

变折射率透镜的研究和发展现状

刘德森

(中国科学院西安光学精密机械研究所)

变折射率介质是折射率按一定规律变化的介质,又称为非均匀介质、梯度折射率介质或渐变折射率介质。这种介质在自然界普遍存在。早在公元100年,就有人研究大气层(非均匀介质)的折射现象。在光学系统中,麦克斯韦在1854年首先设计了折射率对某点呈球对称的“鱼眼”透镜。1905年,伍德设计了一个折射率和径向距离有关的伍德透镜。但由于制作工艺没有解决,因而变折射率透镜发展十分缓慢。

1968年,日本北野一郎等人^[1]首先采用离子交换工艺制成变折射率透镜,称为自聚焦透镜。此后,人们对这领域的理论、制作工艺、测试、光学设计、加工、器件等方面作了较深入研究,逐渐形成一门新学科——变折射率光学。

近来,对变折射率透镜的研究主要集中在提高其光学性能和开拓应用两个方面,本文将对这些问题进行讨论。

一、折射率分布

常见的变折射率介质的折射率分布有三种类型^[2]:

1. 球向变折射率分布

其特点是折射率分布对某点呈球对称,折射率沿径向变化。“鱼眼”透镜就是一例。

2. 轴向变折射率分布

其特点是折射率分布对某一平面(和表面平行)呈面对称,折射率沿离开这平面的距离作梯度变化。

3. 径向变折射率分布

其特点是折射率分布对中心轴对称,折射率沿径向梯度变化。自聚焦透镜就属这一类。

变折射率透镜中的折射率分布可从光线方程或扩散方程得到,其结果是

$$n(r) = n(0) \left[1 - \frac{1}{2} (gr)^2 + H_4(gr)^4 + H_6(gr)^6 + \dots \right] \quad (1)$$

或

$$n^2(r) = n^2(0) [1 - (gr)^2 + h_4(gr)^4 + h_6(gr)^6 + \dots], \quad (2)$$

这里 $n(0)$ 和 $n(r)$ 分别为轴中心和离轴 r 处的折射率, g 为聚集常数, $H_4(h_4)$ 和 $H_6(h_6)$ 分别为折射率分布的四阶和六阶系数。为使径向变折射率透镜很好地聚光,折射率分布应满足理想分布,即

$$n^2(r) = n^2(0) \operatorname{sech}^2(gr). \quad (3)$$

这时, (2) 式中系数取值为 $h_4 = 2/3$, $h_6 = -19/45$ 。如果令 $g = g'$, $h_4 = 1/4$, $h_6 = 0$, (2) 式变成

$$n(r) = n(0) \left(1 - \frac{1}{2} Ar^2 \right), \quad (4)$$

即抛物线分布。这里, $\sqrt{A} = g'$ 和 g 略有不同,因此抛物线分布不是理想分布。对聚焦透镜来说, $\sqrt{A} < g$, 象有枕形畸变,是正象差; $\sqrt{A} > g$, 象有桶形畸变,是负象差。

折射率分布是一个基本参量,对它进行测量是一项重要工作。其测量的方法有^[3]: 平行薄片干涉法、反射法、近场光强分布法、散射法、背向散射法、横向干涉法、横向微分干涉法、会聚法、三角掩蔽法、全息干涉法等。我们进行了平行薄片干涉法和横向干涉法研究,还提出了楔形薄片干涉法^[4]。图1给出了我们研制的 T-1 型自聚焦棒透镜的干涉照片。

