

文章编号: 0253-2239(2001)02-246-04

微透镜列阵提高红外探测器探测能力的方法研究*

杜春雷 林祥棣 周礼书 白临波 邱传凯

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

徐国森 方家雄 王继元

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 研究用微光学方法提高红外探测器探测能力的机理, 通过实验将锗微透镜列阵耦合到 180 元 HgCdTe 焦平面红外探测器上, 使耦合组件探测率提高到原来的 2.8 倍。提出的光学耦合效率概念为客观评价微光学聚能元件综合质量及耦合机构性能提供了一种新的方法。还对微透镜列阵的冷屏效应进行了讨论。

关键词: 微透镜列阵; 红外焦平面探测器; 探测率; 冷屏效应

中图分类号: TB96 文献标识码: A

1 引 言

红外成像光电探测器是现代广泛应用的一种重要光电器件。高灵敏度和高分辨率成像探测系统通常要求光电探测器件的响应率和探测率高、噪声低、像元尺寸小和填充因子大。由于材料制备和工艺制作上的困难, 这些要求一般很难同时实现。

国外 90 年代初开始报道用微透镜列阵提高红外探测器性能的研究^[1~3], Werner 等人用 $f/0.9$ 的 64×96 单元微透镜列阵与填充因子为 20% 的红外探测器列阵耦合, 使信号最大增益提高到 2.5 倍。

我国红外成像技术与系统在近几年取得很大进展, 研制出的线列探测器已开始进入工程。无论是探测器还是线阵探测器, 探测成像都需要使用扫描机构, 但这样的系统结构复杂、探测效率低。由这些探测器构成的第一代红外成像系统已不能满足空间和国防领域的需要, 因此对无需扫描机构、使用焦平面凝视面阵红外探测器的第二代红外成像系统具有迫切的需求。为研究掌握可实用的微透镜列阵与探测器耦合的设计与工艺, 为制造大面阵凝视高性能红外探测器提供新的技术支撑, 本文研究了用微透镜列阵提高红外探测器能力的方法及耦合技术, 利用微细加工手段, 在突破微透镜列阵制作关键工艺的基础上, 通过研究耦合方法, 成功地将衍射微透镜列阵元件耦合到填充因子为 25% 的 180 元红外探

测器上。经测试, 耦合组件探测率提高到原来的 2.8 倍, 光学耦合效率达到 70%。研究结果表明, 微透镜列阵除了起到聚能作用外, 其微冷屏列阵效应还可降低背景辐射噪声, 因此使探测能力增强。

2 微透镜列阵改善红外探测器性能的原理

红外焦平面器件中的重要指标之一是填充因子 (占空比) η , 它定义为探测器光敏面的有效面积 A_s 与整个像素元总面积 A_1 之比:

$$\eta = A_s / A_1 \quad (1)$$

由于探测器光敏面材料均匀性及结构布局的限制, 光敏面总比像元面小很多, 使填充因子远远小于 100%, 甚至有些器件 η 只有 20% 左右。填充因子低使入射到红外焦平面器件的光能不能充分利用。提高填充因子、增加面积利用率, 可增强探测器的响应率, 从而提高探测率。在探测器的设计和制作过程中, 制作较大光敏面存在困难, 而光敏面之间也必须留有一定间隙以供电路走线等之用, 因此增大探测器填充因子受到限制。探测器一旦形成, 再用电子学方法提高探测能力的可能性很小。将微透镜耦合到探测器像元面上, 使入射到像元面上的辐射, 有效地会聚到光敏面上, 提高光能利用率。

红外探测器列阵的结构示意图 1, 其像素光敏面积为 $A_s = a^2$, 整个像素面积为 $A_1 = b^2$ 。从图 1(a) 可以看出, 微透镜列阵与探测器列阵耦合前, 像素光能接收面积为 A_s , 入射光的另一部分照射到光

