

# 光刻胶热熔法制备的非球面微透镜的设计方法

刘向阳<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了进一步提高入射到光敏元上的光能, 针对光刻胶热熔法制备的微透镜的非球面面形, 提出了一种结合有限元光线追迹和拉格朗日乘子法的设计方法。给定焦距, 用该算法可以自动计算出所需的微透镜面形。为了验证算法的精度, 对圆形孔径的焦斑均方根半径进行了模拟和理论计算, 二者较为吻合。对三次有限元光线追迹的点列图误差进行了估计。计算了会聚到 320 pixel×256 pixel 背照射紫外焦平面探测器光敏元上的能量集中度, 比较了具有不同圆角半径的方形孔径蓝宝石微透镜的效率。结果表明, 具有 6 μm 圆角半径的方形孔径微透镜的能量集中度较高, 为 96%。

**关键词** 几何光学; 光刻胶热熔; 有限元; 光线追迹; 微透镜阵列; 非球面

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0208001

## Design of Aspheric Microlens Made by Photoresist Reflow Method

Liu Xiangyang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to further improve the light energy collected by the photo-sensitive area, a new design method for the aspheric microlens fabricated by the photoresist reflow method is proposed, which combines finite element ray tracing with the Lagrange multiplier method. Given the focal length, the needed aspheric surfaces can be computed automatically by the proposed method. In order to verify the accuracy of this algorithm, the RMS radius of the focal spot of the microlens with circular aperture is simulated and theoretically calculated, respectively, and both results are consistent. The approximation error of spot diagram of the cubic finite element ray tracing is estimated. The enclosed energy collected by the photo-sensitive area of 320 pixel×256 pixel ultraviolet photodetectors is computed and the efficiencies of microlens with square aperture shapes and different fillet radii are compared. The results show that the square aperture microlens with a 6 μm fillet radius has a relatively high energy concentration with an efficiency of 96%.

**Key words** geometric optics; photoresist reflow; finite element method; ray tracing; microlens array; aspheric surface

**OCIS codes** 080.4225; 350.3950; 040.5160

## 1 引 言

微透镜被广泛用于红外焦平面探测器、发光二极管、垂直腔面发射激光器和内窥镜等研究领域<sup>[1-2]</sup>。在 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 图像传感器中, 微透镜可以提高光敏元的填充因子<sup>[1]</sup>。在红外探测器中<sup>[3]</sup>, 单片集成的微透镜可用于降低光敏元的噪声, 提高焦平面的

信噪比。微透镜可分为衍射式微透镜和折射式微透镜, 其中, 折射式微透镜的制备方法有聚焦离子束法、压印法、激光直写法和光刻胶热熔法等<sup>[4]</sup>。和其他制备方法相比, 光刻胶热熔法具有成本低、容易和微电子工艺兼容的特点, 因而得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。光刻胶热熔法制备微透镜的主要步骤如下: 匀胶、光刻、高温热熔成型、干法刻蚀图形转移。(为了简化表述, 本研究用微透镜专指光刻胶热熔法制备的微

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-09-20; 录用日期: 2018-10-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0406602)

\* E-mail: liuxytry@126.com

透镜)。圆形孔径的微透镜的设计相对简单,但它的最大占空比只有 78.5%。为使光敏元获得高的光能,微透镜的孔径形状可以根据需要设计为正方形和六角形等<sup>[6]</sup>。正方形孔径微透镜可以实现 100% 的占空比,然而方形孔径微透镜的面形轮廓为非球面,表面的曲率半径分布不均匀,焦平面上的点列图呈四花瓣形状,有一部分光线落在光敏元外部,导致光能损失。为了使光敏元上吸收的光能最大化,设计时可对圆形和方形这两种特殊情况进行折中,采用带圆角的方形孔径微透镜,使微透镜面形轮廓既有较高的占空比,又具有较为均匀分布的曲率半径。

对这种异形孔径的微透镜进行光线追迹,需要先对其面形轮廓进行较为准确的计算。目前,文献中方形孔径微透镜面形轮廓的计算方法主要有三种:第一种是简化近似法<sup>[7-9]</sup>,这种方法是将复杂的面形轮廓简化为简单的圆弧,误差较大;第二种是多项式近似法<sup>[10]</sup>,只适用于简单的几何图形;第三种是有限元法(FEM)<sup>[11]</sup>,这种方法可以处理复杂的几何形状。本文对用于紫外探测器的微透镜进行优化设计,采用有限元光线追迹和拉格朗日乘子法相结合的方法对具有不同圆角半径的方形孔径微透镜面形轮廓进行数值计算,比较具有不同孔径形状的微透镜会聚到光敏元上的能量,从而获得优化的微透镜面形轮廓。

