

文章编号: 0253-2239(2006)05-0726-4

离焦写入线宽的动态高斯模型

梁宜勇

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 为提高集成光学器件中的多线宽制作效率, 提出了基于激光直接写入技术的离焦加工模式, 即加工时激光束的聚焦点不落在胶层表面而是在其前方或后方; 同时还建立了基于多个加工参量的线宽数学模型。此线宽模型首先假定激光束经物镜变换后, 在像方任意离焦面上的能量仍保持高斯分布, 其次还考虑了光束动态扫描引起的光斑线度对曝光能量分布的影响, 故称其为动态高斯模型。此线宽模型涉及光功率、基片离焦量、光束扫描速度、胶层曝光能量阈值等加工参量。对线宽模型的验证在自行研发的极坐标型激光图形发生器上进行, 实验表明: 相对于不考虑光斑运动的静态高斯模型, 动态高斯模型更为符合实验结果。

关键词: 集成光学; 动态高斯模型; 离焦写入; 激光图形发生器; 线宽

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Dynamic Gaussian Model of Linewidth in Defocus Writing

Liang Yiyong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: For improving efficiency in fabrication of multi-linewidth integrated optical device, a new fabrication method based on defocus laser writing, namely, a method that the laser does not focus on the surface of photoresist during fabrication, was proposed, and the corresponding mathematical model of linewidth was set up, too. This model firstly supposes that the transformed laser beam through objective lens keeps Gaussian energy contribution in arbitrary defocus plane, then describes the influence of laser spot outline on exposure energy contribution during laser dynamic scanning. The model is named "dynamic Gaussian model", which is correlative with light power, defocus amount, scanning velocity of laser beam, exposure energy threshold of photoresist and other fabrication parameters. The verification was carried out in self-developed polar laser pattern generator. It shows that the dynamic Gaussian model is in better agreement with the experimental result and is much better than the static Gaussian model, which ignores the movement of laser spot.

Key words: integrated optics; dynamic Gaussian model; defocus writing; laser pattern generator; linewidth

1 引 言

在各种加工集成光学器件^[1~3]的手段中, 激光直写(直接写入)是很有前途的一种方案。但在利用激光图形发生器以直写方式制作集成光学器件时, 常会碰到同一器件中所需加工线条宽度的跨度很大的情形(比如从 1 μm 到 100 μm), 此时将涉及加工效率的问题。直观而简洁的方法是用激光图形发生器的最小光点(比如 1 μm)来拟合各种线宽, 但其加工效率太低。在以回转方式加工时可采用连续螺旋线填充的方法^[4], 由于省去了环与环之间的定位时间, 因此效率有所提高。观察上述方法可以发现, 若能

一次性刻画出线条, 则在效率上显然是最佳的, 而离焦光刻, 也即加工时激光束不是聚焦在胶层表面或者说胶层表面不落在激光束的焦点处, 则可以满足这一设想。Niemann 等^[5]已采用离焦办法制作粗线条, 但他们使用的是电子束写入设备, 而且只产生一种离焦线宽, 并因此来拟合接近此线宽 1 至 2 倍的粗线条; 国内长春光机所也作过类似研究, 并给出了实验结果, 但没有进行线宽相对诸加工参量的定量分析^[6]; 日本学者恩田曾较完整地给出了相关定量分析, 但他的理论预测和实验值在大离焦区相差太大, 这和他所建立的模型有关^[7]。

本文建立的线宽模型, 首先假设离焦面的辐照

作者简介: 梁宜勇(1969~), 男, 浙江人, 工学博士, 主要从事光电检测及激光直写的研究。E-mail: liangyy@zju.edu.cn

收稿日期: 2005-04-04; 收到修改稿日期: 2005-10-10

度(功率密度)处处呈高斯分布,同时考虑了光斑在胶层表面的相对运动,因此可称之为动态高斯模型。动态高斯模型不仅反映了线宽与离焦量的关系,也反映了其它加工参量(光强、扫描速度、胶层参量等)对线宽的内在关联和影响。为了使动态高斯模型容易解析,计算中引入适当的简化或假设。相关的实验在极坐标型激光图形发生器^[8]上进行。

2 线宽数学模型的建立

在图 1 中,首先假定光斑向右侧即 x 轴正方向做匀速直线运动(这种假设是合理的,激光图形发生器的光学头在写入时保持匀速运动,对于极坐标型的图形发生器,激光头相对基片仍作匀速率运动,且在很小段距离内可近似看成直线运动)。此外再假设光斑(通常也是离焦光斑)的直径为 d ,物镜的入瞳辐射通量(辐射功率)为 P ,光斑的辐照度为 $E(\delta, x, y)$,胶层的曝光能量密度阈值为 D_c ,光斑运动的线速度为 v ,则光斑前方某参考点 $A(x, y)$ 被光斑扫过后呈现能量密度

$$D(\delta, y) = \frac{1}{v} \int_0^{\sqrt{d^2 - (2y)^2}} E(\delta, x, y) dx = \frac{E(\delta, y)}{v} \sqrt{d^2 - (2y)^2}, \quad (1)$$

其中 $E(\delta, y)$ 是 x 方向上从位置 0 到位置 $\sqrt{d^2 - (2y)^2}$ 的平均值。

当 $A(x, y)$ 不在激光束的扫描路径上时,此参考点的能量密度必定为零。综上,参考点 $A(x, y)$ 的能量密度 $D(\delta, y)$ 可表示如下:

$$D(\delta, y) = \begin{cases} \frac{E(\delta, y)}{v} \sqrt{d^2 - (2y)^2}, & -\frac{d}{2} < y < \frac{d}{2} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

