要更高的灵敏度和精度使它更适于 THz 成像。为了探测更低功率 THz 辐射, 需要对 FPA 的像素结构做一些改进。一是采用了一种较新颖的光学读出系统, 该读出系统是根据表面等离子体共振(SPR)原理来检测微悬臂梁的微位移, 该方法可以大大提高探测器的探测精度。原理图如图 4 所示。激光以某一固定角入射, 由于表面 SPR 效应<sup>[8-10]</sup>, 反射的光强由其上的间隙厚度确定。这样悬臂梁弯曲改变了金属薄膜和悬臂梁之间的间隙厚度, 从而使反射光强发生变化。这样就可以间接反映 THz 的强度变化。根据文献<sup>[8]</sup>的推导可知, 反射光强正比于间隙厚度。间隙厚度的分辨率可达到 0.8 nm, 对应于可探测的辐射功率(环境温度为 300 K)约为 2 nW。

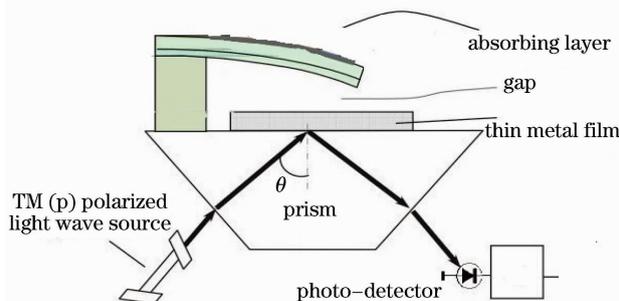


图 4 基于 SPR 的双材料 MEMS 探测器原理图

Fig. 4 Schematic view of the proposed bi-material MEMS detector based on SPR

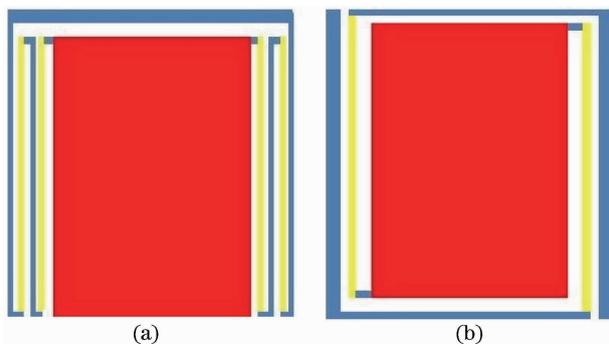


图 5 (a)传统和(b)新结构的对比

Fig. 5 Comparison of (a) the conventional and (b) the new structure

二是基于 SPR 的读出方法。基于 IRFPA 的 THz 成像系统中图像的获取是通过刀口滤波的方法检测微悬臂梁的偏转角度而得到的。如果使用基于 SPR 的读出方法,需要对微梁结构做一些改进以适用新的读出系统。改动前后的对比如图 5 所示。对结构稍做改动,就可以使悬臂梁在垂直方向发生移动。这样检测的就不是角度偏转而是垂直方向的位移,使得更适用于 SPR 的读出系统。

## 4 仿真分析结果

通过 ANSYS 有限元分析软件对新结构进行分析。结构的总体尺寸为  $100\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiN}_x$  和 Au 的厚度分别为  $4\ \mu\text{m}$  和  $1\ \mu\text{m}$ , 变形梁宽度为  $5\ \mu\text{m}$ 。仿真输入功率为  $1\ \text{nW}$ 。图 6 为仿真结果,结果显示微悬臂梁可以自由地上下移动,此时对应的最大位移量为  $0.85\ \text{nm}$ 。而基于 SPR 的读出系统的间隙分辨率为  $0.8\ \text{nm}$ ,因此初步的仿真结果显示可探测最小功率可达  $1\ \text{nW}$ 。通过对结构尺寸进行优化,可以得到更好的结果。

