

Si₃N₄ 波导上的费涅尔透镜*

蔡德水 管秀荣 李树荣 胡鸿璋

(天津大学精密仪器工程系)

提 要

本文提出一种新型的费涅尔波导透镜。它不仅具有衍射受限的聚焦特性,而且有与理想费涅尔波导透镜几乎一样的效率,并使工艺简化。在氮化硅波导上进行的工艺实验表明,实验结果与理论分析具有较好的一致性。

关键词: 集成光学;波导;费涅尔透镜。

一、引 言

波导透镜是集成光学信息处理,光通讯和光计算机等系统中实现傅里叶变换、成像、聚焦、准直和互连等功能的关键器件。近年来对波导透镜进行了大量的研究,目前性能较好的波导透镜主要有兰伯(Luneberg)透镜^[1]、短程(Geodisic)透镜^[2]和衍射透镜。

衍射波导透镜主要有两种,一种是费涅尔(Fresnel)透镜^[3],一种是布拉格(Bragg)透镜^[4]。与兰伯透镜和短程透镜相比,其主要优点是可采用价廉的平面微加工技术制备,便于大量生产。虽然这两种透镜都获得了衍射受限的聚焦特性,但布拉格透镜的入射角范围很小,应用上受到限制。传统的费涅尔波导透镜是二阶的,其缺点是效率较低,吸收型的理论效率为10%,相移型的理论效率也只有32%。理想费涅尔透镜的效率很高,但形状十分复杂,很难制备^[5]。我们提出一种线性边带的新型费涅尔波导透镜,不仅工艺得到简化,其理论衍射效率可高达90.18%。本文从理论上分析了这种透镜的设计方法,给出在氮化硅波导上制备透镜的实验结果。

二、透镜的结构

我们设计的费涅尔波导透镜如图1所示。除中心带以外,所有边带都是直角三角形,称为线性边带。直角顶在 y 轴上的坐标为

$$Y_m = \sqrt{\frac{2mf\lambda_0}{N_1}}, \quad (1)$$

式中 f 为焦距, λ_0 为真空中的光波长, N_1 为波导的有效折射率。两相邻直角顶到焦点 F 的光程差是一个波长,它们对光扰动的贡献将相长干涉。对于每一个直角三角形 $Y_m G_m Y_{m+1}$,光程 $\overline{Y_m G_m F}$ 等于光程 $\overline{Y_{m+1} F}$ 。因此得

收稿日期: 1989年1月18日; 收到修改稿日期: 1989年4月10日

* 国家自然科学基金资助的项目。

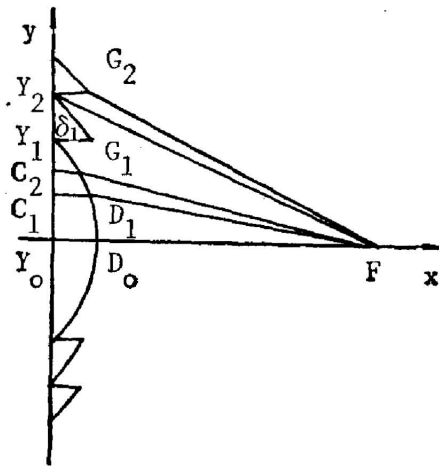


Fig. 1 The form of Fresnel lenses

$$N_2 \delta_m + N_1 l_m = N_1 \rho_{m+1} = N_1 \rho_m + \lambda_0, \tag{2}$$

式中 $\delta_m = \overline{Y_m G_m}$, N_2 为透镜带区域内波导的有效折射率, ρ_m 和 l_m 由下面两式给出:

$$\rho_m^2 = Y_m^2 + f^2, \tag{3}$$

$$l_m^2 = Y_m^2 + (f - \delta_m)^2, \tag{4}$$

其中 $\delta_m \ll f$, 由(2)、(3)、(4)式可得

$$\delta_m = \lambda_0 / \left[N_2 - N_1 / \left(1 + \frac{2m\lambda_0}{N_1 f} \right)^{1/2} \right]. \tag{5}$$

