

doi:10.3788/gzxb20144308.0823004

变折射率方形孔径平面微透镜阵列 的聚焦和散焦特性

师红燕,周素梅

(西南大学 物理科学与技术学院,重庆 400715)

摘 要:为提高变折射率平面微透镜阵列的填充率,利用光刻工艺和离子交换技术制备了填充率近达 100% 的方形孔径平面微透镜阵列,并对其透镜元及相邻透元间间隙构成的角落区域的成像进行了理论和实验研究.根据变折射率介质光线追迹法,利用 MATLAB 软件模拟,发现在透镜元区域和角落区域成像特性相反.成像系统测试表明:由于透镜元区域和角落区域的折射率分布变化规律不同,透镜元与角落区域对物体分别成倒立实像和正立虚像;透镜阵列可实现聚焦和散焦功能;角落区域得到充分的离子交换使得间隙足够小,形成了从该区域中心向外逐渐增大的新型梯度折射率模型.

关键词:变折射率光学;散焦特性;光线轨迹;平面微透镜阵列;填充率;方形孔径

中图分类号:O435.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)08-0823004-5

Focusing and Defocusing Characteristics of Square-aperture Planar Microlens Array with Gradient Refractive Index

SHI Hong-yan, ZHOU Su-mei

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To improve filling factor of planar microlens arrays, square-aperture planar microlens arrays with good performance was fabricated with photolithography and thermal ion-exchanging technology, their fill factors was 100%. Imaging characteristics of unit lens and region among the four adjacent lens units (be called corner area) of square-aperture planar microlens arrays were analyzed theoretically and experimentally. Imaging characteristics in corner area are reverse to those in focusing element lens, which is showed by ray tracing and MATLAB simulation. Results with image testing system show that a reversed real image of object is formed after the ray passes through unit lens, while an erect virtual image is obtained because of divergent light out from corner area, which is caused by different refractive index distribution in these two areas. Therefore, square-aperture planar microlens arrays achieve the function of focusing and defocusing. Moreover, with enough ion-exchanging time, the uniform refractive index region in the corner area is so little that a new-type gradient refractive distribution is formed which increases gradually out from the center.

Key words: Gradient refractive index optics; Defocusing; Ray track; Planar microlens array; Fill factor; Square aperture

OCIS Codes: 130.3120; 110.2350; 080.3630; 190.4370

0 引言

随着科学技术的发展,微透镜阵列因排列密集、光

性均匀、集成度高等优势成为微小光学领域重要的微型器件.在微电子技术基础上,光学微加工技术快速发展.光刻工艺和离子交换技术因制作过程简单,成本

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2013jcyjA00016)和西南大学科技基金项目(No. SWUB2006034)资助

第一作者:师红燕(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为方形孔径平面微透镜阵列. Email:shyan823@163.com

导师(通讯作者):周素梅(1976-),女,副教授,博士,主要研究方向为微光学及应用,涉及衍射光学、变折射率光学、波前测量、超分辨率等. Email:sumeizhou@163.com

收稿日期:2013-11-08; **录用日期:**2014-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

低,工艺参量稳定且易于控制等特点而成为重要的制备方法之一. 上世纪日本学者 Iga 等采用光刻离子交换法,成功研制出微透镜阵列^[1]. 目前国外研制的微透镜阵列已成功应用于光纤通信、光信息处理、光传感、光数据传输、微光成像系统等领域^[2-4]. 而国内对微透镜阵列的关注和研究虽然起步早,但由于实验设备等硬件条件的限制,取得成果较少. 20 世纪 70 年代,西安光学精密机械研究所采用离子交换法成功制备了自聚焦透镜棒,而后通过机械组合自聚焦透镜棒得到微透镜阵列,并结合光刻技术,于 1989 年制备了圆形孔径平面微透镜阵列^[5]. 为了减少透镜元间间隙引起的漏光损耗,提高平面微透镜阵列的填充率,课题组致力于异形孔径平面微透镜阵列的研究^[6-8],于 2008 年采用光刻离子交换工艺成功研制出异形孔径(包括正方形和正六角形孔径)变折射率平面微透镜阵列^[7-8]. 较传统圆形孔径平面微透镜阵列,不同的是异形孔径平面微透镜阵列相邻透镜元间隙明显减小,填充率约 100%. 因此,异形孔径平面微透镜阵列成为实现高填充系数的有效途径之一,在光信息的会聚、整形、耦合、互连、成像以及无损传输等领域是有重要的应用.