## 2 计算方法

### 2.1 非球面面形轮廓的数值计算

表面张力作用下形成的液体表面轮廓的求解是一个经典的数学问题,Schilling 等<sup>[11]</sup>给出了热熔法制备微透镜面形的偏微分方程;Liu 等<sup>[12]</sup>对热熔法制备的方形孔径微透镜的非球面面形进行了有限元计算,并和微透镜的实际轮廓进行了对比,二者较为吻合。然而现实问题通常是对于某一给定的焦距或衬底厚度,要求计算出具有此焦距的微透镜面形及相应的光刻胶体积,这种情况下光刻胶体积为未知量。为此,将有限元光线追迹方法和拉格朗日乘子法相结合,提出了一种迭代算法,将约束条件设定为焦距是某一给定的常数  $L$ ,可以快速地计算出具有此焦距的非球面微透镜的面形。

根据 Schilling 的分析,当光刻胶的直径小于 1 mm 时,重力对光刻胶热熔后的表面轮廓影响较小,可以忽略。320 pixel×256 pixel 背照射日盲紫外焦平面探测器的像元尺寸为几十微米,衬底厚度一般为 100~400 μm,可作以下假设:忽略重力的影

响; $|u_x|$ 、 $|u_y|$  远小于 1,  $u$  为微透镜面形函数;在热熔过程中,光刻胶的体积  $V$  不变;光刻胶和衬底的接触面积固定不变;等离子体干法刻蚀的选择比为常数。在这些假设的前提下,微透镜的表面轮廓由以下方程决定:

$$\Delta u + \lambda \cdot L = 0, u \in \Omega, \quad (1)$$

$$u = 0, u \in \partial\Omega, \quad (2)$$

式中, $\lambda$  为拉格朗日乘子, $\Omega$  为待求解区域, $x$ 、 $y$  为待求解区域上的坐标值, $L$  为给定的透镜焦距。求解的流程图如图 1 所示,其中  $L'$  为将  $\lambda$  设置为某一初始值时对应的微透镜的焦距。

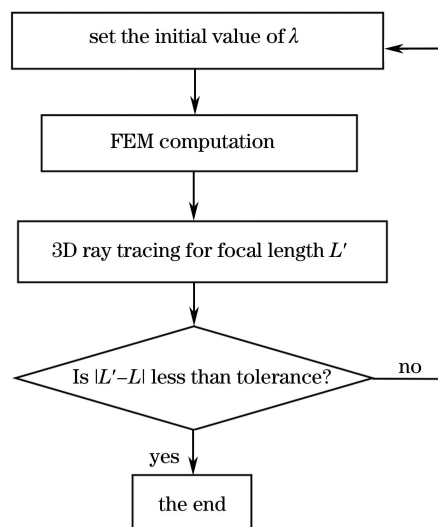


图 1 有限元光线追迹方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of finite element ray tracing method

流程图有限元法数值计算的主要步骤如下。

a) 将待求解的区域划分为三角形或长方形的单元;

b) 在每个单元中,以结点上的未知函数值为待定系数,用多项式来插值表示非结点处的未知函数值,多项式可以是线性或二次等高次多项式。3 结点、6 结点、10 结点有限元单元的插值函数分别为线性、二次、三次多项式,其表达式分别为

$$U_e(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y, \quad (3)$$

$$U_e(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2, \quad (4)$$

$$U_e(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2 + c_7x^3 + c_8xy^2 + c_9yx^2 + c_{10}y^3, \quad (5)$$

式中, $U_e$  为单元上的函数值, $c_1 \sim c_{10}$  为多项式系数。

c) 在每个单元中采用变分原理,以插值多项式为试探函数,对微分方程进行积分,在单元中形成刚度矩阵。最后结合边界条件组成总体刚度矩阵并求解线性方程组,得到结点上的近似解。