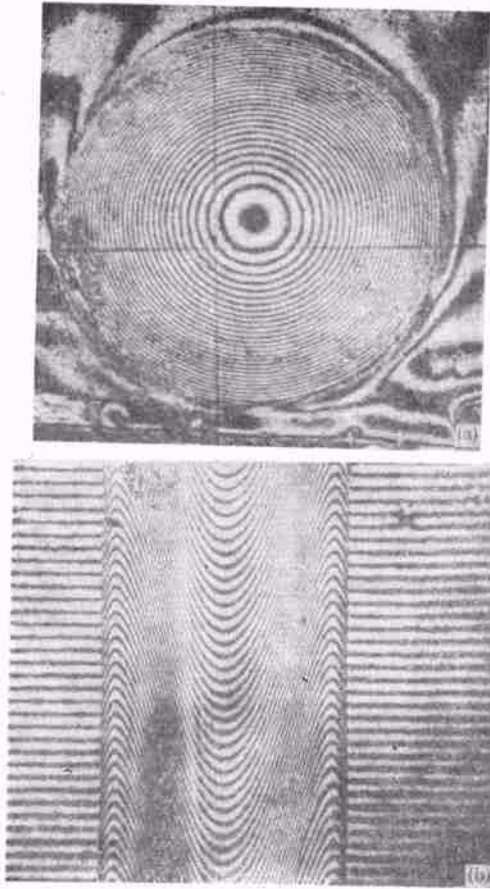


图1 T-1型自聚焦透镜的干涉照片
(a)平行薄片干涉法; (b)横向干涉法

二、光线轨迹和成像特性

光线轨迹和成像特性研究至今仍是理论工作一个重要研究课题。

由于光线在变折射率透镜中的轨迹为曲线,因而追迹光线轨迹较复杂。近来,报道了几种有效的光线追迹方法^[5],如欧拉法、哈密顿法、泰勒级数展开法等,还成功地利用电子计算机完成复杂的数学运算。

在圆柱坐标系中,光线方程是

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n. \quad (5)$$

在球向变折射率分布介质中,从(5)式可得

$$x = r \left(\alpha \frac{x_0}{r_0} + \beta \frac{p_0}{n_0} \right),$$

$$y = r \left(\alpha \frac{y_0}{r_0} + \beta \frac{q_0}{n_0} \right), \quad (6)$$

$$z = r \left(\alpha \frac{z_0}{r_0} + \beta \frac{l_0}{n_0} \right),$$

这里 $\alpha = \sin \theta / \sin \varphi_0$, $\beta = \cos \theta - \cos \varphi_0$, r_0 (x_0, y_0, z_0) 为光线入射点的向径, r 为光线轨迹上任一点的向径, p_0, q_0, l_0 为 r_0 处光线的方向余弦, φ_0 为 r_0 处光线方向与径向所成之角, θ 有如下关系:

$$\theta = \theta_0 + c \int_{r_0}^r \frac{dr}{r(n^2 r^2 - c)^{\frac{1}{2}}},$$

其中 $c = \pm nr \sin \varphi$, 为球向变折射率介质的斯涅耳定律。

在轴向变折射率分布介质中,可从光线方程得到光线轨迹:

$$x = x_0 + \int_{x_0}^x \frac{p_0}{(n^2 - p_0^2 - q_0^2)^{\frac{1}{2}}} dx, \quad (7)$$

$$y = y_0 + \int_{x_0}^x \frac{q_0}{(n^2 - p_0^2 - q_0^2)^{\frac{1}{2}}} dx,$$

这里 $p_0 = n_0 \cos \alpha_0$, $q_0 = n_0 \cos \beta_0$, $r_0(x_0, y_0, z_0)$ 为光线入射点坐标。

在径向变折射率分布介质中,有如下两种形式的光线轨迹方程:

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \dot{r}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}z) & \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \sin(\sqrt{A}z) \\ -n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}z) & \cos(\sqrt{A}z) \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} r_1 \\ \dot{r}_1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中“ \cdot ”表示对变量 z 的微分。从上式可知,光线轨迹为正弦曲线。图2给出了自聚焦透镜的折射率分布和光线轨迹。

$$z = \int_{r_0}^r \frac{dr}{\left[\frac{n^2(r)}{n^2(r_0) \cos^2 \theta_0} - 1 - \text{tg}^2 \theta_0 \sin^2 \phi_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

