

红外双波叠层结构探测器微透镜阵列的设计

徐正奎, 李晓斌, 乐丽珠, 于振龙, 何俊, 王春兴

(北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了一种双波段红外探测器叠层结构微透镜阵列的设计, 从实际光线角度进行建模, 考虑微透镜加工线宽的要求, 利用光学非成像理论的原理优化。并根据微透镜的衍射效率进行量化, 分析了影响占空比因素的计算方法等, 并对其进行了详细说明。该设计方法从实际入射光线建模, 思路新颖, 该方法经加工微透镜与探测器耦合后验证可行。给微透镜阵列的设计者一些启发, 可用于其他多种叠层结构探测器的微透镜阵列设计。

关键词: 微透镜阵列; 微透镜量化; 占空比

中图分类号: E933.41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0803003

Design of microlens array of infrared two-band laminated structure detector

Xu Zhengkui, Li Xiaobin, Le Lizhu, Yu Zhenlong, He Jun, Wang Chunxing

(North Night Vision Technology Group, Kunming 650223, China)

Abstract: The design of a double-band infrared detector stacked structure microlens array was introduced, which was modeled from the angle of actual light and optimized by using the principle of optical non-imaging theory, taking into account the requirement of microlens processing linewidth. According to the diffraction efficiency of the microlens, the calculation method of the factors affecting duty cycle was analyzed and explained in detail. The design method was novel and unique, which was based on the actual incident light. The method was verified to be feasible by coupling the processed microlens with the detector. Some inspiration is given to the designer of microlens arrays, which can be used in the design of microlens arrays for other multi-layer detectors.

Key words: microlens array; microlens quantification; vacancy ratio

0 引言

用于可见光 CCD 的微透镜阵列设计、集成的文献报道非常常见,对红外探测器阵列的单个波长的微透镜设计、制造应用的文献也偶见报道,但用于双色碲镉汞红外焦平面阵列的双波叠层结构微透镜阵列应用的文献几乎未曾见过报道。

红外探测器阵列的探测单元与单元间形成了非感光区(“死区”),使探测器阵列的感光灵敏度和信噪比特性下降。在探测器探测单元上集成微透镜,可有效提高占空比(填充因子),改善探测器的性能;因探测器探测单元是集成的,对应的微透镜也要集成相应数量,形成阵列。

微透镜的量化按照两个台阶、四个台阶和八个台阶进行,不同台阶的量化,其衍射效率不同,多台阶的量化衍射效率高。结合加工要求(刻蚀方法的线宽)选取合适的量化台阶数。

采用微透镜阵列与探测器阵列耦合集成后,探测器光敏面光能利用率增加,微透镜聚能效果好,探测器灵敏度和探测性能提高,其研究极具实用价值。

1 微透镜设计要求

1.1 探测器结构描述

针对红外探测器的工作波长为短波 1.7~2.6 μm 、中波 4.2~5.3 μm ,背面入射式,探测器阵列是 128×128 短波/中波双色碲镉汞红外焦平面的双波叠层结构^[1],如图 1 所示,探测单元 30 μm ×30 μm 、像元中心距为 30 μm 。

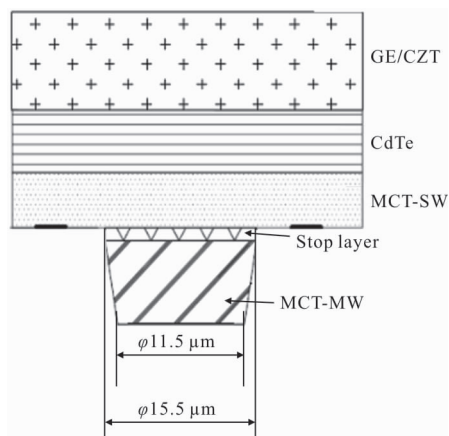
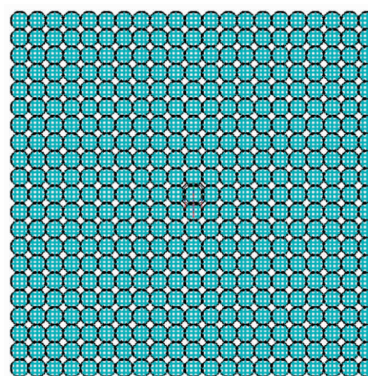


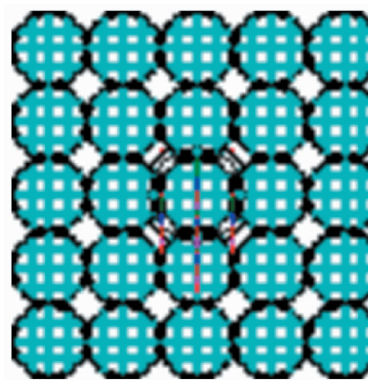
图 1 探测器的单元叠层结构
Fig.1 Unit stack structure of detector

