

具有分束和聚焦功能的氮化硅 二元位相型光学元件*

黄信凡 李志锋 高文琦 周进 顾晓峰 陈坤基

(南京大学物理系, 南京 210008)

提要 报道了自行设计的将二维 Dammann 光栅和 Fresnel 波带板集成为一体的同时具有分束和聚焦功能的二元位相型光分束器,并用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)制备的非晶氮化硅($a\text{-SiN}_x\text{:H}$)薄膜制作了这样的元件,成功地实现了设计的功能,分束阵列为 3×3 ,焦距为 18cm,分束后的光强分布相对误差小于 5%。

关键词 非晶氮化硅, Dammann 光栅, Fresnel 波带板, 光分束器, 二元光学元件

1 引言

任何光计算机、图像处理或光纤通信的最基本单元是能产生一维或二维等强度激光束(或图像)的光学元件。以光的衍射原理为基础发展起来的二元位相型光学元件与常规聚焦透镜相结合就能完成上述功能。早在 1971 年以 Dammann 命名的光栅——一种新型的光学元件就已问世^[1]。通常这种光栅是用玻璃或光致抗蚀膜制作的,元件的可靠性和稳定性受到一定限制,随着半导体微电子技术的飞跃发展为此种器件的研制提供了有力的手段。一些用化学气相方法沉积的薄膜,如氮化硅、二氧化硅和氮氧化硅等,由于其透明、坚固和稳定,更重要的是其折射率可随组分变化而改变^[2,3],因此在集成光学中成为有价值的薄膜。我们在对等离子体化学气相沉积法(PECVD)制备的非晶氮化硅($a\text{-SiN}_x\text{:H}$)薄膜特性研究的基础上,成功地制作了将二维 Dammann 光栅和 Fresnel 波带板集成为一体的同时具有分束和聚焦功能的氮化硅二元位相型光分束器,用该元件可直接实现光学图像或光束的会聚的二维阵列。

2 光学元件设计

Dammann 光栅是一种不等间距位相型光栅,可以用来分束并具有较高的衍射效率。根据分束的数目可用计算的方法来确定位相的突变点,即位相由 $0 \rightarrow \pi$ 或 $\pi \rightarrow 0$ 的位置。当光束通过 Dammann 光栅图形后便分成多路沿不同方向等振幅传播的光束。但是,这种光栅在使用时常常还需用透镜使光束会聚形成点的阵列。为使此种分束器在使用时结构紧凑,我们利用二元

* 本文得到国家自然科学基金资助。

收稿日期: 1994 年 1 月 27 日; 收到修改稿日期: 1994 年 5 月 30 日

位相 Fresnel 波带板的聚焦特点,将 Fresnel 波带板与 Dammann 光栅相集成,成为同时具有分束和聚焦功能的分束器。

二元位相 Fresnel 波带板的透过率为

$$T_{\text{lens}} = \exp[i\Phi_{\text{lens}}(x, y)] \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{lens}} = \text{Int} \left\{ \text{Mod}_2 \left(\frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right) \right\} \pi \quad (2)$$

式中 Φ_{lens} 为 Fresnel 波带板的位相, x, y 分别为离开中心点的距离, r_0 为中心波带的半径, Mod_2 表示取 2 的模, Int 表示取整。二元二维的 Dammann 光栅的透过率为

$$T_{\text{Damm}} = \exp[i\Phi_{\text{Damm}}(x, y)] \quad (3)$$

因此分束器的透过率为

$$T_{\text{Split}} = T_{\text{lens}} \cdot T_{\text{Damm}} = \exp[i(\Phi_{\text{lens}} + \Phi_{\text{Damm}})] = \exp[i\Phi_{\text{Split}}(x, y)] \quad (4)$$

由于 Φ_{lens} 和 Φ_{Damm} 分别只取两个值: $0, \pi$, 而 $\pi + \pi = 2\pi$ 与 0 位相等值, 因此 Φ_{Split} 可由 Φ_{lens} 与 Φ_{Damm} 相异或, 从而得到

$$\Phi_{\text{Split}} = \left[\frac{\Phi_{\text{lens}}}{\pi} \cdot \text{XOR} \frac{\Phi_{\text{Damm}}}{\pi} \right] \pi \quad (5)$$

实际设计中, 对于 Fresnel 波带板, 其焦距 $f = r_0^2/\lambda$ 。设定 $f = 18.0 \text{ cm}$, 则在 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光下工作时要求中心波带 $r_0 = 337 \mu\text{m}$ 。第 n 个波带的半径 $R_n = \sqrt{n} r_0$, n 为正整数, 相邻波带之间的距离为 $\Delta R_n = (\sqrt{n+1} - \sqrt{n}) r_0$ 。共做 80 个波带, 因此最外圈波带的间隔为 $19 \mu\text{m}$, 目前的光刻精度容易满足这一要求。整个波带板图形的外径 $D = 2R_{80} = 0.603 \text{ cm}$ 。