对有限元数值计算所得面形进行三维(3D)光线追迹的步骤如下:首先,寻找面形轮廓上和入射光线相交的三角形有限元单元,方法见参考文献[13];其次,求解入射光线和有限单元上插值函数所构成的轮廓的交点 $P$ ,得到该交点及其法向矢量后,根据Snell公式的矢量形式<sup>[14]</sup>得到折射矢量;最后,对 $N$ 根均匀分布的平行入射光线进行光线追迹,得到微透镜的轴上光线密度和焦点及入射光线在焦平面上的点列图和能量集中度。

如果 $|L'-L|$ 小于某个给定的误差,则认为迭代计算结束,否则使用对分法改变 $\lambda$ 的值继续求解。求解结束并获得具有某焦距的微透镜面形轮廓后,可计算出微透镜的体积 $V_{\text{microlens}}$ ,光刻胶的体积的表达式为

$$V_{\text{photoresist}} = \frac{V_{\text{microlens}} \cdot R_{\text{photoresist}}}{R_{\text{substrate}}} \quad (6)$$

式中, $R_{\text{photoresist}}$ 为光刻胶的刻蚀速度, $R_{\text{substrate}}$ 为衬底的刻蚀速度。然后可以用通常的光刻胶热熔法制备微透镜<sup>[5]</sup>。

## 2.2 数值实验

将以上算法应用于实际问题之前,需要对其进行验证。异形孔径微透镜表面轮廓的有限元模型已经验证过<sup>[12]</sup>,现在只要验证有限元近似带来的光线追迹误差,即点列图的误差,即可。下面对圆形孔径和异形孔径这两种情况分别进行验证和误差估计。

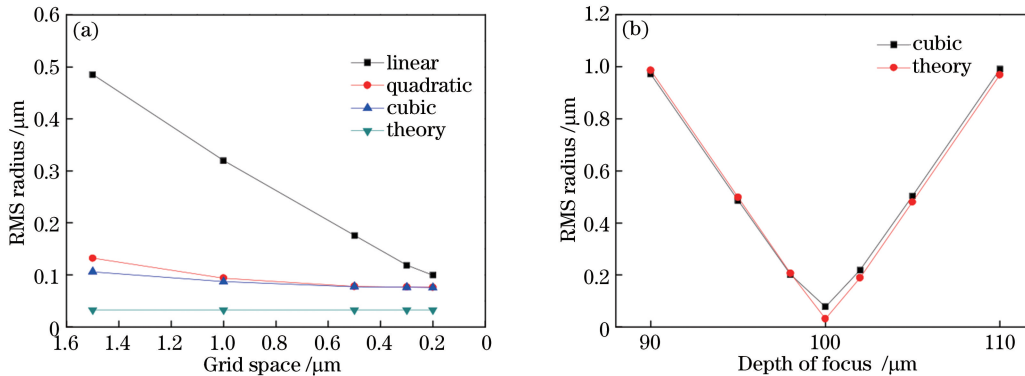


图2 有限元光线追迹算法的验证。(a)线性、二次及三次有限元光线追迹得到的焦斑RMS半径和理论值的比较;(b)透镜后不同焦深处,三次有限元光线追迹得到的焦斑RMS半径和理论值的比较

Fig. 2 Verification of finite element ray tracing method. (a) Comparison of RMS radii obtained by linear, quadratic and cubic finite element ray tracing with theoretical ones; (b) comparison of RMS radii obtained by cubic finite element ray tracing and theoretical ones at different focal depths behind lens

### 2.2.2 异形孔径微透镜点列图的误差估计

由于没有解析表达式来表示非球面面形轮廓<sup>[11]</sup>,所以无法用与2.2.1节相同的方式将点列图的数值计算结果和理论值进行直接比较。根据有限元理论,泊松方程的有限元近似解和真实值之间的