探测器单元排列阵列拓扑结构如图 2 所示,探测单元与单元间形成了非感光区(“死区”),使传感器阵列的感光灵敏度降低和信噪比特性恶化。



(a) 128×128 单元阵列

(a) 128×128 cell array



(b) 5×5 单元阵列放大

(b) 5×5 cell array amplification

图 2 探测器单元排列阵列

Fig.2 Array of detector units

1.2 刻线宽度要求

因现有加工微透镜阵列的加工方法和加工工艺的限制,要求微透镜量化后最小刻蚀线宽不小于 1.5 μm 。

2 微透镜设计方法

2.1 光学设计光线建模

由于探测器接收单元为微米级,则微透镜的参数如半径、焦距等也用微米单位量纲,对于入射光线距离的毫米级,可将微透镜设计用平行光建模如图 3 所示,首先是轴向的平行光,然后考虑在与实际系统的对接中冷光栏(冷屏直径)与冷屏高度形成的最大角度一条光线入射到探测器靶面边缘最大视场的一

点, 取此条光线的角度作为微透镜设计的最大视场角, 且为斜平行光入射(微透镜阵列的边缘透镜接收到的斜光束), 视场最边缘与中心的夹角如图 3 所示, 将此值作为设计微透镜视场角输入^[2]。

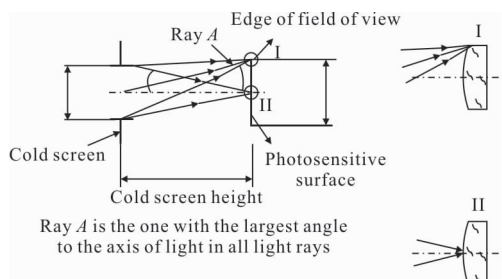


图 3 微透镜光线建模

Fig.3 Microlens ray modeling

2.2 设计考虑

微透镜设计与常规的光学设计不同, 它不是考虑成像质量而是考虑在一定范围内的包围圆能量问题, 以进入包围圆能量的大小来评价进行光学设计优化。

双色探测器的短波层的填充因子几乎可达到 100%, 对微透镜设计时无需考虑微透镜对短波层的影响。微透镜基底材料要求用单晶锗(Ge)或碲化镉(CdTe)两种红外材料。

红外辐射光线入口的能量百分比, 按照近似几何光学理论, 根据最边缘视场的光线(角度)可以进入双色探测器的中波层入口, 可求出微透镜的锗基底层厚度:

$$d \leq \frac{8\sqrt{n_2 - \sin^2 \alpha}}{\sin^2 \alpha} \quad (1)$$

式中: n 为锗基底层的折射率; 锗基底层厚度 d 必须保证边缘微透镜接收到的斜光束可以进入到最边缘探测器阵列, 即保证微透镜阵列的设计满足探测器阵列聚光的要求。

假定中波层的红外辐射光线为微透镜聚焦面^[4], 可得微透镜曲率半径 r 为:

$$r = \frac{n-1}{n} d \leq \frac{8(n-1)\sqrt{1 - (\sin \alpha/n)^2}}{\sin \alpha} \approx \frac{8(n-1)}{\sin \alpha} \quad (2)$$

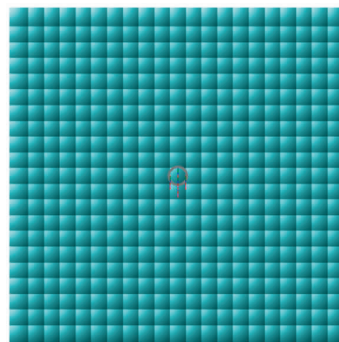
由于微透镜的尺度已是微米量级, 衍射效应不可忽略。因此, 按照理论计算的微透镜曲率半径 r 、锗基底层厚度 d 结果, 进一步进行光学设计软件 CODE V 仿真, 得到与实际情况相符的微透镜曲率

