

〈材料与器件〉

基于矩形微透镜阵列的红外焦平面集成技术研究

孙艳军, 陈哲, 冷雁冰, 董连和

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 微小型化是红外焦平面探测器发展的必然趋势, 微小型化将使目前焦平面阵列存在的占空比小、光能利用率低的问题体现的更加明显, 针对这一状况, 提出一种利用分子间引力的光胶技术将矩形孔径球面微透镜阵列集成于红外焦平面之中。采用几何光学理论分析了微透镜阵列的聚能效应, 设计并制作“栅线”和“方孔”双对准标记, 采用衍射光栅同轴对准方法使两种器件的对准精度达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。对集成前后红外焦平面阵列性能进行测试, 发现响应率提高了近 40%, 探测率提高了约 20%, 红外焦平面的噪声从 $758.89\text{ }\mu\text{V}$ 下降到 $668.23\text{ }\mu\text{V}$ 。最终得到结论: 光胶法用于两种器件的集成具有耐温性好、变形小、强度高等优点, 集成后红外焦平面的探测性能显著提高, 有利于探测器微小型化发展。

关键词: 红外焦平面; 微透镜阵列; 光胶集成

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)03-0225-04

Study on the Integration of Square Aperture Spherical Micro-lens Arrays and Infrared Focal Plane

SUN Yan-jun, CHEN Zhe, LENG Yan-bin, DONG Lian-he

(The School of photo-electronic engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 13002)

Abstract: According to the problem of small duty cycle and low light energy utilization in infrared focal plane, an optical cement technology is putted forward that integrated square aperture spherical micro-lens arrays and infrared focal plane. Micro-lens arrays cumulative effect is analysed theoretically in this paper. “grating line” and “cross” double alignment marks are designed. Alignment micro-lens arrays and infrared focal plane by diffraction grating coaxial alignment method, We find that responsivity improved 40%, detectivity improved 20%. Noise decreased from $758.89\text{ }\mu\text{V}$ to $668.23\text{ }\mu\text{V}$ by comparison of pre integration. And show that There are many advantages of temperature resistance, small deformation etc, detection performance improved significantly, helpful to the develop of detector Microminiaturization.

Key words: infrared focal plane, micro-lens arrays, optical cement integration

0 引言

红外探测器是探测红外辐射为主的光电传感器, 红外焦平面是红外探测器的关键部分。红外焦平面主要由对红外光敏感的光敏阵列构成, 在红外光敏阵列中, 感光面分“光敏感区”和“间隔区”^[1]。光敏感区能够接受光能量, 产生光电效应, 用于光电探测器的接收; 间隔区不能产生光电效应, 用于光敏阵列之间的布线。根据光敏感区和间隔区所占比例(一般称之为“占空比”)计算, 光能有效利用率为 60%, 即占空比很小, 光能损失比较大。光能的损失会使红

外探测器的探测距离与灵敏度大幅下降, 而且随着探测技术在军事与空间技术中的应用, 要求探测器向小型化、微型化的方向发展^[2], 探测器体积减小意味着光敏单元面积的减小, 这将严重影响红外探测器的探测灵敏度、信噪比等性能。从能量的利用率角度考虑, 将微光学阵列与红外焦平面集成应用, 根据透镜的聚光原理把剩余光能量聚焦于光敏单元上, 从而提高红外探测器的光敏灵敏度和红外探测距离。

1 光折射聚能效应分析

微透镜阵列置于光学系统内的目的是使经过透

收稿日期: 2013-08-02; 修订日期: 2013-09-22。

作者简介: 孙艳军(1978-), 男, 汉族, 吉林省长春市人, 讲师, 博士研究生, 主要研究工作是光学微细制造技术。E-mail: custsun@126.com。

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目, 编号: 201215142。

镜阵列后的光能全部聚集在光敏单元内，在给定红外焦平面光电单元尺寸、前置红外物镜 F 数、微透镜材料折射率 n 的情况下，经过微透镜阵列单元的光线传播路径如图 1 所示。

