

平凸型氮化硅球面微透镜的研究*

宋国瑞 姚惠贞

(华南理工大学电子与通信工程系, 广州 510641)

摘 要 介绍了用激光化学汽相沉积(LCVD)球面微透镜的技术。首先对激光化学汽相沉积法获得球面微透镜进行了理论分析,并用计算机分析了在一定沉积条件下的微透镜厚度剖面形状及光学聚焦特性。其后介绍了激光化学汽相沉积的实验装置,用该装置在平面石英玻璃衬底上,制出了平凸型氮化硅球面微透镜,并对其参量进行了测量。实验中还摸索了激光化学汽相沉积的沉积工艺。实验结果表明,通过控制源气体的化学配比与浓度,调节激光功率与衬底上的光斑尺寸,选择沉积时间,可以获得不同直径、透明、表面光滑的氮化硅球面微透镜。

关键词 激光, 化学汽相沉积, 微透镜。

1 引 言

近年来,随着光纤通信、光计算机、光信息处理、光学集成回路等光电子技术的迅速发展,作为微光学领域内的重要元件之一的微透镜得到了广泛的发展与应用。微透镜不仅可用于半导体激光的聚焦与准直,还可用于激光二极管、光纤、光学集成回路之间,实现有效的光耦合。微透镜列阵还可用于列阵式激光二极管与并列多根光纤传输系统之间作为低损耗耦合器,实现大容量数据流传输。微透镜及其列阵在光开关、光分支器、光波分复用器等微光学多功能器件中有重要用途,还可实现光平行逻辑运算、多重图像信息变换、1:1 近距光学成像等。

微透镜一般是指直径小于数百微米的光学透镜。目前,利用离子交换技术已制成渐变折射率的棒形微透镜与平面微透镜列阵^[1],可以利用光解技术在光敏玻璃衬底上制作双凸面微透镜列阵^[2]及用感光胶法制造微透镜^[3]等。最近又发展了利用激光化学汽相沉积技术研制微透镜^[4]。这是激光化学汽相沉积微细加工技术在微光学领域内的重要应用。

2 原 理

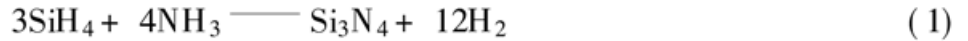
采用激光作为热源,使气态物质经化学汽相热解反应形成固态物质,沉积在衬底上的方法简称为激光化学汽相沉积。

在热解激光化学汽相沉积中,选择的激光波长,应使其被衬底吸收,而不被空间的源气

* 国家自然科学基金和广东省自然科学基金资助项目。

收稿日期:1996年4月21日;收到修改稿日期:1996年7月15日

体吸收。作者采用波长为 10.6 μm 的 CO₂ 红外激光, 衬底是石英玻璃片, 源气体是硅烷 (SiH₄) 和氨 (NH₃), 热解激光化学汽相沉积的生成物为氮化硅 (Si₃N₄), 其化学反应式为



在热解温度低于 900°C 时生成的 Si₃N₄ 是无定型玻璃态介质, 折射率为 2, 在波长为 0.3~8 μm 宽光谱范围内是透明的, 不存在吸收带, 适宜用做微透镜。

本文是利用 TEM₀₀ 模 CO₂ 激光束, 其横向光强密度具有高斯分布特性。当激光束照射在处于混合源气体氛围中的平面石英玻璃衬底上, 由于石英玻璃对 CO₂ 激光的强吸收及低导热特性, 在衬底表面的光斑范围内, 形成了类高斯分布的温度场^[5]。在该温度场作用下, 混合源气体进行热解沉积。

在沉积中, 沉积形状决定于沉积速率的分布与沉积时间, 而沉积速率又取决于温度。故在一定时间条件下, 衬底上的温度分布就决定了沉积膜厚度的分布。由此, 在平面石英玻璃衬底上, 生成了平凸型 Si₃N₄ 球面介质膜, 用做微透镜。

以下对激光化学汽相沉积法制作微透镜进行分析。

2.1 TEM₀₀ 模 CO₂ 激光的光强分布函数

$$f(R) = \exp(-R^2) \quad (2)$$

其中 $R = r/w$, w 是衬底上光斑半径, r 是与光斑中心的距离。

2.2 激光照射石英玻璃衬底表面的温度分布

作者推导了半无限大衬底表面的温度分布^[5]。这里, 考虑实际模型如图 1 所示。设石英玻璃衬底的有限半径为 R_0 , 有限厚度为 z_0 , 高斯光束半径为 w 。设边界条件为: $\partial T / \partial t |_{t > t_0} = 0$; $T(r, z, t) |_{r > R_0} = T_0$; $T(r, z, t) |_{t=0} = T_0$, 式中 T_0 为室温。解热传导方程, 代入边界条件, 利用贝塞耳变换, 便可求出激光诱导石英玻璃衬底表面 ($z = 0$) 温度分布的表达式为