半径 r 、锗基底层厚度 d 设计值。

2.3 微透镜设计优化

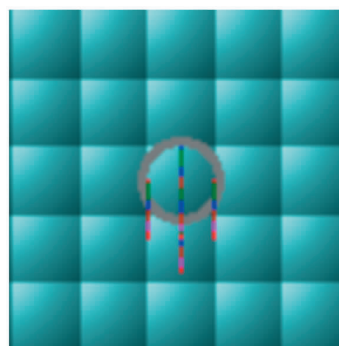
微透镜设计优化时, 利用非成像光学原理, 微透镜的设计是一个聚能问题, 包围圆能量的基点是每个视场的主光线或质心, 光学设计软件评价主要以进入中波接收入口 $\varphi 15.5 \mu\text{m}$ 的光能量最大化, 为了保证在规定范围内($\varphi 15.5 \mu\text{m}$)的接收能量达到最大值, 微透镜要有一定厚度的冠高(弧高)。

在光学设计软件上模拟时得知: 微透镜半径小^[5], 全视场范围内的包围圆能量大, 量化后最小刻线宽小于 $1.5 \mu\text{m}$ 不能加工; 反之则使最小线宽大于 $1.5 \mu\text{m}$, 但全视场范围的包围圆能量不能全部进入 $\varphi 15.5 \mu\text{m}$ 范围内。为了满足加工工艺的可行性, 即最小刻线宽度大于 $1.5 \mu\text{m}$, 就要有大的半径和一定的基底厚度来保证在 $\varphi 15.5 \mu\text{m}$ 范围内的包围圆能量尽量大, 因此, 满足能加工的刻线宽度和包围圆能量最大化只能综合考虑平衡设计优化微透镜的参数。微透镜阵列设计结果如图 4 所示。



(a) 128×128 微透镜阵列图

(a) 128×128 microlens arrays plot



(b) 5×5 微透镜阵列放大图

(b) 5×5 microlens arrays amplification plot

图 4 微透镜阵列图

Fig.4 Microlens array

在两种状态下(中心、边缘位置)评价微透镜阵列,确定微透镜的基底材料,调整曲率半径 r 、厚度 d 的参数,使得微透镜对短波、中波红外辐射聚能效率最大化的同时,考虑中心、边缘位置微透镜聚光效率的均匀性。最终根据要求确定单个微透镜结构,经过拓扑,结合实际加工的可行性,实现微透镜阵列的设计优化。

3 微透镜的量化

因单晶 Ge 材料的折射率大 ($4.7 \mu\text{m}@4.01833$),若选用八台阶量化则要求微透镜的半径大而基底很厚,不可取,且加工刻线宽小于 $1.5 \mu\text{m}$ 而不能加工微透镜阵列,因此,选择对微透镜进行四台阶量化。

单晶 Ge 微透镜的一个周期 (或称为一个 2π) 的高度为:

$$h = \lambda / (n - 1) = 4.7 / (4.01833 - 1) = 1.557 \mu\text{m} \quad (3)$$

周期数为: $2.791 / 1.557 = 1.794$

四台阶量化的每台阶高度为: $h / \text{台阶数} = 1.557 / 4 = 0.389 \mu\text{m}$ (即每台阶高度一样的) 量化是在微透镜的冠高上进行,每一个周期的高度一样;量化是在一个像素对应的外接四边形中进行,如一个像素是 $\varphi 30 \mu\text{m}$, 其外接四边形为 $42.42 \mu\text{m} \times 42.42 \mu\text{m}$ 。图 5 为微透镜的量化示意图。

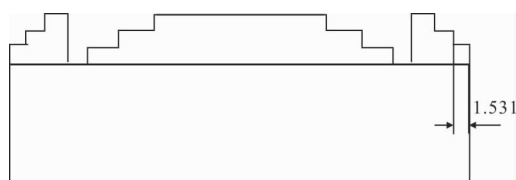


图 5 微透镜放大 1 000 倍的轮廓图

Fig.5 Profile of microlens magnified 1 000 times

4 占空比的计算

引入占空比主要是为了反映红外焦平面探测器阵列对入射光能量的有效利用率。为便于表征红外焦平面探测器阵列占空比(又称填充因子),具体指在入射光通过红外焦平面探测器阵列的过程中,能够接收光子,经光电转换形成电子的光敏区域包络体与整个像元包络体的比值,该比值代表每个像元包络体对入射光能量的有效利用率,计算占空比时

需考虑那些误差对占空比的影响。

4.1 探测器阵列(未加微透镜)的占空比计算公式

$$\text{占空比} = \frac{\text{光敏元面积}}{\text{像元面积}} = \frac{(0.0155/2)^2 \times 3.14}{0.03 \times 0.03} = 21\% \quad (4)$$