本文从离子交换动力学理论出发,分析了方形交换窗口和排列方式有效提高填充率的本质,并利用 MATLAB 软件进行光线轨迹模拟,通过 CCD 成像测试系统验证了方形孔径平面微透镜阵列填充率提高的可行性,并进一步利用薄片干涉法测量了平面微透镜阵列的折射率. 通过光学测试系统观察其成像特性,揭示并验证了高填充率的方形孔径平面微透镜阵列不仅具有聚焦性能,角落区域还具有发散透镜的特征.

1 离子交换动力学分析

制备平面微透镜阵列过程中,玻璃基片中的部分 Na^+ 离子被熔盐中的 Tl^+ 离子置换,改变了玻璃中离子浓度的分布,形成半旋转椭球的交换区域. Tl^+ 离子沿孔径窗口边界向玻璃内部扩散,因离子交换条件完全一致,距离窗口边界相等位置处的离子浓度相同. 随着离子扩散时间延长,各个方向的扩散不断延伸直至彼此接触,交界处离子浓度差消失,热扩散将不会交叉进行,扩散区域不重叠.

不同的窗口形状会导致平面微透镜阵列表面的离子交换区域形状有明显差异. 图 1(a)为圆形孔径阵列离子扩散示意图,图 1(b)为方形孔径阵列离子扩散示意图. 图 1(a)中,圆形孔径的离子扩散因各向同性而保持对窗口的圆对称. 图 1(b)中,方形孔径因窗口形状缘故,且距离窗口位置等距处的离子浓度相同,交换过程中满足由方形到圆形再到方形的变化规律. 比较图 1(a)、(b)可以发现,当交换时间足够时,方形孔径比圆形孔径透镜元间隙明显减小.

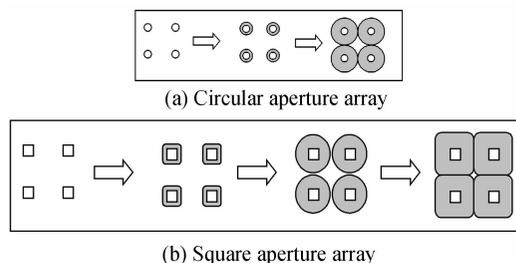


图 1 圆形和方形孔径阵列扩散示意图

Fig. 1 Sketch of diffusion for circular and square aperture array

由图 1(b)可知,当离子交换至透镜元相互接触到最大程度时,以相邻四个透镜元的顶角(假定四个角实验中合为一点)为参考中心,以四个透镜元各角区域部分共同构成梯度折射率区域,其折射率从参考中心向外逐渐变大,从而得到散焦的特性. 方形孔径平面微透镜阵列提高了填充率的同时,在相邻透镜元之间的角落形成与透镜元折射率分布相反的散焦透镜区域,因此,角落区域的散焦性质是在阵列情形下表现出来的一种特性.

2 透镜元与角落区域的光线轨迹及物像关系

2.1 透镜元光线追迹

假设基片足够厚,离子交换时间足够的情况下,透镜元的折射率分布近似为旋转对称模型,其折射率分布表示为^[9]

$$n^2(r_0, z) = n^2(0, 0)(1 - Ar^2 - \nu_{20}Az^2) \quad (1)$$

式中 $n(0, 0)$ 为透镜中心的折射率, r 和 z 分别为径向和轴向坐标.

