

文章编号: 1001-3806(2004)02-0186-04

CCD 图像传感器的微透镜阵列设计与实验研究

柯才军¹, 易新建², 赖建军¹

(1. 华中科技大学 光电工程系, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 图像处理与智能控制国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了最大程度地改善 CCD 图像传感器的填充因子, 进行了用于与 CCD 集成的微透镜阵列的光学优化设计, 并与实验结果进行了对比。测试结果表明, 所设计的透镜阵列使 CCD 的填充因子提高 2.9 倍, 相对光谱响应增加了 0.2。所设计的透镜对于改善 CCD 入射信号光的光强分布、提高光利用效率, 从而提高 CCD 的光电性能有显著效果。

关键词: CCD 传感器; 光学设计; 微透镜阵列; 填充因子;

中图分类号: TN202 **文献标识码:** A

Optical design and experiment of microlens array for CCD image sensors

KE Cai-jun¹, YI Xin-jian², LAI Jian-jun¹

(1. Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan 430074, China; 2. National Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: To increase the fill factor of CCD image sensor greatly, the structure of microlens array matched with the CCD is designed and compared with the experimental results. The results show that the microlens integrated with CCD can improve the fill factor of visible CCD by a factor of 2.9 and the relative spectrum response has an increase of 0.2. The design indicates that the microlens array can optimize the intensity contribution and improve the fill factor and the photoelectricity performances of CCD sensors remarkably.

Key words: microlens array; fill factor; CCD image sensor; optical design

引 言

CCD 图像传感器已在军事和民用的许多领域得到了推广应用, 如卫星侦察、精密测距、工业在线检测及微观测量等等。当今 CCD 图像传感器正向高分辨率及灵敏度、高帧度和微型化的趋势发展。但随着像素尺寸和光敏元尺寸的逐渐减小, CCD 的填充因子并没有提高。这样, 其量子效率和探测灵敏度在很大程度上得到了限制。如何在保持 CCD 内部结构不变的情况下, 提高其灵敏度一直是提高 CCD 综合性能的一个关键点, 研究人员也在努力寻求不同的方法^[1~3]。采用 CCD 与微透镜集成来提高 CCD 的填充因子从而提高其灵敏度及信噪比 (SNR) 的方法, 具有工艺简单、成本低廉且效果显著

等优点。另外, 根据光学成像理论, 在弱信号情况下, 如果采用微透镜阵列使填充因子增大, 在维持空间分辨率不变的情况下, 则可采用 F 数 (即 f/D , f 为焦距, D 为孔径) 更小的系统, 这样就可以使光学主镜体积和重量减小。

微透镜阵列的光学结构设计及其光学性能的评价是集成工艺中较为关键的步骤, 本文中针对大面阵、小尺寸微透镜阵列的两种不同的结构形式进行了设计, 对比分析了两种结构的优缺点, 并结合制作的微透镜阵列进行了阐述。

1 微透镜组设计方案

1.1 CCD 结构

所设计的微透镜组主要是应用于与可见光 CCD 集成, 以提高图像传感器的填充因子, 因此, 微透镜的光学结构尺寸必须与 CCD 芯片的平面几何尺寸相匹配, 确保集成系统有最好的光学及电学性能。所用的 CCD 阵列数为 516×516 , 像元尺寸 $22\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$, 光敏元尺寸 $7\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$, 整体为 Φ_1 , Φ_2 和 Φ_3 3 相结构。信号光入射到受光面, 只有光敏区部分产

基金项目: 国家八六三高技术发展计划资助项目 (41321030204)

作者简介: 柯才军 (1976-), 男, 博士, 主要从事激光机电器件的研究。

E-mail: kecaijun76@163.com

收稿日期: 2003-05-27; 收到修改稿日期: 2003-07-28

生光电响应,构成有用信号,而入射到其它区域的信号光被浪费,信号光利用率约 1/3,即填充因子约 1/3。因此,采用微透镜主要是将浪费掉的 2/3 的信号光会聚到光敏感区上加以充分利用,提高其探测灵敏度和信噪比。