这里 r_0 为入射点坐标, θ_0 和 θ_0 为折射角和入射角, ϕ_0 为入射面与轴的夹角。对于抛物线折射率分布介质,

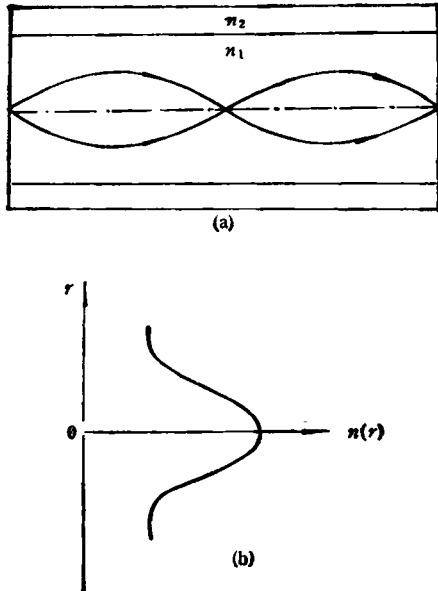


图2 (a)自聚焦透镜的光线轨迹;
(b)自聚焦透镜的折射率分布

$$z = \frac{2\pi na}{\sqrt{2}\Delta} \cos \theta_n; \quad (10)$$

对于理想分布介质,有

$$z = \frac{2\pi}{g} n, \quad (11)$$

这里 n 为正整数, $\Delta \approx \frac{n(0) - n(a)}{n(0)}$ 为轴中心与周边的相对折射率之差. 从(10)和(11)式可知,抛物线介质中光线的周期 z 与折射角 θ_n 有关,因而不能很好聚焦. 在理想介质中,由于周期与折射角、入射面对轴的取向无关,因而子午光线可以聚焦于一点.

三、变折射率透镜的象差

象差分析与象差校正是一个重要研究课题. 由于变折射率分布的对称性,在近轴近似下可以用高斯光学处理象差. 近来,采用光线追迹方法研究象差发展很快,不少作者研究了变折射率透镜的三级象差、五级象差和更高级的象差.

在聚焦透镜进行光线追迹时发现^[6],所有

物理

子午光线交于一点,不存在球差. 对于 $g=0.3$, $h_4 = h_6 = 0$ 的抛物线折射率分布透镜,所有子午光线并不交于一点,近轴光线和轴的交点在焦点外,是正球差,远轴光线和轴的交点在焦点内,是负球差.

畸变与球差有关. 测量指出,如果折射率分布在边部低于理想分布,则呈负球差并有桶形畸变;折射率分布在中间区域高于理想分布,则呈正球差并有枕形畸变. 聚焦透镜长度越小,畸变随 h_4 变化的速率越大. 当折射率分布满足理想分布时,可得最小畸变. 有时,球差为零,但仍存在畸变.

如果变折射率透镜成象不满足正弦条件,就出现彗差. 如将端面加工成球面,彗差就能减小.

此外,变折射率透镜还存在场曲和波象差. 现在,用波象差评价变折射率透镜的成象质量是一种较好方法.

在研究象差基础上,已有不少变折射率透镜光学设计的例子,如准直透镜、斯密特校正板、摄影物镜、显微物镜、望远物镜、复印机排镜头和内窥镜等,特别是 D. C. Leiner^[7]提出的广角消色差变折射率内窥镜设计. L.G. Atkinson^[8]利用两片变折射率透镜代替六组元照相机物镜的设计也是很有意义的. 为了消色差,研制具有反常色散的变折射率材料是大家关心的问题.

四、变折射率透镜工艺研究

在材料中形成折射率梯度的方法主要有^[9]以下几种:

离子交换法: 这是发展最早、最基本的方法. 它是利用玻璃和熔盐中极性离子之间的热扩散交换,而在玻璃中形成极性离子的浓度梯度,从而形成折射率梯度. 折射率分布主要由以下因素确定: (1)边界条件; (2)内扩散系数; (3)交换温度和时间. 实验证明,外加电场可以促进离子的扩散交换,缩短交换时间,而且还有可能控制折射率分布^[10]. 这是目前发展很快的

表 1

项目 型号	数值 孔径 NA	全视 场 2θ	中心折 射率 n_0	直径 (mm)	二阶系数 \sqrt{A} (mm^{-1})	四分之 一周期 长度 (mm)	备 注
T-1	0.37	43°	1.5722	1.0	0.5193	3.02	表中数据多数是在白光或 $0.6328\mu\text{m}$ 波长下测量的,个别数值是理论数据
				1.5	0.3403	4.54	
				1.8	0.2886	5.44	
				2.0	0.2599	6.05	
				3.0	0.1732	9.07	
L-1	0.15	18°	1.5336	1.0	0.1942	8.09	
				1.5	0.1258	12.13	
				1.8	0.1079	14.56	
				2.0	0.0971	16.18	
				3.0	0.0647	24.29	