* 国家科委 863 高科技及国防预研等资助项目。

收稿日期: 1999-11-30; 收到修改稿日期: 2000-03-17

敏面之间的死区中,这部分光不仅没有被利用,而且会反射、散射,在探测器中形成有害辐照。

图 1(b) 给出将子孔径与像素元尺寸相同的微透镜列阵放置在探测器列阵之前的情况。由于透镜的会聚作用,理论上入射光能全部收集到了探测器光敏面上。假设入射辐射强度 I 不变,加微透镜之前,探测器信号响应率为 R_1 ,与光敏面面积 A_s 成正比,比例系数为 t , $R_1 = tA_s$;加聚能透镜之后,信号响应率变为 $R_2 = tA_1\eta_dTk\delta C$,其中, A_1 为与像元面匹配的聚能元件的受光面积; η_d 为元件衍射效率; T 为元件的透过率; k 为由耦合误差造成的能量损失系数, C 反映微透镜列阵作为冷光栏对热背景辐射噪声的影响,定为冷屏系数; δ 为聚能元件子孔径的零级衍射归一化系数,设计衍射透镜时,应保证子孔径零级衍射斑尺寸小于光敏面有效尺寸。因此加微透镜列阵后信号响应率增益可表示为

$$g = R_1/R_2 = A_1\eta_dTk\delta C/A_s = \eta_dTk\delta C/\eta \quad (2)$$

探测器 D 的探测率是响应率、噪声 N 及光敏面有效面积的函数:

$$D = (R/N) \sqrt{A_s}, \quad (3)$$

式中 R 表示 R_1 或 R_2 。若探测器填充因子 $\eta = 25\%$,微透镜列阵的衍射效率 $\eta_d = 85\%$,透过率 $T = 80\%$, $\delta = 0.815$,耦合系数 k 及冷屏系数 C 均设为 1,用公式(2)计算出探测器响应率增益 $g = 2.2$ 。由(3)式可知,探测率 D 随响应率提高和噪声减低将得到相应改善。当微透镜列阵元件的综合质量及耦合方法精度确定时,响应率或探测率提高的程度与探测器的填充因子有关。

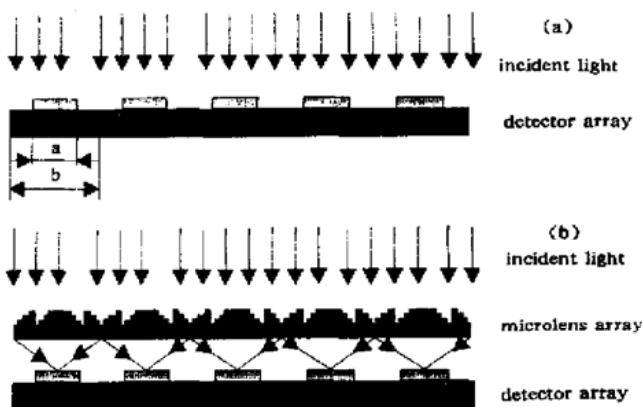


Fig. 1 Incident radiation concentrated by micro-lens array. (a) Without microlens array; (b) With microlens array

3 耦合实验

用微光学方法提高红外探测器探测能力的关键是衍射微透镜列阵元件的研制及耦合方法。本实验

用的红外探测器是上海技术物理研究所研制的品字型双列 180 元 HgCdTe 器件。该器件具有较多的光敏元,并具有面阵探测器的锥形,可供选用的探测器数也较多,都有较完整的测试数据,可供与微透镜耦合后的性能作相对比较,其结构参数由图 2 给出。光敏面尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,两行间光敏面中心距为 $350 \mu\text{m}$ 。探测器的工作波段为 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 。