### 2.2.1 圆形孔径微透镜的点列图的验证

对圆形孔径微透镜的面形轮廓进行有限元光线追迹,得到RMS(Root Mean Square)光斑半径的数值计算值,圆形孔径的直径为 $28 \mu\text{m}$ ,焦距为 $100 \mu\text{m}$ ,入射平行光波长为 $0.268 \mu\text{m}$ ,折射系数为1.84。作为验证,忽略衍射效应,对半径为 $47 \mu\text{m}$ 的球面面形进行光线追迹并得到了光斑RMS半径的理论值,圆形孔径直径和焦距及入射波长等参数和有限元光线追迹数值计算中的参数相同。RMS光斑半径的误差来源主要是轮廓的离散误差,因此采用不同网格宽度 $h$ 的线性、二次及三次有限元单元对RMS光斑半径进行计算,结果如图2(a)所示。由图2(a)可知,网格变小时,光斑半径趋于理论值,而且三次有限元单元的计算精度高于线性有限元单元的计算精度。网格宽度 $h$ 为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,三次有限元的RMS光斑半径和理论值在同一数量级,但约为理论值的2倍,原因可能是对圆形边界进行三角形网格划分时,将圆弧近似为直线使求解区域缩小,近似误差偏大。图2(b)是在不同焦深处RMS光斑半径的三次有限元光线追迹计算值和理论值的比较,二者大致吻合。圆形孔径微透镜的焦距表达式为

$$f = n \cdot r / (n - 1), \quad (7)$$

式中, $n$ 为折射率, $r$ 为曲率半径。数值计算得到的圆形孔径微透镜矢高和由(7)式得到的矢高之间的误差为3%。

误差的变化规律为

$$\|\mu - \mu_h\|_0 \leq ch^p, p > 0, \quad (8)$$

式中: $\mu$ 为表面轮廓的真实值; $\mu_h$ 为表面轮廓的近似值; $c$ 为常数; $p$ 为和有限元的阶数有关的常数,代表近似值趋向于真实值的收敛速度。当网格宽度

$h$  趋于零时,非球面面形的有限元解和面形上每点的法向量也将趋向于真实值,从而根据折射定律计算得到的点列图中的每个点也以一定的收敛速度趋向于真实值,因此可以假设点列图误差,即点列图中所有点和其真实值之间距离的均方根  $\bar{H}$ ,仍然具有和(8)式相同的函数形式,即

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [D(A_n, A_{n,h})]^2}{N}} \leq ch^p, p > 0, \quad (9)$$

式中: $A_n$  为点列图上第  $n$  个点的真实位置; $A_{n,h}$  为点列图上第  $n$  个点的近似位置;点列图误差的收敛速度  $p$  为未知量; $D(A_n, A_{n,h})$  为点列图上第  $n$  个点的真实位置和近似位置之间的距离。

令  $h_i$  为第  $i$  次数值实验的网格宽度,当网格宽度由  $h_i$  减小到  $h_{i-1}$  时,点列图上所有点的平均移动距离可表示为

$$\bar{H}' = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [D(A_{n,h_i}, A_{n,h_{i-1}})]^2}{N}}. \quad (10)$$

假设有限元解的误差均取最大值,由(9)式可知点列图上所有点的平均移动距离  $\bar{H}'$  的范围为

$$c(h_i^p - h_{i-1}^p) \leq \bar{H}' \leq c(h_i^p + h_{i-1}^p), p > 0. \quad (11)$$

对圆角半径为  $6 \mu\text{m}$  的方形孔径微透镜的面形轮廓进行了三次有限元光线追迹,入射平行光波长为  $0.268 \mu\text{m}$ ,折射系数为  $1.84$ 。令网格宽度分别为  $0.25, 0.5, 1, 2 \mu\text{m}$ ,得到的点列图如图 3 所示。

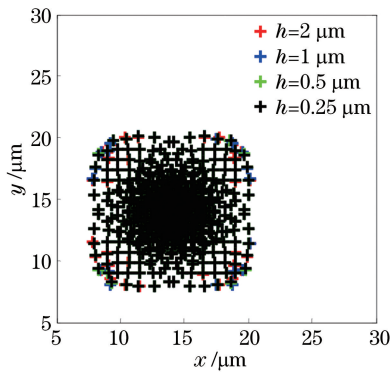


图 3 圆角半径为  $6 \mu\text{m}$  的方形孔径微透镜经三次有限元光线追迹后的点列图

Fig. 3 Spot diagrams of square aperture microlens with fillet radius of  $6 \mu\text{m}$  after cubic finite element ray tracing

网格宽度分别由  $2 \mu\text{m}$  减小到  $1 \mu\text{m}$ 、由  $1 \mu\text{m}$  减小到  $0.5 \mu\text{m}$ 、由  $0.5 \mu\text{m}$  减小到  $0.25 \mu\text{m}$  时,三次有限元光线追迹得到的点列图中点的平均移动距离