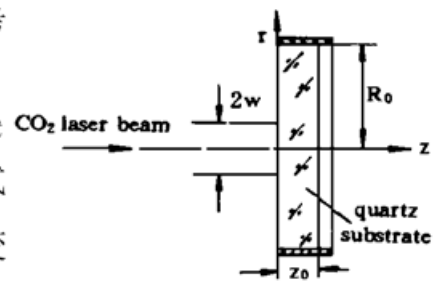


Fig. 1 Schematic of laser irradiated substrate

$$T(r, w) = \frac{\alpha P_0}{2 \sqrt{\pi \kappa}} \frac{1}{\int_0^\infty F(\lambda) d\lambda} \int_0^\infty J_0(\lambda R) F(\lambda) \frac{d\lambda}{\alpha w + \lambda} \quad (3)$$

式中 P_0 为激光入射功率, $\alpha = 14 \text{ mm}^{-1}$ 是石英玻璃的吸收系数, κ 是热扩散系数, $J_0(\lambda R)$ 为零阶贝塞耳函数, $F(\lambda)$ 是 $f(R)$ 的贝塞耳变换。

2.3 沉积速率分布

沉积速率 D 与温度 T 的关系满足阿累尼乌斯 (Arrhenius) 定理^[6], 即 $D(T) = A \exp(-E_a/RT)$ 。从分子运动和分子结构出发, 结合化学汽相沉积和碰撞机理, 可推导出沉积速率的近似表达式为,

$$D(T) = CP_g^2 \frac{\beta}{(1 + \beta)^2} \exp(-E_a/RT) \quad (4)$$

式中 P_g 为混合源气体的总压强, β 为 SiH₄ 与 NH₃ 的化学配比, E_a 为实验活化能, C 为实验系数。据文献[4]给出的如图 2 所示的实验曲线, 可近似求出 E_a 近似值约为 $2.15 \times$

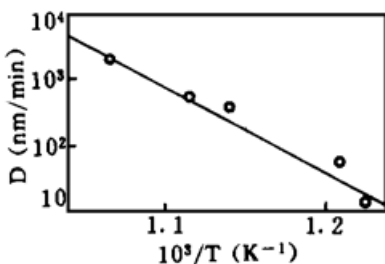


Fig. 2 Relation curve for deposition rates as function of substrate temperatures ($P = 1.2 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\beta = 1/20$)

10^3 J/mol , C 约为 $1.62 \times 10^{-4} \text{ nm/min} \cdot \text{Pa}^2$, 据此进行计算机模拟分析。

2.4 衬底表面沉积氮化硅膜厚度分布

若沉积速率为 $D(T)$, 沉积时间为 t_0 , 则沉积厚度近似为

$$H(r, w) = t_0 D(T) \quad (5)$$

根据以上关系式进行计算机软件设计。由(3)式可得到衬底表面温度分布如图3所示。将

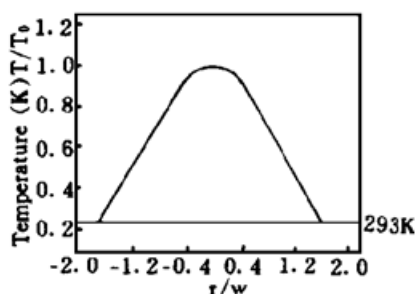


Fig. 3 Temperature distribution curve of substrate simulated by computer. ($P_0 = 4.5 \text{ W}$, $t_0 = 15 \text{ min}$, $w = 0.25 \text{ mm}$, $T(0) = 1265 \text{ K}$)

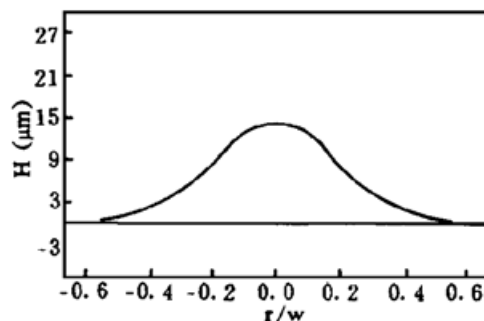


Fig. 4 Thickness profile of microlens deposited in theory ($P_g = 2.2 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\beta = 1/10$)