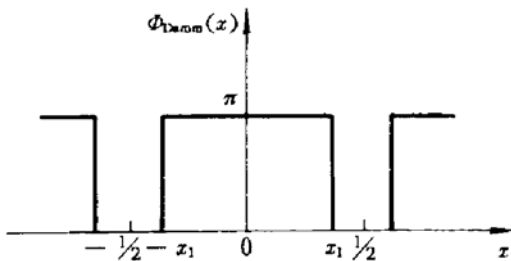


Fig. 1 Space distribution of binary-phase function $\Phi_{\text{Damm}}(x)$ of one-dimensional Dammann grating with the function of three order splitting. $x_1 = 0.368$

对于 Dammann 光栅, 由 Dammann 的计算结果^[1], 三重分束时在第一个半周期中只有一个位相突变点, 位于半周期的 0.368 处。图 1 画出了三重分束情形的一维 Dammann 光栅的二元位相函数 $\Phi(x)$ 的空间分布。结合波带板的尺寸综合考虑, 取 Dammann 光栅的周期 a 为 $250 \mu\text{m}$, 因此在一个周期中 Dammann 光栅图形的尺寸分别为 $184 \mu\text{m}$ 和 $66 \mu\text{m}$ 。

当平行光束入射到上面设计的 Fresnel 波带板与 Dammann 光栅相集成的光学元件上时, 由波带板焦距 f 、Dammann 光栅周期 a 及入射光波长 λ 决定在位于焦点处的屏上三重分束束斑之间的距离 $\Delta = \lambda f/a$ 。在实际应用时, 也可通过调节入射光的发散性和会聚性来改变束斑间的距离。

3 氮化硅薄膜的制备

由 PECVD 法在 Corning 7059 玻璃上淀积 $\alpha\text{-SiN}_x : \text{H}$ 薄膜, 反应气体为硅烷 (SiH_4) 和氨气 (NH_3)。由质量流量计控制反应气体的流量分别为 $10 \text{ SCCM}(\text{SiH}_4)$ 和 $70 \text{ SCCM}(\text{NH}_3)$, 反应室压力为 36 Pa , 衬底温度为 $250 \text{ }^\circ\text{C}$, 射频功率为 50 W 。在此条件下淀积速率约为 0.1 nm/s , 制得的 $\alpha\text{-SiN}_x : \text{H}$ 薄膜在 633 nm 下测得其折射率为 1.8。由位相延迟要求的薄膜厚度 $d = \lambda/2(n - 1) = 370 \text{ nm}$, 从而设定淀积时间为 3700 s 。

4 光学元件制作过程

主要制作工艺流程可分为三步：第一步是图形发生，并用光学方法制成掩模板（又称光刻版）；第二步是图形转移，即在薄膜上形成光致抗蚀图形，第三步是等离子体刻蚀。

计算机产生的图形经绘图仪输出后，通过照相缩小 40 倍，达到原设计要求的尺寸，即 $r_0 = 337 \mu\text{m}$, $a = 250 \mu\text{m}$ 。然后将图形复制到超微粒干版或铬版上，即形成制作光学元件的振幅型光刻版，见图 2。

用光刻技术和等离子体刻蚀技术将模版上的图形转移到 $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ 薄膜上，详细的流程见图 3。Al 膜的作用便是增强对等离子体的掩蔽防护性能。由于采用了半导体平面工艺中的薄膜淀积、蒸发、光刻和等离子体刻蚀等技术，整个制作过程工艺稳定可靠，重复性好，图形转移的精度高。

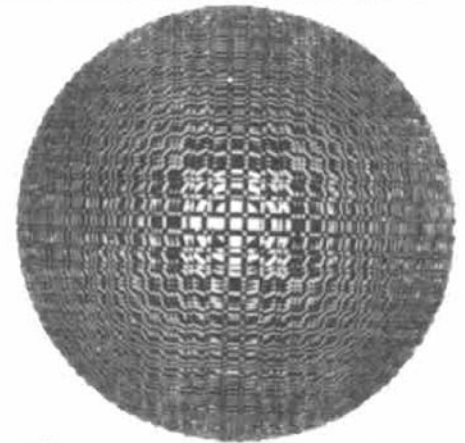


Fig. 2 Photograph of photolithography mask of a two-dimensional binary grating beam splitter generating 3×3 equally intense focussed beams ($\times 8$)