中心带各处的光程, 如图 1 的 $\overline{Y_0 D_0 F}$ 、 $\overline{C_1 D_1 F}$ 、 $\overline{C_2 D_2 F}$ 等, 都是相等的。随坐标 y 而变化的带宽由下式给出^[5]:

$$\delta_y = \frac{f}{J+1} + \frac{J\lambda_0}{N_1(J^2-1)} - \sqrt{\left[\frac{f}{J+1} - \frac{\lambda_0}{N_1(J^2-1)} \right]^2 + \frac{y^2}{J^2-1}}, \tag{6}$$

式中 $J = N_2/N_1$ 。

三、透镜的光强分布

本透镜可近似地作相位光栅考虑, 相移的数学表示式为

$$\phi(V) = \begin{cases} 2\pi - \frac{\pi}{2} V^2, & V_1 > \pm V > 0; \\ g_m(V_m \mp V), & V_m > \pm V > V_{m-1}, m \geq 2, \end{cases} \tag{7}$$

式中 $g_m = \frac{2\pi}{V_m - V_{m-1}}$, $V_m = \sqrt{4m}$, V 是以第一费涅尔半径为单位的透镜归一化坐标。第 m 带对焦线上离轴 ΔV 处的观察点 P 的复振幅的贡献为

$$U_m(P) = \int_{V_{m-1} + \Delta V}^{V_m + \Delta V} e^{i[V'^2 + \phi(V')]dV'} = C_m + iS_m. \tag{8}$$

P 点的光强为

$$I(P) = \left(\sum_{m=-M}^M C_m \right)^2 + \left(\sum_{m=-M}^M S_m \right)^2, \tag{9}$$

其中 M 是最大带数。对于 $M = 134$ 的费涅尔透镜, 我们计算了焦线上的光强分布, 如图 2

所示。图中的 I_0 是无透镜时 P 点的强点。

定义效率为主瓣内的能量与入射总能量之比。表 1 对本文提出的费涅尔波导透镜与同样参数的理想费涅尔波导透镜进行了比较, 其中的 F 为透镜的 F 数。可以看出, 本文提出的费涅尔透镜不仅可获得衍射受限的聚焦特性, 而且无论是效率还是峰值强度, 都与理想费涅尔透镜相差甚微。

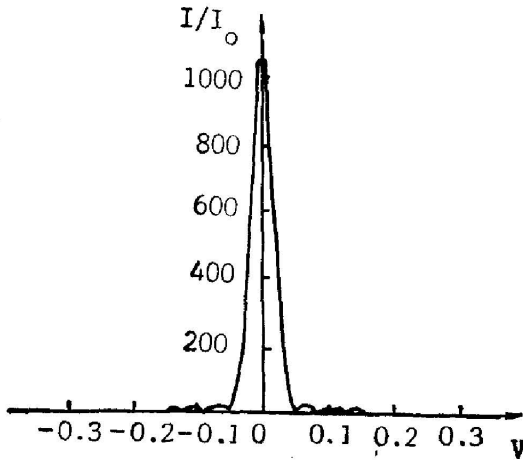


Fig. 2 Theoretical curve of relative intensity I/I_0 as a function of V for a Fresnel lens with $M=134$ zones

Table 1 The relative of the parameters for Ideal Fresnel lens to the parameters for this paper

Type	Efficiency	Central maximum intensity (I/I_0)	Width of the main lobe
Ideal Fresnel lens	90.28%	1072	$2\lambda_0 F/N_1$
This paper	90.18%	1071	$2\lambda_0 F/N_1$

四、工 艺 实 验

工艺实验是在硅衬底上用常规平面工艺进行的, 透镜的波导结构如图 3 所示。首先在硅片上用热氧化方法生成 SiO_2 缓冲层, 然后用 CVD 法淀积 Si_3N_4 波导, 再用 CVD 法淀积一层 SiO_2 , 最后经常规光刻和化学刻蚀制成透镜带。 SiO_2 折射率为 1.458, Si_3N_4 折射率为 1.975, 光源波长 $\lambda_0=6328\text{\AA}$ 。

1. 波导厚度

SiO_2 缓冲层厚 $0.6\mu\text{m}$ 时, 波导中 TE_0 的传输损耗便很小。我们控制的缓冲层厚度 $t_3=0.8\mu\text{m}$ 。