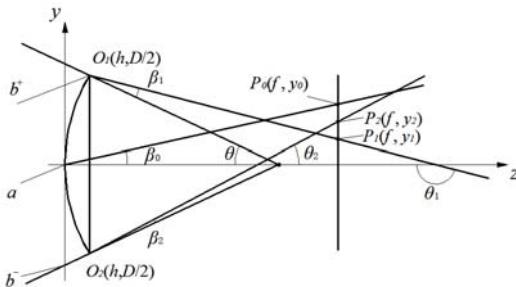


图 1 单元透镜光线追迹 Fig.1 Element lens light track

经透镜中心的光线用 a 表示，上下视场的光线分别用 b^+ 和 b^- 来表示，当这 3 条光线经透镜折射都能聚集在光敏单元内时，则其它所有光线都能够汇集于光敏单元内。透镜与光敏单元的工作距为 L ，透镜中心角 θ ，根据光线折射原理可得^[3]：

$$\begin{cases} \sin \alpha_0 = n \sin \beta_0 \\ \sin \alpha_1 = n \sin \beta_1, \quad \beta_1 = \alpha_0 + \theta \\ \sin \alpha_2 = n \sin \beta_2, \quad \beta_2 = \alpha_0 - \theta \end{cases} \quad (1)$$

f 为透镜单元的焦距，折射光线 OP_0 传播至焦平面与其相交于一点 P_0 ，该点在焦平面上的高度为：

$$y_0 = f \tan \beta_0 \quad (2)$$

O_1P_1 传播至焦平面与其相交于一点 P_1 ，其高度为：

$$y_1 = (f-h) \tan \theta_1 + D/2 \quad (3)$$

光线 b^- 经透镜折射与焦平面相交于 P_2 ，其高度为：

$$y_2 = (f-h) \tan \theta_2 + D/2 \quad (4)$$

考虑透镜的 F 数，并综合 y_0 、 y_1 、 y_2 ，若想提高光能利用率，要求光线经过微透镜折射后汇聚于光敏区，则 $0 \leq y_0 \leq d/2$ 、 $0 \leq y_1 \leq d/2$ 、 $0 \leq y_2 \leq d/2$ ，其中 d 是光敏单元边长，将公式(2)、(3)、(4)按其取值可得方程组：

$$\begin{cases} 0 \leq f / \sqrt{n^2 (4F_0^2 + 1) - 1} \leq \frac{d}{2} \\ 0 \leq -\tan \left(\theta - \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin \left(\arcsin \frac{1}{\sqrt{4F_0^2 + 1}} + \theta \right) \right) \right) \\ \left(f - \frac{D(1-\cos\theta)}{2\sin\theta} \right) + \frac{D}{2} \leq \frac{d}{2} \\ 0 \leq \tan \left(\theta + \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin \left(\arcsin \frac{1}{\sqrt{4F_0^2 + 1}} - \theta \right) \right) \right) \\ \left(f - \frac{D(1-\cos\theta)}{2\sin\theta} \right) - \frac{D}{2} \leq \frac{d}{2} \end{cases} \quad (5)$$

根据方程组(5)求出透镜单元的焦距 f 与球面所对应圆心角 θ 的值，因为是不等式，因此 f 和 θ 的值在一定范围之内，上式中令 $\alpha_2 = \theta - \alpha_0$ 、 $\theta_2 = \theta - \beta_2$ ，则可求出^[4]：

$$\begin{cases} f \leq \frac{d \sqrt{n^2 (4F_0^2 + 1) - 1}}{2} \\ 0 \leq -\tan \left(\theta - \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin \left(\theta + \arcsin \frac{1}{\sqrt{4F_0^2 + 1}} \right) \right) \right) \\ \left(f - \frac{D(1-\cos\theta)}{2\sin\theta} \right) + \frac{D}{2} \leq \frac{d}{2} \\ 0 \leq \tan \left(\theta + \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin \left(\theta - \arcsin \frac{1}{\sqrt{4F_0^2 + 1}} \right) \right) \right) \\ \left(f - \frac{D(1-\cos\theta)}{2\sin\theta} \right) - \frac{D}{2} \leq \frac{d}{2} \end{cases} \quad (6)$$

2 集成实验

2.1 集成方法与原理

实验中采用碲镉汞红外焦平面阵列，阵列数 128×128 ，单元尺寸 $b = 28 \times 28 \mu\text{m}$ ，周期尺寸 $T_1 = 35 \times 35 \mu\text{m}$ 。基于方形孔径微透镜阵列的形状特点，它的 1 个透镜单元应完成覆盖红外焦平面阵列的 1 个光面单元，因此它的阵列数和周期尺寸与红外焦平面相同。透镜单元与光敏单元对应的结构如图 2 所示。