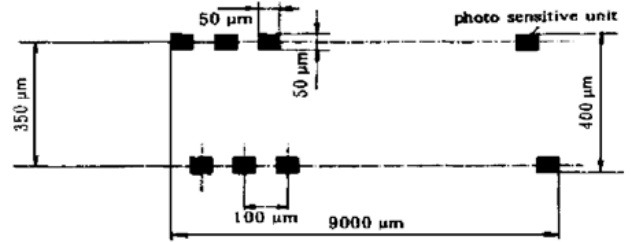


Fig. 2 Configuration for 180 unit HgCdTe detector array

根据探测器的结构参数设计衍射透镜列阵,每个子透镜孔径尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。根据耦合安装空间及子透镜衍射焦斑尺寸,确定焦距为 $200 \mu\text{m}$ 。探测器封装在制冷的杜瓦瓶里工作(温度为 77K),要求微透镜列阵在使用波段具有高的透过率及良好的低温工作特性,选择长波锗材料作为光学透镜列阵基底材料。通过工艺探索,我们研制出 8 位相台阶锗二元衍射微透镜列阵。图 3 给出锗微透镜列阵的放大照片图和单个透镜的二维浮雕结构轮廓,衍射效率大于 85% 。

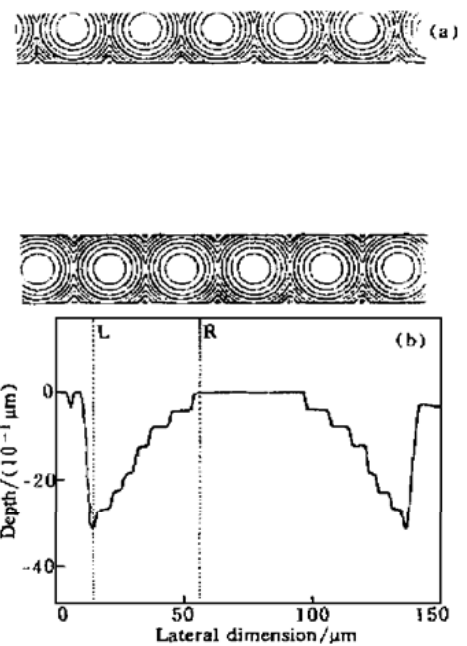


Fig. 3 Germanium diffractive microlens array. (a) Germanium microlens array; (b) Micro profile for a single lens

锗材料的外反射使微透镜列阵元件透过率很低,这可用镀增透膜方法来解决。微透镜列阵表面微浮雕结构的宽度和深度都在微米量级,并且微透

镜列阵在镀膜后还要进行切割和粘贴,并在低温环境下工作,因此对增透膜层的制备提出了高要求。我们采用离子束辅助镀膜技术来增强膜层的强度,获得了较好结果。离子束辅助镀膜是在热蒸发镀膜的同时,利用离子束对基片进行轰击,使荷能离子轰击沉积中的薄膜,增加凝聚粒子的能量和稳定性,从而导致高的堆积密度,改善膜层的光机性能。经过反复试验使镀膜前后的微浮雕结构基本不变,得到了满意的实验结果。用傅里叶红外分光光度计对元件透过率进行了测试,在 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ 的光谱范围内,平均透过率为 93%。

微透镜列阵与探测器耦合途径有 2 种,即分离式和集成式。集成式是在制作探测器时直接将微透镜列阵加工在上面,不附加耦合机构,微透镜元件与探测器形成一体。实现集成形式芯片,首先必须解决制作工艺中的关键技术,提高集成成品率。分离式是将微透镜与探测器分别制作,用有效的耦合方法使两者固联起来。耦合机构必须保证耦合间隙准确,又要能方便地调整微透镜中心与光敏面中心对准。耦合的关键技术是对准、间隙调整及胶合。

为了保证微透镜与探测器耦合时精确定位,我们设计的精密耦合机构主要包括微透镜架、调整座和调整螺钉。微透镜粘在微透镜架上,由螺钉与调整座联接。通过透镜架零件加工保证透镜列阵出射面与探测器光敏面的距离。由于微透镜与探测器耦合组件在低温条件下工作,因此要用低膨胀系数的材料制造透镜架。微透镜列阵与镜架用胶连接,完成对准后,再将微透镜架用冷胶固定在探测器冷块上。耦合时要使透镜列阵中每个透镜单元与探测器列阵光敏元严格对准。这个过程是通过调整螺钉改变微透镜架与探测器光敏面的相对位置来实现的。由于微透镜在可见光范围内是不透明的,这给对准带来很大困难。我们通过制作特殊标记,使微透镜列阵各单元中心与探测器光敏面中心对准,并在胶合前测试校正,使对准误差小于 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 。