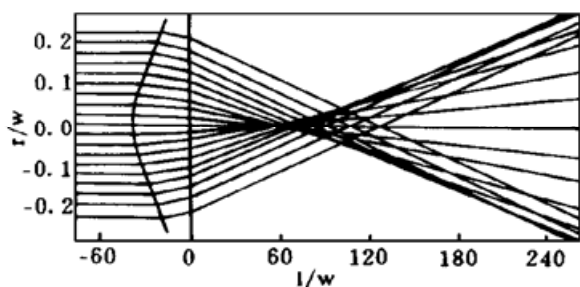


Fig. 5 Optical focusing characteristic of deposited microlens simulated with computer.

($P_0 = 4.0 \text{ W}$, $t_0 = 10 \text{ min}$, $w = 0.25 \text{ mm}$, $P_g = 2.2 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\beta = 1/20$)

(3)、(4)式代入(5)式可获得沉积膜微透镜厚度沿径向分布如图4所示。将理论上获得的沉积膜微透镜用平行光入射,并将半高宽有效直径 $2a'$ 范围内透镜表面划分成18等分,每一小段近似具有相同曲率半径。用计算机进行光线追迹法计算,从而获得这种微透镜的光学聚焦特性如图5所示。由图5可见,由于沉积膜的非理想球面,此种微透镜具有一定的球差。当工艺条件不同时,球差大小也不同。计算机分析表明,选择适当工艺条件,可以改善其光学聚焦特性。

3 实验装置

用激光化学汽相沉积法研制微透镜的实验装置如图6所示。沉积前沉积室被抽真空至 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 以上,然后按配气成分、比例与浓度充入高纯反应源气体。其后将激光聚焦照射到沉积室内厚度为 0.4 mm 的石英玻璃衬底上进行沉积。激光化学汽相沉积实验是在各种不同源气体化学配比与浓度,不同激光功率,光斑直径与沉积时间等工艺条件下进行的。

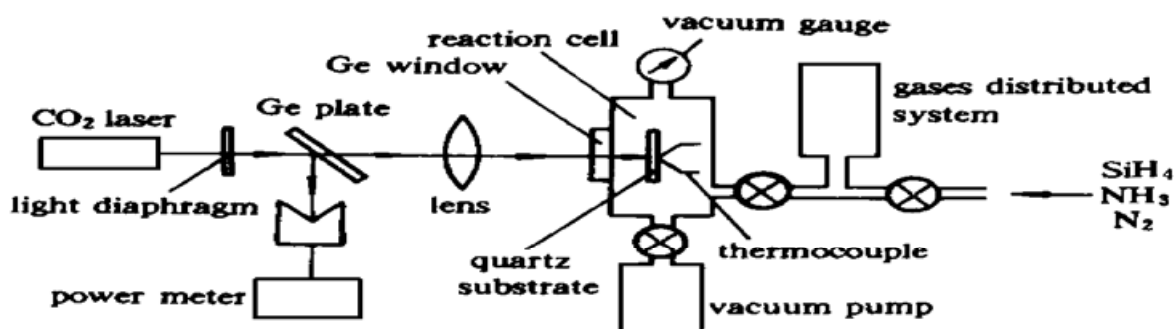


Fig. 6 Schematic of experimental arrangement for fabricate microlenses by laser chemical vapor deposition

4 实验结果分析

由于用 Si_3N_4 膜做微透镜, 故需控制沉积温度不能超过 900°C 。温度过高将产生结晶态 Si_3N_4 膜影响透明度, 温度过低沉积率也低。当沉积膜层增厚时容易出现龟裂, 影响膜层的牢固性和聚光效率。当反应气体浓度高, 尤其化学配比 β 高时, 在沉积膜中容易产生游离硅, 影响透明度。一般化学配比 β 选择 $1/10 \sim 1/20$, 反应气体总压强为 $(1 \sim 3) \times 10^4 \text{ Pa}$, 沉积时间以 $10 \sim 20 \text{ min}$ 较佳。实验表明, 只要适当控制源气体的化学配比与浓度, 调节激光功率与衬底上的激光光斑尺寸, 选择沉积时间, 就可以获得所需直径、透明、表面光滑的 Si_3N_4 球面微透镜。

附表中列出了利用激光化学汽相沉积获得的部分微透镜的测试数据。通过读数显微镜测量微透镜的直径。半高宽有效直径约为轮廓直径的 $1/2$ 。数值孔径 (NA) 的测量, 是利用 He-Ne 激光平行细束入射微透镜后发散, 通过测量其发散角 θ , 按照关系式 $NA = \sin \theta$ 计算 NA 值。利用 $NA = \sin [\arctan (a/f)]$ 关系式计算有效焦距。