图 2(a)是透镜元成像原理图,高为 r_1 的物体 OQ 位于平面微透镜阵列入射端面前的 l_1 处,像 $O'Q'$ 位于平面微透镜阵列出射端面后的 l_2 处,高为 r_2 . 折射率分布满足式(1)的透镜光线轨迹方程^[10]为

$$\begin{cases} r = r_0 \cos F(z) + p_0 \frac{1}{\sqrt{An(0)}} \sin F(z) \\ F(z) = \frac{1}{\sqrt{|\nu_{20}|}} \arcsin \frac{n(0, 0) \sqrt{|\nu_{20}|} \sqrt{Az}}{p_z(0)} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $p_z^2(0) = n^2(r_0, 0) - p_0^2$, r_0 为光线入射到透镜表面的位置, z 为光线距透镜表面的距离, p_0 为光线入射时的斜率, $p_z(0)$ 为第三方向光线余弦, \sqrt{A} 为折射率分布常量, ν_{20} 为折射率分布系数矩阵中的系数元, $n(0, 0)$, ν_{20} , \sqrt{A} 均可经实验测得. 为了讨论简便,只讨论平行于光轴入射的光线 a 和斜入射在透镜端面中心轴处的光线 b .

光线 a 满足

$$r_{a0} = r_1, p_{a0} = 0 \quad (3)$$

光线 b 满足

$$r_{b0}=0, p_{b0}=-r_1/l_1 \quad (4)$$

利用 MATLAB 模拟,当 $n(0,0)=1.68, n(r_0,0)=1.5262, A=0.3347, v_{20}=1.334, z=10\text{ mm}, r_1=0.02\text{ mm}, l_1=10\text{ mm}$ 时得到透过透镜元的光线轨迹如图 2(b)所示.由图 2(b)可知,平行入射的光线 a 和斜入射的光线 b 经过透镜元后向透镜中心会聚.两光线从透镜出射后在均匀的玻璃介质中沿直线传播于 Q' 处相交, Q' 即 Q 对应的像点,物距像距以及物高像高之间存在关系: $l_1 \times l_2 < 0, r_1 \times r_2 < 0, r_1 < r_2$,即透镜元成倒立放大的实像.

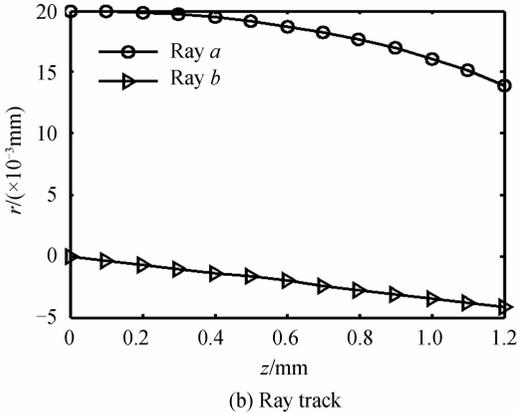
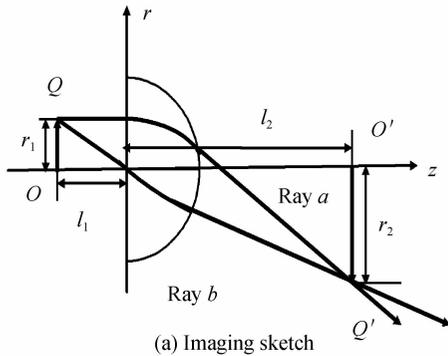
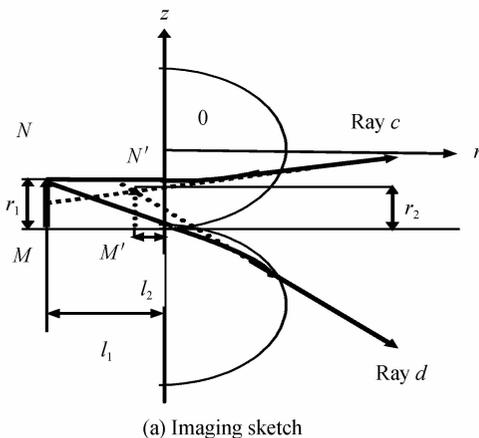