4 耦合组件性能测试

微透镜列阵与探测器的耦合,不仅要求每个微透镜中心要与对应的光敏面中心对准,而且也要保证二者间隙为 $200\ \mu\text{m}$ 。在实验中解决了元件切割、镀膜、对准及胶合中遇到的一系列问题,最终将微透镜列阵与红外探测器列阵成功耦合形成实验耦合组件。在实验过程中,增透膜脱落使透镜列阵元件实

际透过率仅为 80%。我们对耦合组件的主要性能参数黑体响应率 R_{bb} 及探测率 D_{bb} 进行了测试,并与加微透镜列阵前的测试结果进行了比较。

响应率 R_{bb} 和 D_{bb} 探测率测试系统采用的黑体光源参数为:温度 500 K、温控精度 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 、辐射孔径为 $0.8\ \text{cm}$,恒流源的输出电流精度为 1%,前置放大器短路噪声 $N_{\text{amp}} \leq 5 \times 10^{-10}\ \text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,信号输出频率为 1 kHz,有效噪声带宽为 100 Hz。信号为一次采集,噪声为三次采集平均值,不同光敏元电阻变动所引入的总增益变动,由计算机自动加以修正。

在加透镜列阵之前,对 HgCdTe 光导探测器的 180 个单元进行了逐点测量,平均峰值响应率 R_p 为 $1.58 \times 10^4\ \text{V}/\text{W}$,计算出平均峰值探测率 D_p 为 $1.48 \times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。图 4 中打竖线的直方图给出耦合前探测率的分布;耦合微透镜列阵后,测得耦合组件的平均峰值响应率 R_p 为 $4.42 \times 10^4\ \text{V}/\text{W}$,计算出探测率 D_p 为 $4.09 \times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。图中黑色直方图表示耦合后组件的探测率分布(对数坐标)。结果表明:加上微透镜列阵后,180 元 HgCdTe 红外探测器的平均峰值探测率 D_p 提高到 2.8 倍。

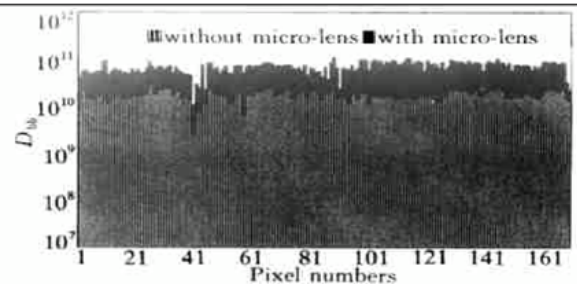


Fig. 4 Histogram of detectivity D before and after micro-lens array being used

5 实验结果评价

5.1 光学耦合效率

由(2)式、(3)式可知,响应率及探测率增益由微透镜聚能元件的性能(衍射效率 η_d 、透过率 T 、子孔径零级衍射归一化系数 δ)及耦合系数及冷屏系数 C 决定,而不同的探测器其填充因子 η 不同。为了排除探测器填充因子的影响,使耦合结果可以比较,我们引入光学耦合效率概念:

$$\eta_{\text{couple}} = \eta_d T k \delta C \quad (4)$$

η_{couple} 的大小直接反应了聚能器性能和耦合效率,排除了探测器填充因子的影响。这样,使用不同填充因子的探测器,加光聚能器后,探测率增益可以进行比较。由(2)式,光学耦合效率还可进一步表示为

$$\eta_{\text{coupl}} = g\eta \quad (5)$$

这样, 信号增益测得之后, 光学耦合效率就可计算出来, 即可对微光学元件及耦合方法进行评估。我们认为光学耦合效率综合反应了微光学聚能元件的性能及耦合方法的精度, 是一客观的评价标准。在本实验中, 根据实测探测率增益, 用(5)式计算耦合组件的光学耦合效率为: $\eta_{\text{couple}} = 2.8 \times 25\% = 70\%$ 。用同样的方法计算文献[1]给出结果的光学耦合效率为: $\eta_{\text{couple}} = 2.5 \times 20\% = 50\%$ 。对于光学耦合效率这项指标, 本实验结果比文献[1]的实验结果的耦合效率高出 20%。