1.2 设计方案

对于 CCD 前视光学系统的结构,笔者有以下两种设计方案:(1)单层凸透镜,见图 1a;(2)双层凸透镜,见图 1b。其中光学胶的作用主要是粘合 CCD 芯片和微透镜阵列,以及调整两者之间的间距,使微透镜的焦斑尽可能落在相对应的光敏区的中央位置,其平均折射率约为 1.56。但在实际混合集成工艺过程中,要达到精确控制胶层厚度是很困难的,而且也不必要,只要求落在光敏区上光斑大小较光敏区小就可以满足要求。由于 CCD 的工作波段是在可见光范围,选用熔融石英(SiO_2)作为透镜材料,它在可见光波长范围内具有良好的透射特性(大于 98%),折射率为 1.46。

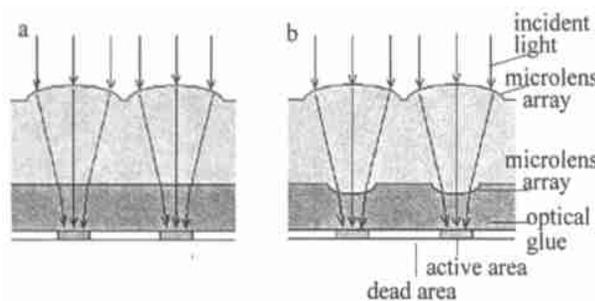


Fig. 1 The integration system of visible CCD and (a) single layer microlens or (b) dual-layer microlens

采用几何光学理论可以计算出各种方案的结构参数,但要进行优化设计则计算过程极其繁琐,且效率低;目前,ZEMAX 软件已逐渐得到推广应用,它提供了大量可供光学系统选用的内置面型,如球面、非球面、ABCD 矩阵面、衍射面、变折射面等^[4,5]。其计算过程方便快捷,而且各参数变化对结果的影响更直观,可以对初步设计的光学结构根据具体要求进行结构优化。

2 光学结构设计

为了最大限度地提高 CCD 的填充因子,微透镜采用方形基底形式,它是采用熔融光刻胶与反应离子刻蚀(RIE)相结合的方法在石英基底上制作而成。当基底尺寸一定时,其冠高尺寸可以通过调整反应离子刻蚀工艺参数来进行控制。笔者光学设计的主要指标是:石英层不能太厚,否则光损耗增加;CCD 位于微透镜后有较大的位置范围;衍射光能量主峰

展宽小,而且主峰能量高;可见光波长范围内有较高的透过率。下面对两种不同的设计分别讨论。

对于方案 1,微透镜的基底设计尺寸为: $21\mu\text{m} \times 21\mu\text{m}$ 。在实际制作过程中,采用的石英片厚度小于 $200\mu\text{m}$ 时,工艺实现较困难,且成品率极低,因此选用厚度为 $200\mu\text{m}$ 的基片,即单个透镜的顶部到石英片背面的距离约 $200\mu\text{m}$,各参数的设计值见表 1。

Table 1 Optical design parameters of single layer microlens/ μm

configuration parameters	value
radius of curvature	80
aperture	21×21
sag	0.69
focus position	58
thickness of quartz	200
freedom of CCD	141

若要求入射在 CCD 光敏元上光斑尺寸大小为 $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$,经计算得 CCD 的可放置位置为微透镜后 $0\mu\text{m} \sim 141\mu\text{m}$ 的长度范围之内,它是从基片背面至光学胶层里的一个较大区域,使得集成工艺有较大的自由度。可以看出,这种方案甚至可以使微透镜与 CCD 光敏元直接接触封装,很大程度上减小了光学胶对微透镜与芯片对准所带来的对准误差,以及光在光学胶中传播带来的光损耗。光学系统的点扩散函数如图 2 所示,可以看出衍射光能量主峰展宽较小,而且主峰能量较高;有一定数量的次峰,总体上