经对 SiO_2 衬底上的 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 复合波导模方程的运算, 在 Si_3N_4 膜厚 $t_1=0.16\mu\text{m}$ 时, 复合波导 TE_0 模的有效折射率 N_2 随 SiO_2 复盖层厚度 t_2 的变化关系如图 4 曲线所示。由图可见, 当 SiO_2 透镜带的厚度大于 $0.2\mu\text{m}$ 时, 透镜区域内 TE_0 模的有效折射率就已基本上没有变化。我们控制的 SiO_2 透镜带厚度 $t_2=0.4\mu\text{m}$ 。

由选定的缓冲层和透镜带厚度可知, 透镜区域内的复合波导实际上可作为复盖层和衬底均为 SiO_2 的 Si_3N_4 对称波导处理。通过对非对称波导和对称波导 TE_0 模截止条件的计算, 得出允许的 Si_3N_4 波导层厚度范围是 $0.111\mu\text{m}\sim 0.237\mu\text{m}$ 。

2. 透镜长度

由(5)式可知, 透镜各带的长度 δ_m 相差很少, 在进行工艺设计时, 透镜长度可按式估算,

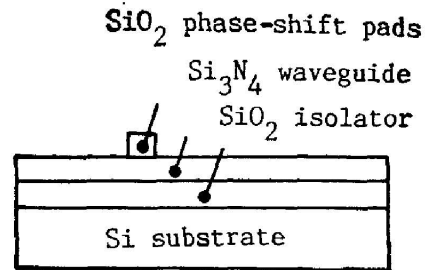


Fig. 3 The waveguide structure of the lens

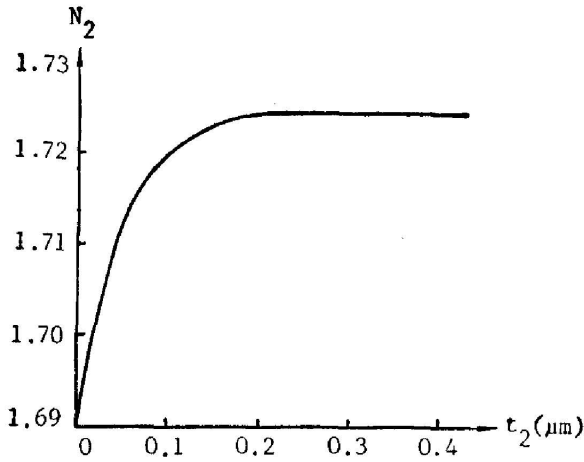


Fig. 4 Effective index N_2 versus thickness t_2 of the silica overlayer with the silicon nitride waveguide thickness $t_1=0.16 \mu\text{m}$