图 2 透镜元成像原理和光线轨迹模拟图

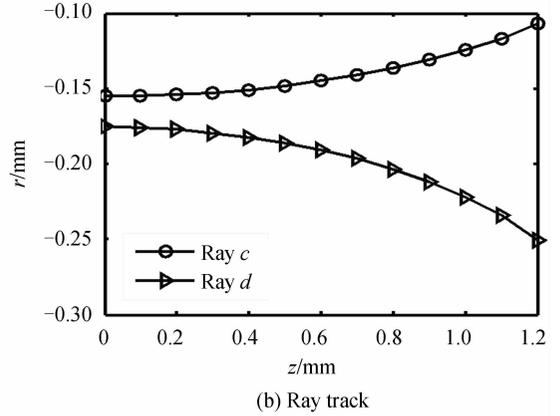
Fig. 2 Imaging sketch and ray track of microlens unit

2.2 角落区域光线追迹

图 3(a)为角落区域成像原理图,高为 r_1 的物体 MN 位于平面微透镜阵列入射端面前的 l_1 处,像 $M'N'$ 位于平面微透镜阵列出射端面后的 l_2 处,高为 r_2 .透



(a) Imaging sketch



(b) Ray track

图 3 角落区域成像原理和光线轨迹模拟图

Fig. 3 Imaging sketch and ray track of corner area

镜元半径设为 D .

光线 c 满足

$$r_{c0}=(D-r_1), p_{c0}=0 \quad (5)$$

光线 d 满足

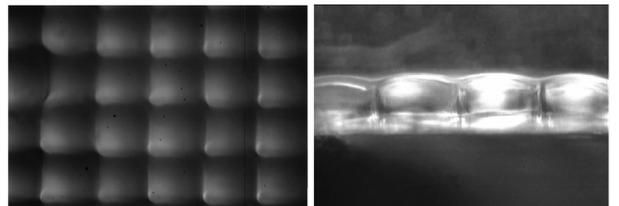
$$r_{d0}=-D, p_{d0}=-r_1/l_1 \quad (6)$$

当 $D=0.175\text{ mm}$ 时模拟相邻透镜元之间角落的光线轨迹如图 3(b).根据图 3(b),光线 c 经过角落区域时向位于上方透镜元的中心汇聚,光线 d 向位于下方透镜元的中心汇聚.两光线从两相邻透镜区域出射后沿直线传播,其反向延长线交于 X' 点, X' 即 X 对应的像点,物距像距以及物高像高之间的关系为 $l_1 \times l_2 > 0, r_1 \times r_2 > 0, r_1 > r_2$,即角落区域成正立缩小的虚像.

3 实验测试与分析

3.1 方形孔径平面微透镜阵列填充情况测试

图 4(a)和图 4(b)分别表示方形孔径平面微透镜阵列表面及剖面交换区域图.从图 4 中可以看出方形孔径平面微透镜阵列中透镜元相互接触,几乎不存在空隙.实验中采用的窗口边长为 0.2 mm ,间距为 0.15 mm 的样品,测得其纵向交换深度为 0.213 mm ,横向交换直径为 0.35 mm ,即离子扩散饱和,玻璃基片表面几乎均为离子交换区域,填充率近达 100% .



(a) Image of surface

(b) Image of section

图 4 方形孔径平面微透镜阵列表面图和侧面图

Fig. 4 Image of microlens array surface and section

3.2 折射率分布测试

采用薄片干涉法^[11]测量方形孔径平面微透镜阵列的折射率分布.首先分别在 $z \approx 0$ 和 $r \approx 0$ 时截取 r 和 z 方向透镜阵列样品进行研磨抛光,得到厚度为

0.11 mm的薄片,将其置于雅明干涉仪光路中,可得方形孔径平面微透镜阵列样品的干涉图样,如图5.图5(a)表示方形孔径平面微透镜阵列 r 方向薄片干涉图样,图5(b)表示方形孔径平面微透镜阵列 z 方向薄片干涉图样.根据干涉图样,可以模拟得到透镜元的折射率分布图,模拟曲线如图5(c).图中 r 和 z 分别是柱坐标下的径向坐标和轴向坐标.