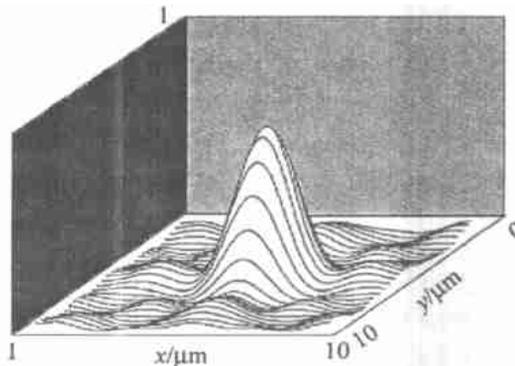


Fig. 2 3-D PSF pattern of single layer microlens system

微透镜有较为理想的点扩散函数和较高的衍射效率。图 3a 和图 3b 中分别是其透过率与波长和光线入射角度之间的关系曲线,其中, s, p 是光偏振态, A 表示平均光强透过率。图 3a 说明在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 光线入射角范围内仍保持大于 96% 的光强透过率。而图 3b 则说明在可见光波长范围 ($0.4\mu\text{m} \sim 0.8\mu\text{m}$),该系统也有大于 96% 的光强透过率。

对于方案 2,选用同样厚度的石英基片,上层微

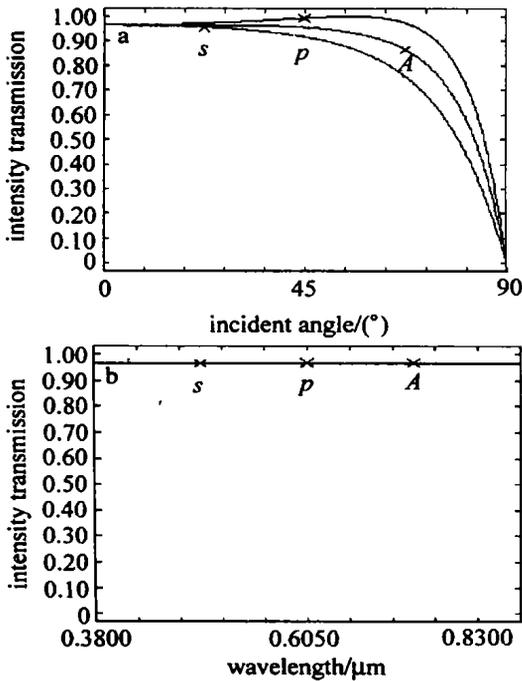


Fig. 3 The relationship between intensity transmission and (a) incident angle of visible light, (b) wavelength for single layer microlens system

透镜的基底尺寸设计为: $21\mu\text{m} \times 21\mu\text{m}$, 下层微透镜的基底尺寸为 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$, 各参数的优化设计值见表 2。该方案的设计思想是增加下层微透镜, 使从

Table 2 Optical design parameters of dual-layer microlens/ μm

configuration parameters	value
curvature radius	first 70
	second 8
aperture	first 21×21
	second 8×8
sag	first 0.79
	second 1.07
focus position (after the plate)	28
thickness of quartz plate	200
freedom of CCD	120

下层微透镜出射光束的焦平面后移, 对集成工艺更加有利。理论上, 当上层微透镜的像方焦点与的物方焦点非常接近甚至重合, 则从下层微透镜出射的光线就是几乎平行的光束, 但实际上这是不可行的, 因为在这种情况下, 入射到下层微透镜上的光斑直径大大超过透镜口径 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$, 光损耗增加。图 4 所示为点扩散函数立体图样, 由图可以看出主峰展宽较方案 1 稍大, 且主峰与次峰能量峰值较低。其透过率与波长和光线入射角度之间的关系分别如图 5a 和图 5b 所示, 由图可以看出当入射角和波长改变时, 其强度透过率也可以保持在 97% 左右的水平。