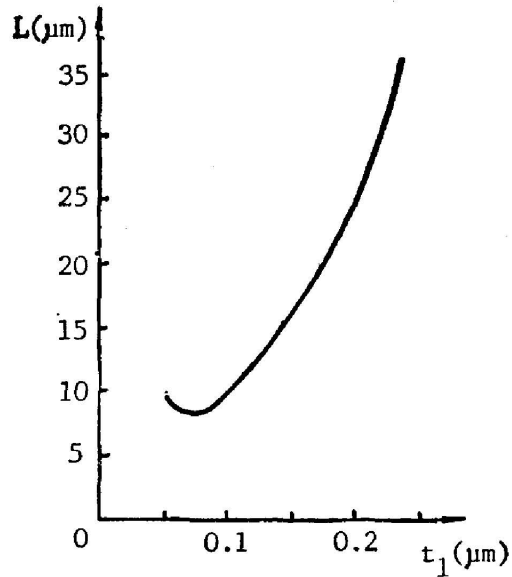


Fig. 5 Lens length L versus thickness t_1 of the silicon nitride waveguide

$$L = \frac{\lambda_0}{N_2 - N_1} = \frac{\lambda_0}{\Delta N}, \quad (10)$$

式中 ΔN 为透镜内外波导的有效折射率之差。通过解模方程,并考虑以上关系式,得出透镜长度 L 和 Si₃N₄ 波导厚度 t_1 的关系曲线,如图 5 所示。按正常的膜厚控制精度 $\pm 50 \text{ \AA}$ 考虑,虽然在波导厚度设定为最小截止厚度时,波导厚度的变化引起的透镜长度误差为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,而在波导厚度设定为最大截止厚度时,引起的透镜长度误差将增大到 $\pm 1.5 \mu\text{m}$,但在整个截止厚度范围以内,波导厚度变化引起的相移误差均约 5%。这表明,当只考虑膜厚控制精度对相移误差的影响时,波导厚度可在截止范围内任意选取,透镜长度允许在 $11 \mu\text{m} \sim 36 \mu\text{m}$ 范围内变化。引起相移误差的另一因素是刻蚀误差。虽然透镜长度愈长,刻蚀误差对相移精度的影响愈小,但透镜长度过长将导致效率和视场角的减小。按正常的刻蚀精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 考虑,在选用最小透镜长度的情况下,刻蚀误差造成的相移误差小于 5%,与膜厚控制误差引起的相移误差大致相同。

3. 透镜带数

由图 1 可知,当出射光线与最边带三角形的斜边重合时,带数 M 达到极大值,即透镜口径达到极限。用式(18)近似表示最边带的长度,通过简单几何关系可得

$$M_{\max} = \frac{f \Delta N - \lambda_0}{2 \lambda_0}. \quad (11)$$

在一定焦距下, M_{\max} 与 ΔN 成正比。为获得大口径透镜,需要大的有效折射率之差;对于本透镜波导结构,即需要小的波导厚度。但带数 M 不能选得太大,否则视场角将太小,特别是边带的图形将难于制备。实际带数的选取,主要取决于光刻工艺的分辨率。

4. 测试结果

我们对 $J=10 \text{ mm}$, $M=134$, $t_1=1350 \text{ \AA}$ 的透镜进行了工艺实验。图 6 为所制透镜的

局部照片。计算的最边带宽度为 $4\mu\text{m}$, 恰与常规平面工艺相容。透镜口径 $D=2\text{mm}$, 长度 $L=14.7\mu\text{m}$, 视场角可达 $\pm 21^\circ$, 主瓣理论宽度为 $3.8\mu\text{m}$ 。

有效折射率的测量是在我校研制的波导测试仪上进行的, 测量精度为 1×10^{-4} 。对透镜内外波导的 TE_0 模有效折射率的测量结果分别为: $N_2=1.6910$, $N_1=1.6480$ 。有效折射率之差 $\Delta N=4.3 \times 10^{-2}$ 。

为测量效率, 选用了直角棱较长的棱镜耦合器。把输入耦合器置于费涅尔透镜前方, 并使光轴处于直角棱中央位置。在波导中馈入束宽为 2mm 的准直激光束, 利用输出耦合器把会聚的光束从波导中引出来, 再用一个 $20.8 \times$ 的显微物镜把波导中的焦斑放大, 然后用光功率计在像面上测量焦斑的光

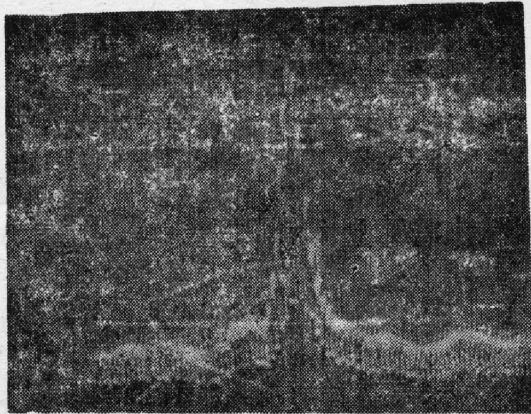


Fig. 7 Measured intensity distribution on the focal line of the Fresnel lens ($7.2\mu\text{m}/\text{div}$)

功率 I_1 。在记录 I_1 之前, 先在光功率计前方放一可调狭缝, 使焦线上的主瓣光束恰好通过狭缝。最后在波导透镜的上下方, 分别在波导中馈入激光束, 并测量显微物镜后焦点处的光功率 I_2 和 I_3 , 则 $2I_1/(I_2+I_3)$ 便是效率。实测效率约为 60% 。实际效率比理论值低, 主要是由工艺缺陷造成的, 此外, 耦合棱镜的缺陷和各处耦合效率的实际差异也会引入误差。