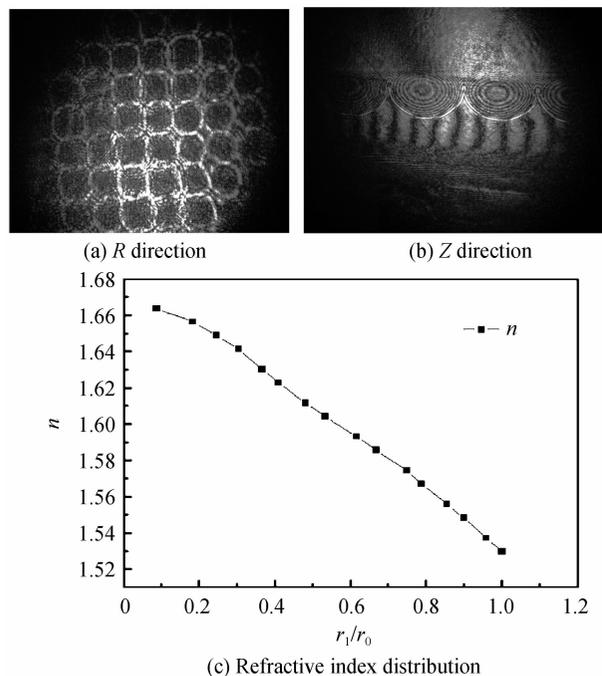


图5 干涉图样和折射率分布图

Fig. 5 Interference pattern and refractive index distribution

由图5可知,透镜元的折射率在透镜元孔径中心处最大,沿着 r 方向逐渐减小至透镜边缘位置处,满足聚焦透镜特点.实验证明,其折射率分布是旋转椭球状^[12-13].此外,在离子交换时间足够的情况下,方形孔径平面微透镜阵列中相邻透镜元之间间隙极小,角落区域的折射率满足渐变规律,且从角落区域中心向外逐渐增大,满足自散焦特点.

3.3 成像测试

采用光学成像系统测试平面微透镜阵列的成像特性,原理如图6.从光源发出的光照射字母A后经过变折射率平面微透镜阵列,字母A成像 A' ,借助于CCD传感器在计算机上显示像 A'' .将物A置于微透镜一侧,通过调节显微镜与平面微透镜阵列(Planar Microlens Array, PMA)的间距 L ,在计算机显示器上

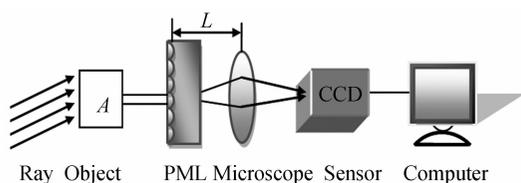
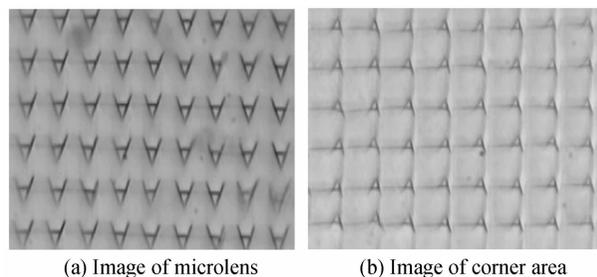


图6 光学测试系统

Fig. 6 Sketch of optical testing system

获得清晰的像,如图7(a).继续调节 L 使之减小,获得清晰且不同于前者的像如图7(b).



(a) Image of microlens

(b) Image of corner area

图7 透镜元和角落区域成像照片

Fig. 7 Image of microlens and corner area

由图7得知,透镜元成倒立放大的实像,角落区域成正立缩小的虚像,与光线追迹结果一致.

此外,在实验中,计算机屏幕获得透镜元所成像后,减小 L ,角落区域所成的像方可获得.结合光线追迹结果分析得知,光线经透镜元折射后会聚,如图2(a),于透镜右侧成像,如图2(b),而光线经角落区域折射后发散,如图3(a),发散后的光线反向延长交于透镜左侧,于透镜左侧成像,如图3(b).减小 L ,使得像 A' 与显微镜之间的距离保持不变,便可在计算机屏幕中获得清晰的像 A'' .实验与模拟一致.