4.2 等效占空比

(1) 二元表面^[3]微透镜对一个 2π 周期内的连续表面进行离散化处理,用 $N=2m$ 台阶量化($m=1, 2, 3 \dots$),衍射效率 η 为:

$$\eta = [\text{sinc}(1/N)]^2$$

式中: N 为台阶数。当 $N=4, \eta=81\%$; 当 $N=8, \eta=95\%$ 。

(2) 微透镜汇聚到 $\varphi 15.5 \mu\text{m}$ 包围圆能量

据光学设计软件设计,包围圆能量最高为 82% ,取平均为 75% 。

(3) 微透镜镀膜后的透射率

在锗基底上制作微透镜,在 $1.8 \sim 5.3 \mu\text{m}$ 光谱范围,低温 77 K 条件下,考虑锗基底的波长色散性,不镀膜表面反射比高限和低限约为:

$$R_{(\text{高限})} = (1-n)^2 / (1+n)^2 = (1-4.02)^2 / (1+4.02)^2 = 36.19\%$$

$$R_{(\text{低限})} = (1-n)^2 / (1+n)^2 =$$

$$(1-3.94)^2 / (1+3.94)^2 = 35.42\% \quad (5)$$

锗基底微透镜阵列的厚度很薄,仅约为 $20 \mu\text{m}$,在 $1.8 \sim 5.3 \mu\text{m}$ 光谱范围内的吸收损失可忽略。微透镜镀膜后的透射率预期可达 95% 以上,在此取 95% 计算。

(4) 微透镜工艺误差导致的性能下降

标准二元光学加工工艺主要有四种类型的误差:

1) 系统刻蚀误差^[6]

它主要由于水平图形线宽分布不均(如掩模版图形上中间线条宽边缘线条窄)和刻蚀工艺内部因素(离子束分布不均匀)而引起基片刻蚀深度系统地变深或变浅。

2) 随机刻蚀深度误差

它是指器件刻蚀深度随机波动引起的深度误差。这种误差在一定误差范围内各种取值概率是相等的,随机刻蚀深度的最大值约为系统刻蚀误差的 5% 。1) 和 2) 又统称为纵向深度误差或纵向误差。

3) 线宽误差

它是由图形制作过程或转印过程引起的图形线宽与设计线宽偏差。

加工工艺误差导致的性能下降一般不超过 10%，即保留 90%性能。

(5) 中波微透镜与探测器集成后的等效占空比计算：

等效占空比为以上 4 项的乘积： $81\% \times 75\% \times 95\% \times 90\% = 51.94\%$

5 结 论

用满足最小刻蚀线宽要求的设计优化，采用可行的刻蚀方法，完成了微透镜阵列加工，并与探测器阵列对准耦合集成^[7]，并对该耦合探测器的接收电流值进行测试，其值增加了超过 50%，与占空比的计算值相符，用以上建模设计的微透镜和量化过程方法可行。叠层结构探测器叠加微透镜阵列能增强红外探测器的探测灵敏度，提升探测器的性能。

微透镜阵列的设计、加工方法可用于不同的双波长组合，如短波/中波、中波/中波、中波/长波、长波/超长波等多种光谱的红外探测器，也可用于采用纵向集成的多层 HgCdTe 薄膜材料实现多光谱探测的第三代双色碲镉汞焦平面探测器，因此有广泛的应用范围，极具推广价值。

参考文献：

- [1] 中国兵器工业集团第二一一研究所. 双色碲镉汞焦平面探测器结构: 中国, ZL 201418004135.6[P]. 2017-02-15.
- [2] 中国兵器工业集团第二一一研究所. 双色碲镉汞焦平面探测器的微透镜阵列设计方法: 中国, ZL 201418004134.1 [P]. 2017-02-15.
- [3] 金国藩. 《二元光学》[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 刘天山, 韩佩琦, 薛智宏, 等. 微透镜光学性能研究 [J]. 云南大学学报, 2005, 27(S2): 178-180.
- [5] Liu Yuling, Lu Zhenwu, Sun Qiang. Effect of changing design parameters on diffractive microlens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 414-417. (in Chinese)
刘玉玲, 卢振武, 孙强. 设计参数变化对衍射微透镜的影响[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 414-417.
- [6] Dong Xiaochun, Du Chunlei, Chen Bo, et al. The simulation analysis for photolithography process of microlens array [J]. *Micronano Electronic Technology*, 2003, 12: 39-42. (in Chinese)
董小春, 杜春雷, 陈波, 等. 微透镜阵列光刻工艺过程的模拟与分析[J]. 微纳电子技术, 2003, 12: 39-42.
- [7] Du Chunlei, Qiu Chuankai, Deng Qiling, et al. Study on the integrated chip of microlens array with IR detector array [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(1): 1-4. (in Chinese)
杜春雷, 邱传凯, 邓启凌, 等. 微透镜阵列与红外探测器阵列集成芯片的研究[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 1-4.