一种改进的离子交换方法。我们研究了熔盐中极性离子浓度变化对扩散系数的影响,得到了二者之间的近似关系。表 1 给出我们研制的自聚焦透镜的性能。

热扩散共聚法(两步共聚法)^[11]是制作塑料变折射率透镜的方法。最近, Y. Ohtsuka^[12]利用该方法研制成功了球向变折射率塑料透镜,引起不少学者关注。

光刻-离子交换法(或光刻-扩散共聚法)^[13]是将集成光学的平面工艺和离子交换技术相结合的一种新技术,可用它制作分布型平面微透镜。此外,电子束平板印刷术^[14]和质子交换法^[15]也是这类新技术的两种新工艺。

制作变折射率透镜的方法还有离子填充法、气相沉积法、晶体生长法、光敏共聚法和中子照射法等。

五、变折射率透镜的典型应用

凡是用微型透镜及其组件进行聚焦、成像、分路、传输图象的光学领域称为微型光学。用微型透镜作成的光学仪器体积小、重量轻、易安装调节、使用方便,可以明显地改善光学仪器的性能。

1. 在微光系统中的应用

(1) 聚光系统

其使用的典型结构模式是: 光源-聚焦透

镜-光纤(或接收器)。这在光纤通信和光纤传感器中应用十分普遍。目前研究最多的是如何提高耦合效率。北野一郎^[16]详细讨论了利用一个平凸聚焦透镜,以实现激光二极管到单模光纤有最低耦合损耗的可能性。本文作者分析了影响聚焦透镜耦合效率的诸因素,研究了聚焦透镜最佳工作距离的选择准则,得到了工作距离 l_1 与有效数值孔径 NA_* 、聚焦透镜放大倍率 M 和光纤的数值孔径 NA_* 的数学关系。在实际使用时,要根据条件全面权衡这三个制约因素,才可能选择最佳工作距离 l_1 ,得到最大的耦合效率。

聚光系统中最使人感兴趣的是利用变折射率透镜可以将条形激光变成很小的光点,再输入到光纤中并有很高的耦合效率。

(2) 准直系统

由于光线在聚焦透镜中的轨迹为正弦曲线,当光源位于端面轴上时,在聚焦透镜的 $1/4$ 周期处,光线平行出射,在聚焦透镜的 $1/2$ 周期处,光线在轴上聚焦。在准直系统中,通常采用 $1/4$ 周期的聚焦透镜。

大多数微光器件,如方向耦合器、星形耦合器、合波器、分波器、波分复用器、光开关、连接器、衰减器和光学互易器件等使用聚焦透镜的原理都是基于它的准直特性。典型结构形式是: 光纤-聚焦透镜-有关元件-聚焦透镜-光纤。在很多微光器件中,利用了聚焦透镜的离轴输入和离轴输出特性,但离轴距离越大,插入损耗也就越大。

2. 透镜阵列

变折射率透镜阵列的性能与单透镜不同。当变折射率透镜阵列中透镜长度 z 位于 $\pi/\sqrt{A} < z < 3\pi/2\sqrt{A}$ 时,主点位于透镜端面之外,并成为共轭点,可提供正立的、放大倍率为 1 的实象。对于排成 N 排的透镜阵列,每个变折射率透镜的象在象面上重叠,形成一个强度增加的均匀亮象。重叠度 m 与变折射率透镜的特性有如下关系:

$$m = \frac{1}{2} \sec \left(\frac{1}{2} \sqrt{A} z \right).$$

变折射率透镜排(二排以上)可在复印机中使用。这时文件通过由 N 排变折射率透镜组成的阵列,对在工作距离处形成的狭缝

$$2x_{mN} = 2x_m + \sqrt{3}r_0(N-1)$$

进行扫描。这里, r_0 为聚焦透镜半径, x_m 为聚焦透镜在工作距离的视场半径。 N 排变折射率透镜阵列的 F 数是

$$\left(\frac{1}{F_N}\right)^2 = \frac{2\pi N}{3} \frac{m^2}{\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(N-1) + 2m\right]} \times \left(\frac{1}{F_0}\right)^2$$