$\bar{H}'$  分别为  $0.0377, 0.0232, 0.0092 \mu\text{m}$ 。由图 3 可知,随着网格宽度  $h$  的减小,平均移动距离越来越小。为估计  $c$  和  $p$  的数量级,根据(11)式,以  $\bar{H}' = c(h_i^p - h_{i-1}^p)$  和  $\bar{H}' = c(h_i^p + h_{i-1}^p)$  分别来拟合数值实验中得到的平均移动距离,结果如下: $c$  为  $0.0475$  或  $0.0135, p = 0.88$ ,方程的决定系数  $R^2$  均为  $0.97$ 。综上,根据(11)式所得的理论值和实验数据符合得很好,(9)式所作假设成立。

取  $h = 0.5 \mu\text{m}$ ,由(9)式得到的点列图中所有点和真实值之间距离的均方根  $\bar{H}$  的最大值范围为  $0.0073 \sim 0.0258 \mu\text{m}$ 。将网格宽度  $h$  设置为更小的值并用更大内存的计算机进行计算可以进一步减小点列图的计算误差,而对于微米尺度的光敏元而言,可以认为  $h = 0.5 \mu\text{m}$  时三次有限元光线追迹得到的点列图的误差已足够小,不会影响焦平面上光能分布的计算。

### 3 优化设计

忽略衍射效应,结合  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  背照射日盲紫外焦平面探测器的应用,对紫外微透镜的孔径形状和面形进行优化设计。像元中心距为  $30 \mu\text{m}$ ,光敏元面积为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ ,干法刻蚀沟槽宽度为  $2 \mu\text{m}$ ,焦距为  $100 \mu\text{m}$ ,透镜材料为蓝宝石,入射平行光波长为  $0.268 \mu\text{m}$ ,折射系数  $n_o$  为  $1.84$ 。透镜的孔径形状包括圆角半径分别为  $0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 \mu\text{m}$  的正方形,正方形的边长为  $28 \mu\text{m}$ ,其中圆角半径为  $14 \mu\text{m}$  的正方形为圆形。设置网格宽度  $h$  为  $0.5 \mu\text{m}$ ,经三次有限元光线追迹,焦距为  $100 \mu\text{m}$  的部分微透镜轮廓如图 4 所示。其在焦平面上的相应点列图如图 5 所示。其中圆角半径为  $0 \mu\text{m}$  的方形孔径微透镜的点列图[图 5(a)]和文献[7]的点列图相似。

图 6 所示为由各微透镜会聚到不同边长的正方形光敏元上的能量集中度曲线。由图 6 可知,随着光敏元面积的增加,可收集的最大光能逐渐增加。对于边长为  $15 \mu\text{m}$  的光敏元而言,圆角半径为  $6 \mu\text{m}$  的方形孔径微透镜的能量集中度最高,为  $96\%$ 。当光敏元边长小于  $2.5 \mu\text{m}$  时,圆形微透镜的能量集中度最高。根据此图和不同的光敏元尺寸,可以选择对应的最佳微透镜轮廓,并计算得出相应的光刻胶体积。