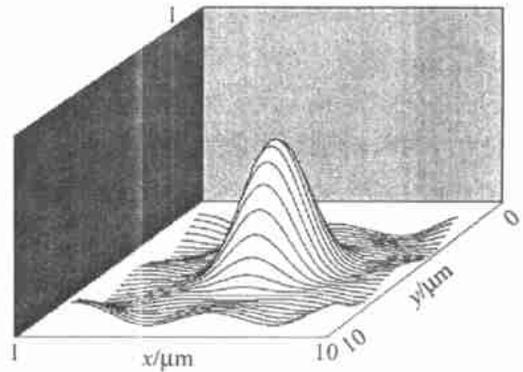


Fig. 4 3-D PSF pattern of dual-layer microlens system

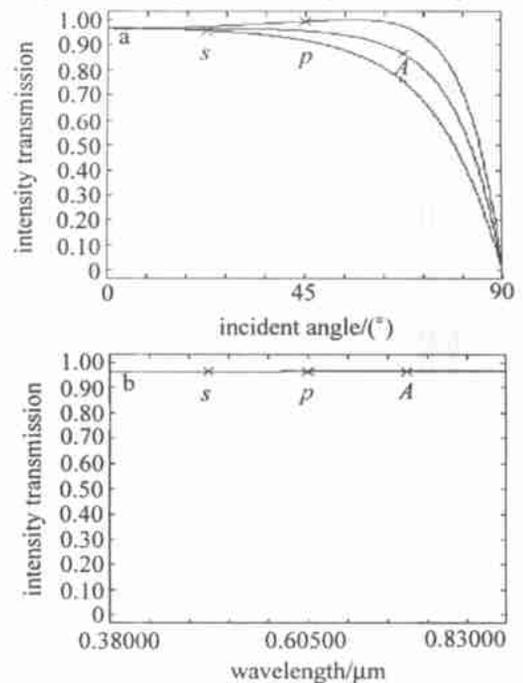


Fig. 5 The relationship between intensity transmission and (a) incident angle of visible light, (b) wavelength for dual-layer microlens system

3 设计结果分析

对比两种方案不难看出, 两者的波长透过率和入射角度透过率相差不大。但方案 1 在某些指标上优于方案 2。如单层微透镜系统的 CCD 位置自由度较双层微透镜系统的稍大, 这点在集成工艺中显得尤为重要, 大的 CCD 位置自由度使得对集成系统精度要求较低, 在相对大的范围内保证较小的光损耗。对于点扩散函数这个反映光学性能优劣的主要指标, 比较图 2 和图 4 可以看出, 方案 1 的峰值光强为 95% 左右, 主峰展宽约 $4\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$; 而方案 2 相应的参数分别为 90% 和 $6\mu\text{m} \sim 7\mu\text{m}$ 。方案 1 的立体图样较方案 2 的更陡直, 说明前者焦平面上的光强更集中。虽然后者的次峰数量较少, 能量较低, 但这对整体效率影响不大。

考虑到实际工艺上的限制,微透镜阵列实际应用中的衍射效率会更低,而双层微透镜在制作工艺步骤上比单层复杂得多。双层微透镜阵列由工艺过程带来的误差,微透镜表面粗糙程度,界面反射以及上下层微透镜之间的对准误差是影响系统光学性能的极为重要的因素。在不必要的条件下,尽量简化工艺步骤是高质量微透镜的保证。而且双层微透镜的制作成本又比单层的高出几乎1倍。