总之,方形孔径平面微透镜阵列的聚焦和散焦特性是基于单个透镜元和透镜阵列两种情况下实现的.考虑单个透镜元,透镜的聚焦区域以透镜元中心(交换窗口中心)为参考中心,折射率分布向透镜元边缘呈梯度变化(从大变小);对透镜阵列来说,角落区域以相邻四个透镜元的顶角为中心,以四个透镜元各贡献一部分区域构成散焦区域,其折射率从顶点参考点向外变化与透镜元相反(从小变大),从而得到聚焦和散焦的特性.

4 结论

研究表明,方形孔径平面微透镜阵列比传统圆形孔径平面微透镜阵列具有更高的填充率,相邻透镜元之间的空隙明显减小,光信息传输的漏失有效降低.此外,相邻透镜元间的角落区域形成了新型变折射率区域,可以成正立、缩小的虚像,与透镜区域成倒立、放大的实像相反,即实现了散焦功能.变折射率方形孔径平面微透镜阵列因其阵列的特殊性可以聚焦和散焦的特性,为异形孔径变折射率平面微透镜阵列的应用提供了新方向.

参考文献

- [1] IGA K, MISAWA S. Distributed-index planar microlens and stacked planar optics: a review of progress [J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(19): 3388-3396.
- [2] UREY H, POWELL K D. Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(23): 4930-4936.

- [3] SON J Y, SAVELJEV V V, KIM J S, *et al.* Viewing zones in three-dimensional imaging systems based on lenticular, parallax-barrier, and microlens-array plates [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(26): 4985-4992.
- [4] LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, *et al.* Research on micro-Lens coupling system of all-fiber raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 8-13.
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 全光纤拉曼激光雷达的微透镜耦合系统研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(6):8-13.
- [5] LIU De-sen, MEI Suo-hai. A study on spherical self-focusing planar microlens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(6): 533-539.
刘德森, 梅锁海. 球形自聚焦平面微透镜阵列研究[J]. 光学学报, 1992, **12**(6):533-539.
- [6] ZHANG Feng-jun, ZHOU Su-mei, JIANG Xiao-Ping, *et al.* Fabrication of planar square aperture microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(sup.2): 202-203.
张凤军, 周素梅, 蒋小平, 等. 平面方形孔径微透镜阵列的制备[J]. 光子学报, 2008, **37**(sup.2):202-203.
- [7] JIANG Xiao-ping, LIU De-sen. Ion-diffusion characteristics of two kinds of planar GRIN microlens arrays with high fill-factor and different aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **4**(33): 140-145.
蒋小平, 刘德森. 两种开孔的高填充率 GRIN 平面微透镜阵列离子扩散特性[J]. 光学学报, 2013, **4**(33):140-145.
- [8] JIANG Xiao-ping, LIU De-sen. Fabrication of gradient refractive index hexagonal aperture planar microlens array based on spherical substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1792-1795.
蒋小平, 刘德森. 变折射率球面六角形孔径平面微透镜阵列[J]. 光学学报, 2010, **30**(6):1792-1795.
- [9] LIU De-sen, HU Jian-ming, LIU Xiao-dong, *et al.* Studies on the optical properties of microlens array for planar intersect glasses waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 782-785.
刘德森, 胡建明, 刘晓东, 等. 平面交叉玻璃波导型微透镜阵列光学性能研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(7):782-785.
- [10] 刘德森. 变折射率介质理论及其技术实践[M]. 重庆:西南大学出版社, 2005.
- [11] CHEN Zou-sheng, GAO Ying-jun. The measurement of index profile in gradient index rod by wedge sample method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(7): 593-599.
陈邹生, 高应俊. 用楔形薄片法测量自聚焦棒折射率分布[J]. 光学学报, 1984, **4**(7):593-599.
- [12] JACQUES D, PETER D, PETER S, *et al.* Artificial apposition compound eye fabricated by micro-optics technology[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(22): 4303-4310.
- [13] RADTKE D, DUPARRE J, ZEITNER U D, *et al.* Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6): 3067-3077.