### 4 结 论

针对光刻胶热熔法制备的异形孔径非球面微透

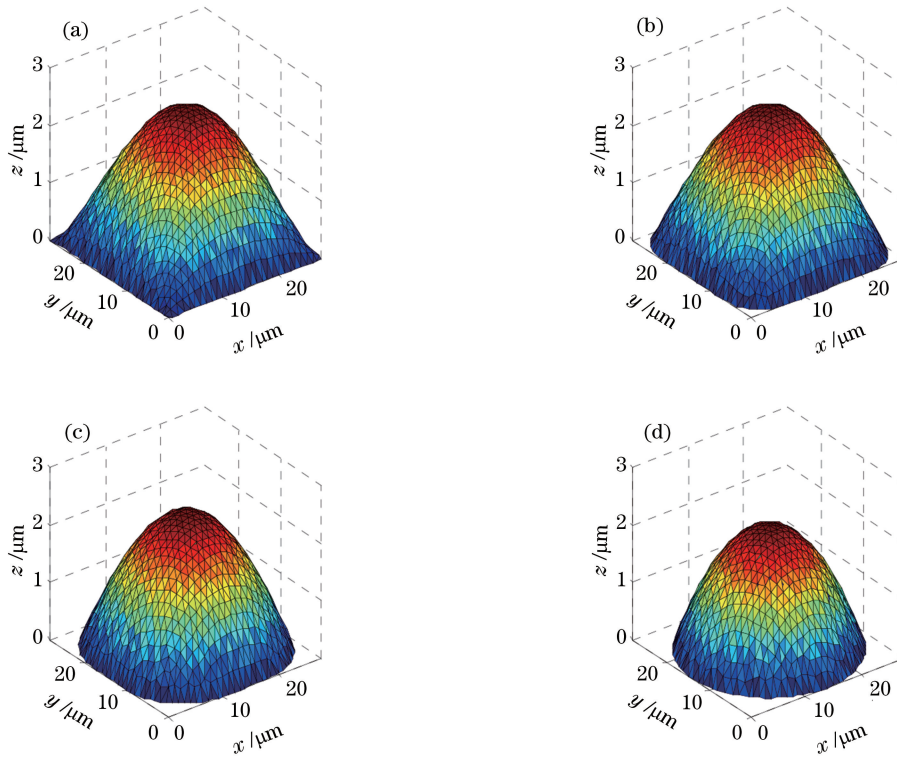


图 4 不同圆角半径的方形孔径微透镜。(a)  $0\ \mu\text{m}$ ; (b)  $6\ \mu\text{m}$ ; (c)  $10\ \mu\text{m}$ ; (d)  $14\ \mu\text{m}$

Fig. 4 Square aperture microlenses with different fillet radii. (a)  $0\ \mu\text{m}$ ; (b)  $6\ \mu\text{m}$ ; (c)  $10\ \mu\text{m}$ ; (d)  $14\ \mu\text{m}$

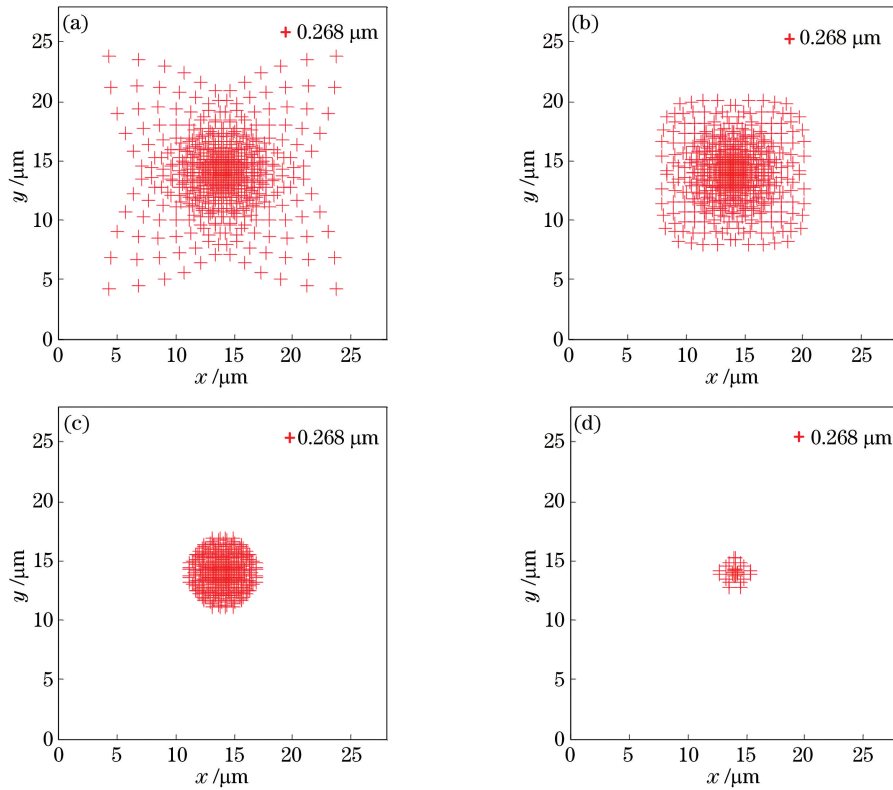


图 5 不同圆角半径的方形孔径微透镜的点列图。(a)  $0\ \mu\text{m}$ ; (b)  $6\ \mu\text{m}$ ; (c)  $10\ \mu\text{m}$ ; (d)  $14\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Spot diagrams of square aperture microlenses with different fillet radii. (a)  $0\ \mu\text{m}$ ; (b)  $6\ \mu\text{m}$ ; (c)  $10\ \mu\text{m}$ ; (d)  $14\ \mu\text{m}$