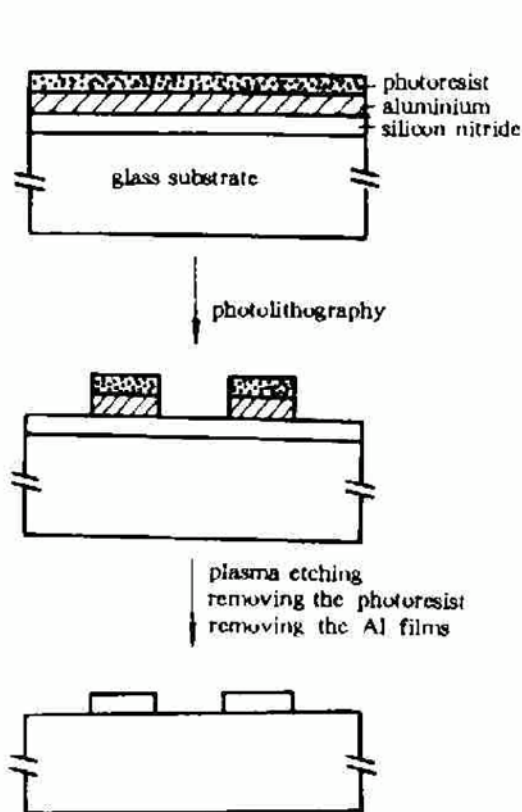


Fig. 3 Schematic of the steps involved in the fabrication of binary phase gratings in amorphous silicon nitride ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$)

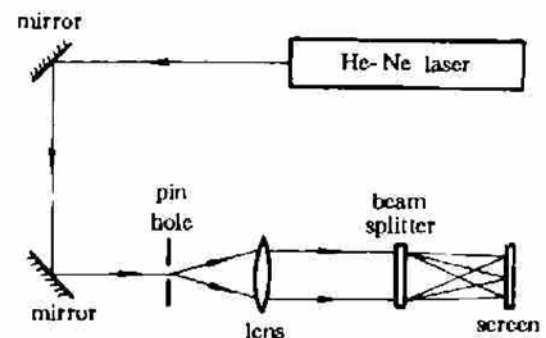


Fig. 4 Schematic of optical measurement

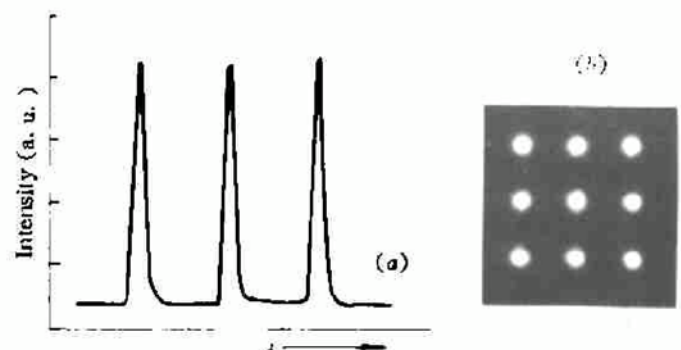


Fig. 5

(a) Position dependence of laser beam intensity in the direction of x axis at the screen; (b) photograph of 3×3 equally intense beams focussed on the screen ($\times 4$)

5 实验结果

实验光路如图 4 所示。633nm 波长的 He-Ne 激光经针孔滤波器和准直透镜后形成强度均匀的平行光，通过 $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ 分束器后分成了 3×3 路光束阵列，聚焦在距分束器约 18 cm 的

屏上。分束后的各束光经测定其强度分布的相对误差小于 5% [图 5(a)], 成功地实现了分束和聚焦的功能。图 5(b) 是经分束后的光束阵列照片, 放大倍数为 4。

6 总 结

我们采用等离子体增强化学气相淀积法制备的 $a\text{-SiN}_x : \text{H}$ 薄膜, 自行设计制作了一个 3×3 阵列的同时具有分束和聚焦功能的二元位相型光分束器, 成功地实现了设计的功能, 其焦距为 18 cm, 分束后的光强分布相对误差小于 5%。由于这种薄膜对可见光的低吸收和低散射使得该元件可在高的光功率密度下工作。曾用 488 nm 和 514 nm 波长的 Ar^+ 激光照射, 其光损伤阈值大于 1 kW/cm^2 , 因此尤其适合于在光学并行处理中由单一大功率激光器同时产生多束逻辑单元的要求。所以, 这种元件在全息图像处理 and 光计算中将是极有应用价值的。

参 考 文 献

- 1 H. Dammann, E. Klotz. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures. *Opt. Acta*, 1977, **24**: 505
- 2 D. E. Bossi, J. M. Hammer, J. M. Shaw. Optical properties of silicon oxynitride dielectric waveguides. *Appl. Opt.*, 1987, **26**: 609
- 3 M. R. Taghizadeh, J. I. B. Wilson. Amorphous silicon nitride optical grating beam splitters. *J. of Non-Cryst. Solids*, 1989, **115**: 165

Silicon Nitride Binary-Phase Optical Elements with the Function of Splitting and Focussing

Huang Xinfan Li Zhifeng Gao Wenqi Zhou Jin Gu Xiaofeng Chen Kunji

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract Having both functions of beam splitting and focussing a home designed binary-optical beam splitter combined with a two-dimensional Dammann grating and a Fresnel zone plate is reported. This element is achieved by means of amorphous silicon nitride thin films. The split arrays are 3×3 and the focus length is 18 cm. The relative distribution error of the split beam intensity is less than 5%.

Key words amorphous silicon nitride, Dammann grating, Fresnel zone plate, beam splitter, binary optical element