综合以上分析,方案1更适合作为实施方案。

4 微透镜实例

图6是依据上述单层微透镜结构设计参数制作的微透镜阵列 SEM 图片。可以看到微透镜之间间

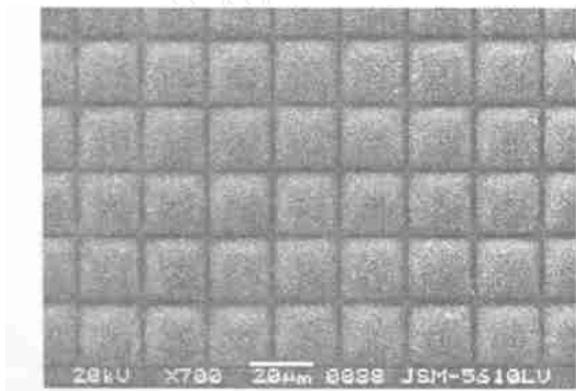


Fig. 6 SEM micrograph of microlens array

隔较小,经测量约为 $1.1\mu\text{m}$ 。采用微透镜前后,CCD 的填充因子分别为 23.1% 和 91.1%,可见采用微透镜阵列后 CCD 填充因子提高了 2.9 倍。图7是阵列点扩散函数测试结果,与理论设计相比较,峰值强度略微减小,这与制作误差,石英衬底产生的光损耗

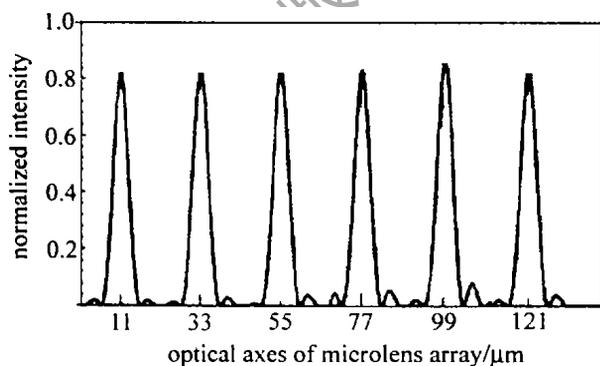


Fig. 7 Point spread function pattern of microlens array

及光在衬底表面的反射有关。为了进一步评价微透镜对集成系统性能的影响,对集成后的 CCD 的光响应特性进行了测试,测试波长范围 $300\text{nm}\sim 1000\text{nm}$,并与没有集成微透镜的 CCD 进行了对比,结果如图8所示。总的看来,采用微透镜阵列使 CCD 的相对光谱响应增加了 0.2 左右。在 550nm 波长附近的增幅较其它地方大,这可能与微透镜材料的光透过率特性及 CCD 传感器本身的光响应特性有关。

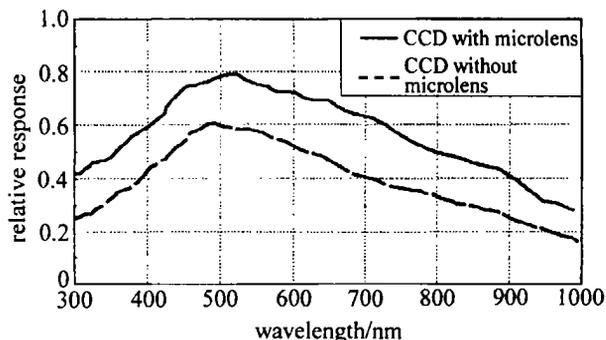


Fig. 8 The optical response curves of CCD with and without microlens array

5 结束语

通过对两种不同结构的 CCD 聚焦光学系统进行了设计和对比,单层微透镜系统较双层微透镜系统有更为理想的点扩散函数和较高的波长透过率,而且工艺上也较易于实现。现阶段 CCD 器件的应用日益广泛,采用本文中所设计的微透镜阵列,成本低、工艺成熟,对于改善 CCD 的填充因子从而提高可见光 CCD 的灵敏度和信噪比有实用意义。

参考文献

- [1] NEGISHI M, YAMADA H, HARADA K *et al.* IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1991, 37(8): 494~500.
- [2] ALHOKAIL H S. Microelectronics, Proceedings of the Tenth International Conference 1998. Tunisia: ICM'98, 1998. 49~52.
- [3] CHEN S H, YI X J, WANG H Ch. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(5): 705~709.
- [4] Focus Software Inc. ZEMAX optical design program user's guide. Version 6.0, Arizona: Focus Software Inc., 1997.
- [5] DESCOUR M R. Opt Engng, 2000, 39(7): 1737~1747.