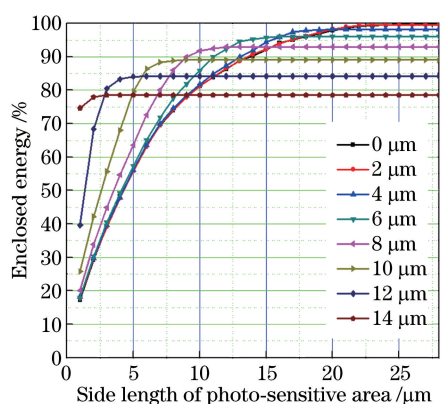


图 6 不同圆角半径的方形孔径微透镜的能量集中度曲线

Fig. 6 Energy concentration curves of square aperture microlenses with different fillet radii

镜,提出了一种结合有限元光线追迹和拉格朗日乘子法的设计方法,用于进一步提高入射到光电探测器光敏元上的光能。对于矢高远小于微透镜的孔径尺寸的情形,采用了迭代算法对微透镜的轮廓进行计算。为了验证以上算法,对圆形孔径球面形进行了光线追迹,验证结果表明,不同焦深处 RMS 光斑半径的三次有限元计算值和理论值基本吻合。对有限元近似引入的点列图的近似误差进行了估计。作为算法的应用,对集成于  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  背照射日盲紫外焦平面探测器的蓝宝石微透镜面形进行了优化设计,比较了焦距为  $100 \mu\text{m}$  的具有不同圆角半径的方形微透镜的能量集中度,结果表明,圆角半径为  $6 \mu\text{m}$  的方形微透镜的能量集中度最高,为  $96\%$ 。

### 参 考 文 献

[1] Bosiers J T, Kleimann A C, van Kuijk H C, *et al.* Frame transfer CCDs for digital still cameras: concept, design, and evaluation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2002, 49(3): 377-386.

[2] Wang D Y, Xue C X, Li C, *et al.* Design of electronic endoscope optical system based on microlens array [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0222003.  
王丹艺, 薛常喜, 李闯, 等. 基于微透镜阵列的电子内窥镜光学系统设计 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222003.

[3] Piotrowski J, Grudzien M, Nowak Z, *et al.* Uncooled photovoltaic  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  LWIR detectors [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4130: 175-185.

[4] Huang J, Zhou W H, Yin W T. Fabrication and evaluation of the CdZnTe microlens arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7658: 76584G.

[5] Ke C J, Yi X J, Lai J J. Research on fused silica microlens arrays with high effective aperture ratio [J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(4): 52-55.  
柯才军, 易新建, 赖建军. 高有效孔径比面阵石英微透镜阵列研究 [J]. 半导体技术, 2004, 29(4): 52-55.

[6] Sun Y J, Leng Y B, Chen Z, *et al.* Square aperture spherical microlens array for infrared focal plane [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(4): 399-403.  
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): 399-403.

[7] He M, Yuan X C, Moh K J, *et al.* Monolithically integrated refractive microlens array to improve imaging quality of an infrared focal plane array [J]. Optical Engineering, 2004, 43(11): 2589-2594.

[8] Fossati C, Gagliano O, Commandre M, *et al.* Microlens design for CMOS image sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5962: 596229.

[9] Nam H H, Park J L, Choi J S, *et al.* The optimization of zero-spaced microlenses for  $2.2 \mu\text{m}$  pixel CMOS image sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652034.

[10] Deguchi M, Maruyama T, Yamasaki F, *et al.* Microlens design using simulation program for CCD image sensor [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1992, 38(3): 583-589.

[11] Schilling A, Merz R, Christian O, *et al.* Surface profiles of reflow microlenses under the influence of surface tension and gravity [J]. Optical Engineering, 2000, 39(8): 2171-2176.

[12] Liu X Y, Liu S J, Qiao H, *et al.* Fabrication and surface profile simulation of sapphire microlens array [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9522: 95221Q.

[13] Ortiz S, Siedlecki D, Remon L *et al.* Three-dimensional ray tracing on Delaunay-based reconstructed surfaces [J]. Applied Optics, 2009, 48(20): 3886-3893.

[14] Simon M C, Echarri R M. Ray tracing formulas for monoaxial optical components: vectorial formulation [J]. Applied Optics, 1986, 25(12): 1935-1939.