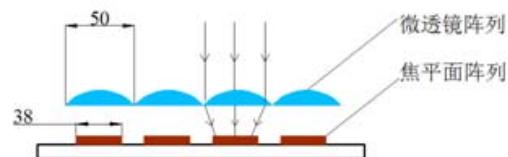


图 2 集成结构示意图 Fig.2 Integration schematic diagram

两种器件集成采用光胶的方法，光胶是依靠分子间的吸引力使两个光学零件的抛光表面紧密贴合在一起，分子间的作用力可表示为^[3]：

$$F = \frac{\lambda}{r^s} - \frac{\mu}{r^t} \quad (7)$$

式中： F 为分子间作用力； λ 、 μ 是系数并都为正数； r 为分子间的距离； s 、 t 为随物质而异的常数。公式中 λ/r^s 表示斥力， μ/r^t 表示引力。由于 s 、 t 较大，所以 F 随 r 的增加而急剧减小^[4]。当 $r=10^{-3} \sim 10^{-4} \mu\text{m}$ 时，即两光胶表面之间的距离在 $0.001 \sim 0.0001 \mu\text{m}$ 范围内时，表现为分子间的引力，因此要求光胶面的平面度误差达到：

$$N = \frac{\Delta h}{\lambda/2} = \frac{0.001}{0.25} = \frac{1}{250} \quad (\text{光圈}) \quad (8)$$

2.2 集成对准方法

为实现透镜单元与光面单元的精确对准,设计双对准标记如图3所示,微透镜阵列上的对准标记为黑白栅线,焦平面阵列上的对准标记为相位光栅。微透镜阵列上的对准标记分4个区,左面区域的光栅周期为 $16\text{ }\mu\text{m}$,线宽为 $8\text{ }\mu\text{m}$;右面区域的光栅周期为 $17.6\text{ }\mu\text{m}$,线宽为 $8.8\text{ }\mu\text{m}$ 。一、三象限为横向光栅,用于捕捉Y向过零点,二、四象限为纵向光栅,用于捕捉X向过零点。微透镜阵列上的对准标记也分4个区,与焦平面阵列上的一一对应,采用5倍缩小的物镜,那么左边两个象限的光栅周期应为 $80\text{ }\mu\text{m}$,右边两个象限的光栅周期则应为 $88\text{ }\mu\text{m}$ 。在对准扫描过程中,光栅周期为 $16\text{ }\mu\text{m}$,工件台每扫描 $8.8\text{ }\mu\text{m}$ 会出现一个过零点,这样无论在X向还是在Y向,工件台每扫描 $88\text{ }\mu\text{m}$ 就会出现共同的过零点,这样对准的测量行程就为 $88\text{ }\mu\text{m}$ 。

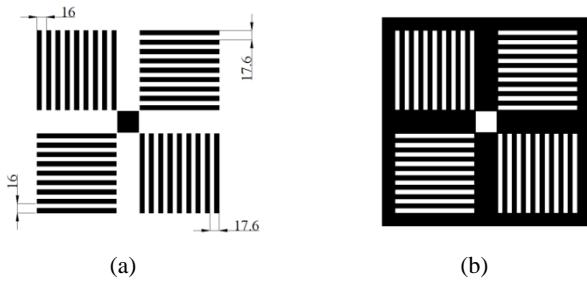


图3 对准标记

Fig.3 Alignment mark

另外,微透镜中心有1个“■”标记,焦平面中心有“□”标记,这两个标记是用于标识的,两个标识标记可以帮助操作者辨认是微透镜阵列标记还是焦平面阵列标记。对准过程采用衍射光栅同轴对准系统,原理如图4所示。

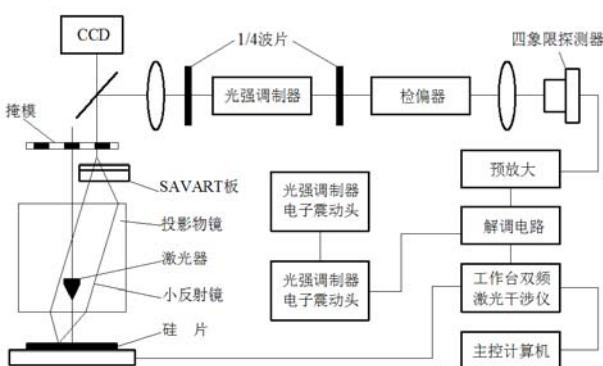


图4 衍射光栅同轴对准原理

Fig.4 Diffraction grating coaxial alignment principle

对准信号通过检偏器后成像在四象限光电探测器上,探测器接收到的光信号为交替通过的o光和e光(o光、e光为SAVART板将±1级衍射光切成的相互垂直偏振光)^[5],调制频率50kHz。波形如图5所示。