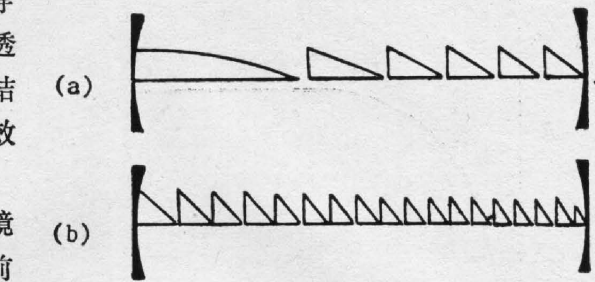


Fig. 6 Photograph (500 \times) of the Fresnel lens
(a) Central zone; (b) Side zone

光强分布是用 256 位 CCD 线阵测量的。把光束馈入波导透镜, 并用前述的 $20.8 \times$ 显微物镜把焦斑放大, 便可在像面上测量。 CCD 各探测单元的间距为 $15\mu\text{m}$ 。实测的光强分布曲线如图 7 的示波器照片所示。示波器每格为 $7.2\mu\text{m}$, 主峰半宽度为 $4.5\mu\text{m}$ 。实测曲线与图 2 的理论曲线符合得较好。实际焦斑比预期焦斑的扩大, 主要是由于工艺缺陷造成的。

我们提出一种新型的费涅尔波导透镜, 它不但具有衍射受限的聚焦特性, 而且理论效率高达 90.18% 。我们还在硅片上采用常规平面工艺进行了实验, 对波导透镜的具体结构参数进行了讨论, 实验表明, 线性边带的费涅尔波导透镜, 简化了制备工艺, 实测焦斑达 $4.5\mu\text{m}$, 实际衍射效率达 60% , 具有实际应用价值。如果进一步改进工艺, 譬如采用电子束曝光及等离子刻蚀等先进工艺, 透镜的实际特性还可望提高。实验透镜的有效折射率差为 4.3×10^{-2} , 这样数量级的波导在 AlGaAs 材料系统中也容易满足。本透镜将在实际集成光路中具有广泛用途。

五、结 语

我们提出一种新型的费涅尔波导透镜, 它不但具有衍射受限的聚焦特性, 而且理论效率高达 90.18% 。我们还在硅片上采用常规平面工艺进行了实验, 对波导透镜的具体结构参数进行了讨论, 实验表明, 线性边带的费涅尔波导透镜, 简化了制备工艺, 实测焦斑达 $4.5\mu\text{m}$, 实际衍射效率达 60% , 具有实际应用价值。如果进一步改进工艺, 譬如采用电子束曝光及等离子刻蚀等先进工艺, 透镜的实际特性还可望提高。实验透镜的有效折射率差为 4.3×10^{-2} , 这样数量级的波导在 AlGaAs 材料系统中也容易满足。本透镜将在实际集成光路中具有广泛用途。

参 考 文 献

- [1] S. K. Yao *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, No. 4 (Aug), 307~309.
- [2] 蔡德水等;《天津大学学报》, 1985, No. 1 (Jan), 20~25.
- [3] W. S. C. Chang *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1980, **QE-16**, No. 1 (Jul), 744~754.
- [4] J-M. P. Delavaux *et al.*; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 2 (Jan), 221~226.
- [5] P. Gidou *et al.*; *Opt. Eng.*, 1985, **24**, No. 2 (Mar), 235~240.

Fresnel lenses in silicon nitride waveguides

CAI DESHUI, GUAN XIURONG, LI SHURONG AND HU HONGZHANG

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University)

(Received 18 January 1989; revised 10 April 1989)

Abstract

An improved Fresnel waveguide lens is presented. It not only exhibits theoretically excellent focusing characteristics and has almost the same efficiency as that of ideal Fresnel lens, but also simplifies the mask process. We give experimental results concerning these lenses ($f/D=5$, 2 mm aperture) in silicon nitride waveguides. Nearly diffraction limited focusing characteristics and high efficiency (60%) were experimentally obtained. The experiment results are in good agreement with theoretical analysis.

Key words: integrated optics, waveguide; Fresnel lens.