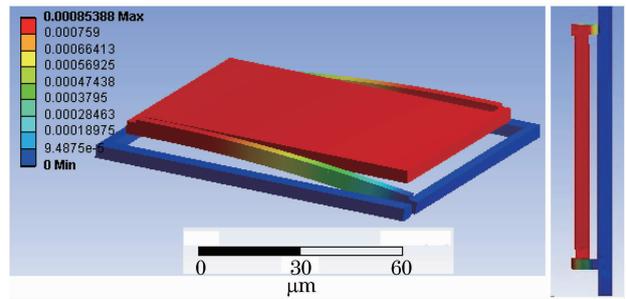


图 6 新结构的仿真分析

Fig. 6 Simulation result of the new structure (absorbed power is  $1\ \text{nW}$ )

## 5 工艺讨论

对工艺的可实现性进行评估表明<sup>[11]</sup>,采用 MEMS 特有的牺牲层工艺可以实现上述结构。工艺过程如图 7 所示:1) 由磁控溅射的到金属膜(金或银);2) 由磁控溅射淀积牺牲层(有机材料);3) 在牺牲层上淀积悬臂梁结构层;4) 由氧离子干法刻蚀掉牺牲层,释放悬臂梁;5) 使加工后的结构和玻璃键合。

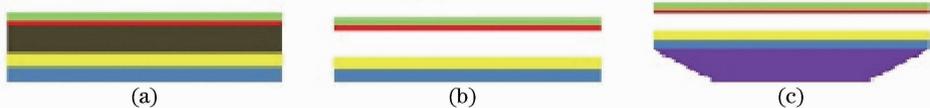


图 7 器件主要的工艺流程。(a) 磁控溅射多层膜淀积;(b) 移除牺牲层(黑色);(c) 与玻璃键合

Fig. 7 Flow of the device fabrication. (a) Multi-layer coating by magnetic sputtering; (b) the removed sacrificial layer (black color); (c) bonding with glass

## 6 结 论

提出了一种用于探测低功率 THz 辐射成像的 FPA。该阵列采用比较新颖的读出方法为低辐射功率探测提供了一个可行方案。对其实现工艺进行了评估,评估表明此种 FPA 具有工艺的可行性。进行了方案建模仿真,结果表明由于采用了新的结构和基于 SPR 的光学读出方法,使探测器可以探测很低的辐射功率,可以很好地实现对低功率 THz 辐射的探测和成像。

### 参 考 文 献

- 1 J. Christian, W. Steffen, P. Ole *et al.*. Terahertz imaging: applications and perspectives[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(19): E48~E57
- 2 W. L. Chan, J. Deibel, D. M. Mittleman. Imaging with terahertz radiation[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, **70**(8): 1325~1379
- 3 J. A. Cox, R. Higashi, F. Nusseibeh *et al.*. Uncooled MEMS-based detector arrays for THz imaging applications[C]. *SPIE*, 2009, **7311**: 73110R

- 4 P. Timothy, D. Michel, D. Fabien *et al.*. Uncooled detector, optics, and camera development for THz imaging[C]. *SPIE*, 2009, **7311**: 73110L
- 5 A. W. Lee, Q. Hu. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2563~2565
- 6 H. Shi, Q. Zhang, J. Qian *et al.*. Optical sensitivity analysis of deformed mirrors for microcantilever array IR imaging[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4367~4381
- 7 F. Dong, Q. Zhang, D. Chen *et al.*. An uncooled optically readable infrared imaging detector[J]. *Sensors and Actuators a-Physical*, 2007, **133**(1): 236~242
- 8 J. Hastanin, Y. Renotte, F. K. Fleury *et al.*. Understanding of optical readout accuracy with micromechanical sensor cantilever monitored by surface plasmon resonance[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(14): 3018~3023
- 9 J. Lai, T. Perazzo, Z. Shi *et al.*. Optimization and performance of high-resolution micro-opto-mechanical thermal sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 1997, **A58**: 113~119
- 10 J. Hastanin, Y. Renotte, K. Fleury-Frenette *et al.*. A far infrared/terahertz micromechanical sensor based on surface plasmons resonance[C]. *SPIE*, 2008, **7113**: 71131C
- 11 D. Grbovic, G. Karunasiri. Fabrication of Bi-material MEMS detector arrays for THz imaging[C]. *SPIE*, 2009, **7311**: 731108

栏目编辑:李文誌