微透镜阵列和焦平面阵列之间相对位置的移动引起光强的变化,这个变化信号是低频的,而经过光学调制器组件的处理,相当于增加了一个高频载波。因此,弱信号放大后再由电路实施解调,降低引起电学信号的失真,这将大大加强对准系统抗干扰和抗噪声的能力,使对准精度大大提高。最高对准精度可以达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

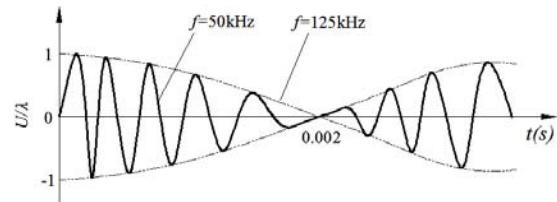


图5 探测器输出信号 Fig.5 Detector output signal

3 性能测试

实验中采用红外焦平面综合参数系统对集成器件进行测试。测试系统硬件结构由红外光学系统、机械扫描系统、测试夹具、致冷装置、驱动电子学、数据采集和处理、数字示波器、计算机、打印机、光学平台等部分组成。通过对硬件编程,设定相关参数,产生倍测红外焦平面所需的电源、偏压和时钟等驱动信号,使红外焦平面正常工作后采集信号并输出,同时对采集得到的数据进行统计处理以得到红外焦平面性能指标。

3.1 响应率测试

在室温 22°C 时采集128帧图像,计算各像素点电压值,探测器输出电压二维分布如图6(a)所示。 20°C 探测器输出电压的平均值为 2.6128 V 。在相同温度下用各像素点的电压差除以辐射能量或温度,可计算出各像素点的响应率,其响应率的二维分布如图6(b)所示。探测器的响应率为 $8.26362 \times 10^6\text{ V/W}$,温度响应率为 12.3562 mV/K 。

3.2 噪声测试

温度 34°C 时,采集128帧图像数据并计算出各像素点的噪声电压分布二维如图7所示。统计的平均噪声电压为 $668.23\text{ }\mu\text{V}$ 。

3.3 相对光谱响应测试

相对光谱响应测试之前,首先要设置单色仪的扫描波长,并实时采集红外探测器中一固定点的数字信号,根据所采集的数据描绘出相对光谱响应曲线,具体如图8所示。将该曲线与测试标准中定义的光谱响应进行对比可知,其相对光谱响应范围为 $9.0\text{ }\mu\text{m} \sim 14.0\text{ }\mu\text{m}$,峰值波长为 $12.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