5.2 冷屏阵列效应

在原理分析一节中, 假设耦合系数和冷屏系数均为 1 的情况下, 由(2)式估算出衍射聚能元件可使探测器响应率获得 2.2 倍增益。通过将该聚能元件与探测器耦合, 测量耦合组件实际的探测器增益为 2.8, 比预期结果高约 0.6 倍。这说明实际上冷屏系数和耦合系数并不是 1。为了说明冷屏效应, 我们假设耦合状况是理想的, 即耦合系数为 1, 根据实际探测器增益由(4)式计算出冷屏系数为 1.26。可见冷屏效应对提高探测能力起到了一定的作用。

通过研究发现, 探测器光敏元前加上微透镜后, 微透镜处于低温, 对探测器起到冷屏作用。微透镜阵列对入射辐射视场角进行了限制, 使热背景辐射大大减低, 噪声下降。理论上背景辐射通量 Φ 的平方根倒数 $(1/\Phi)^{1/2}$ 与探测率成正比, 这就是背景辐射通量降低使探测率提高的原因, 即冷屏效应^[4,5]。

另外, 在微透镜阵列与探测器阵列耦合组件中, 每个小微透镜不仅起到光学增益的作用, 而且形成一个微孔径冷屏。使得 180 元探测器每个单元前都有一个独立的微孔径冷屏, 达到背景限的多元探测器其性能均匀性与背景辐射通量的均匀性有关, 独立的微孔径冷屏, 保证探测器每一元都具有相同的视场角, 亦即有相同的背景辐射通量, 使背景限的探测器一致性得到提高, 这是微冷屏阵列效应。由(3)式知, 探测器探测率的提高取决于信号响应率和噪声, 微透镜阵列的引入正是通过提高光能利用率提高了信号响应率, 由冷屏效应减低了噪声, 使探测率提高。对冷屏效应作用机理的定量分析还需在今后的集成实验中进一步研究。本文结果可用于集成微光学技术的新型大面阵凝视红外焦平面探测器研究。

参 考 文 献

- [1] Werner T, Cox J A, Swanson S. Microlens array for staring infrared imager. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 46~ 57
- [2] Motamedi M E, Griswold M P, Knowmton R L. Silicon microlenses for optical coupling to silicon focal planes. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 22~ 32
- [3] Farn M W. Micro-concentrators for focal plane arrays. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**: 106~ 117
- [4] Borrello S, Kinch M, LaMont D. Photoconductive HgCdTe detector performance with background variation. *Infrared Physics*, 1977, **17**(2): 121~ 125
- [5] 张卫军, 李言谨, 龚海梅. 背景辐射对长波 HgCdTe 光电导探测器性能的影响. *红外与激光工程*, 1997, **26**(1): 33~ 39

Method for Improving Performance of Infrared Detector by Micro Optical Lens Array

Du Chunlei Lin Xiangdi Zhou Lishu Bai Linbo Qiu Chuankai

(State Key Lab of Optical Technology for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Xu Guosen Fang Jiexiong Wang Jiyuan

Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

(Received 30 November 1999; revised 17 March 2000)

Abstract: The mechanism for improving performance of infrared detector using micro optical method is studied. A germanium microlens array was coupled to a 180 unit infrared HgCdTe focal plane array detector. The detectivity of the coupled device was increased to 2.8-fold. As an objective standard, the optical coupling efficiency is proposed to evaluate the quality of micro optical concentrator and the coupled method. The cooling shield effect caused by microlens array, which is useful to limit the background radiation was also discussed.

Key words: microlens array; infrared focal plane detector; detectivity; cooling shield effect