利用 N ($>$ 几百)排聚焦透镜制作的聚焦透镜板,可以在网格高速摄影机中使用。

3. 物镜系统

由于变折射率透镜的折射率是非均匀的,因而增加了校正象差的自由度。如利用控制折射率分布的各阶系数,就可以很好地校正球差、场曲和色差,因而在望远镜、照相机的物镜设计中采用变折射率透镜后,可以提高成象质量而又可使结构简单、体积缩小、重量减轻。例如,1982年L. G. Atkinson^[6]用二片变折射率透镜设计了一个照相机物镜,焦距 $f = 10\text{mm}$,全视场 $2 \times 21.8^\circ$,相对孔径1:2,其传递函数与六片的双高斯照相物镜相似。1983年,J. D. Foret^[7]设计了一个由两片变折射率透镜组成的显微目镜系统,焦距 $f = 21.4\text{mm}$,全视场增加到 50° ,放大倍率 $10\times$,并可改善三级象差、色差和畸变。1984年,D. T. Moore利用二组元和三组元变折射率透镜设计了一个广角照相物镜系统,其成象特性接近六组元的普通透镜作成的广角照相物镜。

4. 微型内窥镜

一般的内窥镜传象部分采用光纤传象束(柔性)或透镜波导(硬性),但针管直径较粗,分辨率较低。利用低色差长聚焦透镜作成的硬性内窥镜,直径小于 1.7mm ,分辨率很高,而且色差很小,受到大家重视。目前国外有商品出售,我国正开展这方面的研究工作。

5. 光盘拾光系统

1985年,M. Toyama^[18]报道了用变折射率透镜做成的光盘拾光系统。该系统的性能指标是: $NA = 0.45$,工作波长 $\lambda = 0.78\mu\text{m}$,工作距离 1.85mm ,外径 $D = 4\text{mm}$,光阑直径 3.2mm ,曲率半径 $R_1 = 2.7\text{mm}$, $R_2 \rightarrow \infty$,厚度 1.6mm ,重 50mg ,轴上点波差 0.03λ ,轴外点波差 0.07λ ,最大折射率差 0.09 。

六、变折射率透镜的研究动向

1. 分布型折射率平面微透镜 (distributed index planar microlens)。这种平面微透镜是在1981年首先由K. Iga制成。它目前的性能数据是^[9]:基板折射率 $n_0 = 1.537$, $\Delta n = 0.27$, $NA_{\text{max}} = 0.3$, $NA_{\text{min}} = 0.4$, $f = 2.6\text{mm}$;两片叠加后, $NA_{\text{max}} = 0.54$, $NA_{\text{min}} = 0.7$, $f = 1.76\text{mm}$ 。

平面微透镜的特点是:(1)排列规则,直径小,光性均匀;(2)表面为平面,易于和其它平面元件耦合;(3)单片堆积成具有不同功能的堆积平面微透镜元件;(4)便于批量生产。平面微透镜可用于光纤通信、光电子线路系统,预料在光计算机中将有重要应用。

2. 集成光学元件

集成光学元件和微光元件的区别在于微光元件的组元是分立块状元件,尺寸为 $1-10\text{mm}$,用机械方法构成阵列,而集成光学元件是集成平面型,尺寸为 $0.01-0.1\text{mm}$,由很多元件集成单片。随着制作工艺的提高,一些变折射率元件的尺寸越来越小,而且可能作成平面变折射率透镜,因而变折射率透镜一旦进入集成光学领域,微光学与集成光学的界限就变模糊了。

(1)掩埋型变折射率波导:1985年,E. Okuda利用加外场的光刻离子交换工艺制作了接近圆截面的掩埋型变折射率波导,并作成 4×4 星形耦合器,插入损耗和连接损耗都很低。

(2)菲涅耳透镜和布喇格光栅透镜:前者接受角大,后者衍射效率高,方向和波长选择性

好,适宜作准直和扩束使用。

3. 轴向和球向变折射率透镜

近来,用塑料制成轴向和球向变折射率透镜的工作受到学者们的关注,发展很快。

4. 提高数值孔径

解决的途径是:(1)改善玻璃组分,选择合适的交换离子对;(2)改进离子交换工艺;(3)将聚焦透镜端面作成球面。目前,在这三个方面都作了大量工作,得到了 $NA > 0.7$ 的变折射率透镜。

目前国外只有日本板玻璃公司可以批量生产各种变折射率透镜,市场供不应求。我们应当加强变折射率透镜的研制工作,尽快把科研成果转化为商品。

[1] T. Uchida et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-5

(1969), 331.