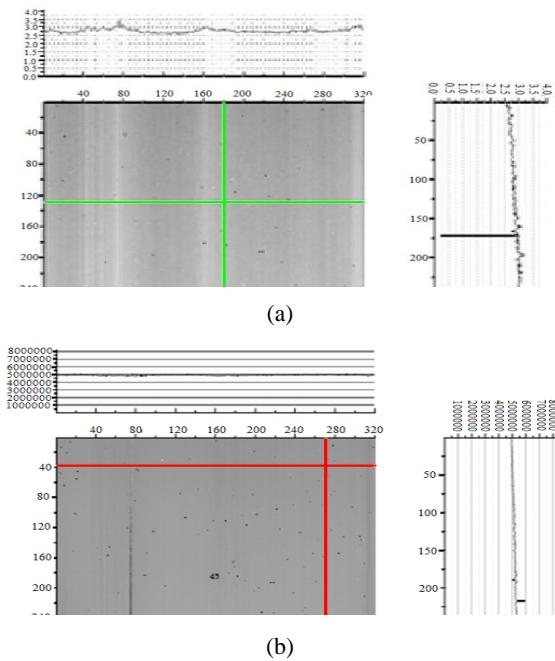


图6 红外焦平面响应率测试

Fig.6 Infrared focal plane responsivity test

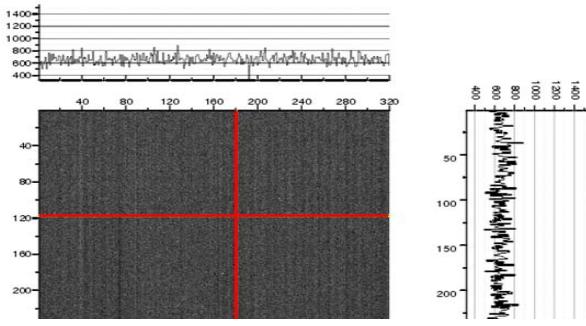


图7 噪声测试

Fig.7 Noise test

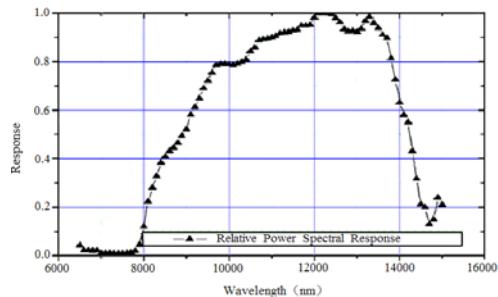


图8 相对光谱响应测试曲线

Fig.8 Relative spectral response test

将碲镉汞红外焦平面阵列集成前后性能参数进行对比,如表1所示。

对表1中数据进行对比分析可得到:碲镉汞红外焦平面的响应率提高了近40%;温度响应率提高了大约25%;探测率提高了大约20%。这种变化是由于集成方形孔径微透镜阵列后光能利用率增大,使红外探测的响应率得到极大提高;焦平面的噪声和噪声温差也有一定的改善;焦平面的相对光谱响应和串音在集

成方形孔径微透镜阵列前后几乎没有任何变化,这是由于光谱响应和串音是由光敏材料自身性质在起作用,与光能的大小无关。

表1 焦平面与微透镜阵列集成前后性能对比

Table 1 Performance comparison between Infrared Focal Plane and Micro-lens Arrays

测试项目	集成前	集成后
响应率/(V/W)	5.07365×10^6	8.26362×10^6
温度响应 (mV/K)	9.5642	12.3562
噪声/ μ V	758.89	668.23
探测率 $/\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$	5.27608×10^9	8.14856×10^9
相对光谱响应 $/\mu\text{m}$	范围: 9.0~14.0 峰值波长: 12.3	范围: 9.0~14.0 峰值波长: 12.3
串音	4.56%	4.55%
等效温差/mK	79.36	72.22

4 结论

通过对方形孔径微透镜阵列与红外焦平面集成的研究发现,由于光胶集成过程中不引入胶粘剂,因此其在光学性能、机械性能、温度性能、牢固度等方面都具备明显的优势。设计的“栅线”和“十字”双对准标记,通过衍射光栅同轴对准方法可使两种阵列器件的对准精度达到0.1 μm。集成后焦平面器件的响应率、温度响应率、探测率都得到明显提高,因此方形孔径微透镜阵列与红外焦平面集成技术可为红外探测器微小型化发展提供一定的技术支持。

参考文献:

- [1] Alexander Toet, Lodewijk J, Van Ruyven. Aerging thermal and visual image by a contrast pyramid[J]. Opt. Eng., 1992, **28**(4): 789-792.
- [2] Deepa Kundur, Dimitrios Hatzinakos. A novel approach to multispectral blind image fusion[C]//Proc. of SPIE, 1997, **36**(7): 83-93.
- [3] 孙艳军,冷雁冰,陈哲,等.硅基自由曲面光学微透镜阵列制作的光学性能研究[J].红外技术,2012, **34**(2): 34-37.
- [4] Lowney J R, Seiler D G, Littler C L, et al. Intrinsic carrier concentration of narrow-gap mercury cadmium telluride base the nonlinear temperature dependence of the band gaps [J]. Appl. Phys., 1992, **71**(6): 1253-1258.
- [5] 柯才军,易新建.提高CCD图像传感器填充因子的微透镜阵列的研究[J].红外与激光工程,2004, **33**(2): 209-212..
- [6] 孙艳军,冷雁冰,陈哲,等.用于红外焦平面的正方形孔径球面微透镜阵列研究[J].光子学报,2012, **41**(4): 44-47.
- [7] Velicu S, Ashokan R, Sivananthan S. A model for dark current and multiplication in HgCdTe avalanche photodiodes[J]. Electron Mater., 2000, **29**(12): 823-827.
- [8] Wilson Tery A, Rogers Steven K, Myers Lemuel R. Perceptual based hyperspectral image fusion using multiresolution analysis[J]. Optical Engineering, 1995, **34**(11): 3154-3164.