Table 1 Measurement data of some microlenses deposited by LCVD

No.	1	2	3	4	5	6	7
$2a'$ (mm)	0.27	0.24	0.52	0.20	1.20	0.19	0.31
NA	0.20	0.19	0.16	0.14	0.11	0.10	0.08
f (mm)	1.29	1.25	1.60	1.40	1.75	0.95	2.10

$2a'$ half-high efficient diameter; NA : numerical aperture; f : focal length

图 7 为用体视显微镜观察 No. 7 微透镜并拍摄的照片, 图 8 是用 detak-II 型台阶仪测量的剖面曲线图。

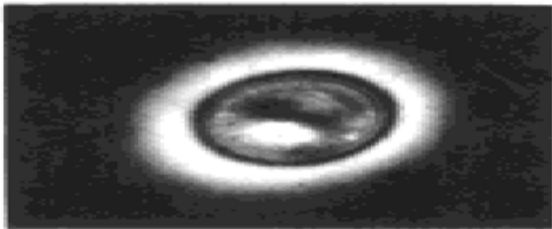


Fig. 7 Photograph of microlens taken by stereoscopic microscope

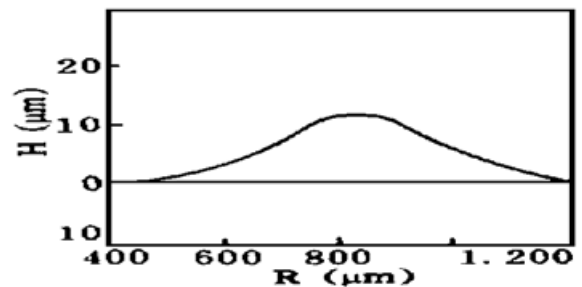


Fig. 8 Thickness profile of microlens measured by step-height profiler

结 论 采用激光化学汽相沉积法沉积 Si_3N_4 球面介质膜用做微透镜, 与离子交换法制作渐变折射率微透镜相比较, 具有设备与工艺简单, 易于控制, 一步工序沉积生成, 需时短等优点。而且, 只要改变衬底上激光光斑的尺寸, 就可以获得所需不同直径的微透镜。理论上, 微透镜的最小直径决定于激光光斑的衍射极限。再者, 通过改变激光束的横向能量密度分布, 可以调节微透镜的厚度剖面形状, 改善光学特性。

参 考 文 献

- [1] Oikawa M., Iga K., Sanada T., *et al.*, Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion exchange technique. *Japan J. Appl. Phys.*, 1981, **20**(4): L296~ L298
- [2] Borrelli N. F., Morse D. L., Bellman R. H., *et al.*, Photolytic technique for producing microlenses in photosensitive glass. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(16): 2520~ 2525
- [3] Lee K. S., Bames F. S., Microlenses on the end of single-mode optical fibers for laser applications. *Appl.*

Opt., 1985, **24**(19): 3134~ 3139

- [4] Kubo M, Hanabusa M., Fabrication of microlenses by laser chemical vapor deposition. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(18): 2755~ 2759
- [5] 姚惠贞, 宋国瑞, 王东, 激光热解沉积微透镜中衬底温度场的研究。华南理工大学学报(自然科学版), 1994, **22**(2): 27~ 35
- [6] 王军民, 薛芳渝, 刘芸编, 物理化学。北京, 清华大学出版社, 1993: 377

Study of Plano-Convex Silicon Nitride Microlenses with Spherical Surface

Song Guorui Yao Huizhen

(*Department Electronic and Communication Engineering, South China
University of Technology, Guangzhou 510641*)
(Received 21 April 1996; revised 15 July 1996)

Abstract In this paper, a technique of fabricating spherical surface microlenses by laser chemical vapor deposition (LCVD) was introduced. The theoretical analysis and the experimental system of spherical microlenses deposited by LCVD are given. Under certain conditions of deposition the thickness profile and the optical focusing characteristic of microlenses were simulated with computer. Plano-convex silicon-nitride microlenses with spherical surface on flat quartz substrate was successfully fabricated and their parameters were measured. The experimental results indicated that through controlling the chemical mixture ratio and concentration of source gases properly adjusting the laser power and spot size on substrate, and selecting appropriately the deposition time the transparent plano-convex silicon-nitride microlenses with smooth spherical surface and different diameters could be obtained.

Key words laser, chemical vapor deposition, microlens.