- [2] E. W. Marchand, *Gradient Index Optics*, Academic Press, New York, (1978), 75.
- [3] 龚祖同、李景镇等, *光学手册*, 陕西科学技术出版社, (1986), 685.
- [4] 陈邹生、高应俊, *光学学报*, 4(1984), 593.
- [5] E. W. Marchand, *J. Opt. Soc. Am.*, 60 (1980), 1.
- [6] I. Kitano, *Optical Devices & Fibers*, 5 (1983), 151.
- [7] D. C. Leiner and R. Prescott, *Appl. Opt.*, 22(1983), 383.
- [8] L. G. Atkinson, *Appl. Opt.*, 21(1982), 993.
- [9] D. T. Moore, *Appl. Opt.*, 19 (1980), 1035.
- [10] A. R. Cooper, *Appl. Opt.*, 19 (1980), 1087.
- [11] Y. Ohtsuka et al., *Appl. Opt.*, 20 (1981), 2319.
- [12] Y. Koike et al., *Appl. Opt.*, 25 (1986), 3356.
- [13] M. Oikawa et al., *Appl. Opt.*, 23 (1984), 1787.
- [14] G. I. Hatakoshi and K. Goto, *Appl. Opt.*, 24 (1985), 4307.
- [15] T. Suhara et al., *Appl. Opt.*, 25 (1986), 3379.
- [16] I. Kitano et al., *Appl. Opt.*, 25(1986), 3336.
- [17] J. D. Forer et al., *Appl. Opt.*, 22(1981), 407.
- [18] I. Kitano et al., *Appl. Opt.*, 25, (1986), 3326.
- [19] S. Misawa et al., *Appl. Opt.*, 23 (1984), 1784.

(上接第 156 页)

器、来客报信机、自动售货机等,还有家用电器的自动控温、自动开关。从人体辐射出的总能量约为 10—100W/h, 这种辐射能密度与距离平方成反比。对于受光面积小的传感器,能接收到的能量极小,所以要用凹面反射镜聚光。从人体辐射出的红外线波长约为 9—10 μm 。

用热释电传感器的火警报警器已实用化,物体燃烧时产生约 4.3 μm 的 CO_2 气体共振辐射,通过通带滤光器选择探测,能起到探测火警的作用。工业上用的热释电传感器可做成红外线厚度计,用于测量塑料板或薄膜的厚度。若塑料对红外某一波长有吸收峰,从红外线吸收

量,可以监控塑料板膜的厚度,测量准确度在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 左右。在陶瓷、钢铁、金属冶炼、化工、食品、木材加工、造纸、皮革等工业中,产品的质量过程中,水分的测量是很重要的。利用水对红外线 1.2 μm , 1.45 μm , 1.93 μm , 2.95 μm 的吸收带,用热释电传感器制成三色水分计,可以精确测量各种产品的水分等。

- [1] 村田充弘, *センサ技術*, 4-6(1984), 94—98.
- [2] 新川友彦, 田附和男, *センサ技術*, 4-2(1984), 102—104.
- [3] 横尾敏昭等, *センサ选集*, 上海 4060 信箱编辑室, (1983), 86—92.

(上接第 170 页)

3. 显示逻辑关系的光强取决于所开门处的光强,决定于谱的强度和谱的级数。特别是二频谱的卷积项的光强,决定于每一谱的级数。级数愈高,光强愈小。

4. 图片预处理时的四个物平面 (a, \bar{a}, b, \bar{b}) 一定要调整到同一平面。本实验中有一张底片没有调整好,影响结果的清晰度。

本实验图片预处理时曾得到李德宽同志的帮助,在此表示感谢。

- [1] J. D. Armitage, A. W. Lohmann, *Appl. Opt.*, 4 (1965), 399.
- [2] B. Bartelt, A. W. Lohmann, and E. E. Sirey, *J. Opt. Soc. Am.*, 1 (1984), 944.