如果参考点 $A(x, y)$ 的 $D(\delta, y) = D_c$,则有对应线宽 $w = 2y$,代入(1)式,得线宽

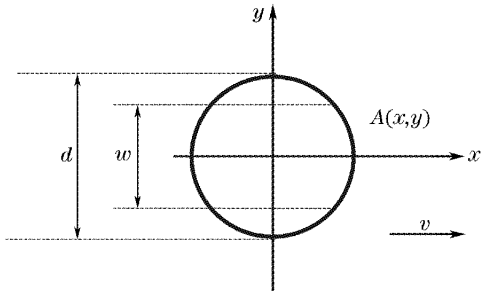


图 1 扫描激光在基片上的投射

Fig. 1 Projection of scanning laser on substrate

$$w = \sqrt{d^2 - \left[\frac{D_c v}{E(\delta, y)} \right]^2}, \quad (3)$$

其中 $E(\delta, y)$ 和 d 是待定的, D_c 和 v 是已知的。如果对于任一参考点 $A(x, y)$,若总是存在 $D(\delta, y) < D_c$,则激光束扫描后不产生线条。综上可得

$$w = \begin{cases} \sqrt{d^2 - \left[\frac{D_c v}{E(\delta, y)} \right]^2}, & E(\delta, y) = \frac{D_c v}{d} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

(4) 式即是所建立的线宽数学模型的表达式,它给出了线宽 w 与激光束光斑的辐照度 $E(\delta, y)$ 、胶层的曝光能量密度阈值 D_c 、光斑的直径 d 及光斑的运动速度 v 的定量关系,但 $E(\delta, y)$ 和 d 仍是不易直接获得的参量,需要与光源、离焦等进行关联。

图 2 给出像方光束的空间分布,现求取上半空间(z 正方向空间)任意点的辐照度 $E(\delta, r)$,由激光高斯光学可得

$$E(\delta, r) = E(\delta, 0) \exp(-2r^2/\omega_z^2), \quad (5)$$

$$E(\delta, 0) = E(0, 0) (\omega_0/\omega_z)^2, \quad (6)$$

$$E(0, 0) = 2P/(\pi\omega_0^2), \quad (7)$$

$$\omega_z = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda\delta}{\pi\omega_0^2} \right)^2}, \quad (8)$$

$$\omega_0 = \lambda/(\pi NA), \quad (9)$$

式中 ω_0 为高斯光束的束腰半径, ω_z 为离焦量 δ 处的光束名义截面半径。将(6)式~(9)式分别代入(5)式就可得到辐照度 $E(\delta, r)$ 。

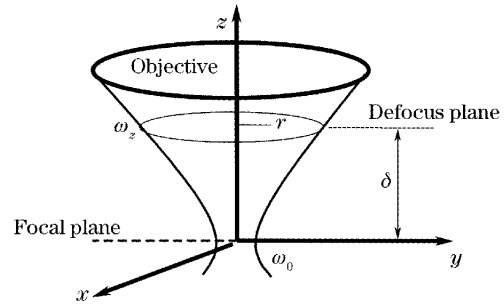


图 2 像方空间的高斯光束

Fig. 2 Gaussian beam in the image space

设定 $E(\delta, y)$ 的边界是 ω_z 为半径(即 $d = 2\omega_z$)的圆,出于计算简便,假定能量都分布在此圆域,则

$$E(\delta, y) = \frac{1}{\sqrt{\omega_z^2 - y^2}} \int_0^{\infty} E(\delta, r) dx = \frac{1}{\sqrt{\omega_z^2 - y^2}} \int_0^{\infty} E(\delta, \sqrt{x^2 + y^2}) dx = \frac{P}{\omega \sqrt{2\pi(\omega_z^2 - y^2)}} \exp\left(-\frac{2y^2}{\omega_z^2}\right), \quad (10)$$

将 $d = 2\omega_z$ 及(10)式的 $E(\delta, y)$ 代入(3)式得线宽

$$w = \sqrt{4\omega_z^2 - \frac{D_c v}{P} \omega_z \sqrt{2\pi(\omega_z^2 - w^2/4)} \exp\left(\frac{w^2}{2\omega_z^2}\right)}, \quad (11)$$

显然, (11) 式中的 w 不是显式给出的。为了直观给出线宽 w 与其它参量的关系, 进行了数值模拟计算, 结果见图 3 中的动态高斯模型 (dynamic Gaussian model) 曲线, 它给出了当其他参量确定时线宽 w 与离焦量 δ 的相互关系。

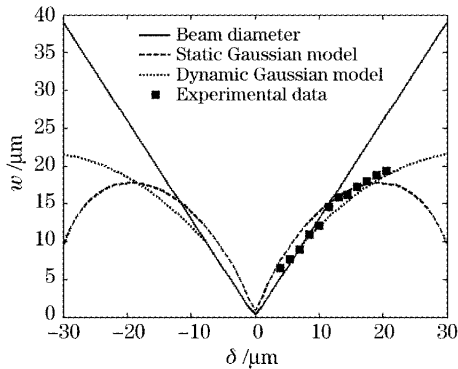


图 3 线宽模拟及其相关的实验结果

Fig. 3 Linewidth simulation and relevant experiment result

3 实验与讨论

为了验证动态高斯模型的合理性, 进行了离焦写入下的线宽实验。受激光图形发生器离焦动态范围限制, 只进行了正离焦区的试验, 同时离焦量限制在 $20 \mu\text{m}$ 左右。实验中与制取线宽相关的参量如下:

波长 $\lambda = 0.442 \mu\text{m}$;

数值孔径 $NA = 0.65$;

胶层的曝光能量密度阈值 $D_c = 100 \text{ mJ/cm}^2$;

物镜出瞳光功率 $P = 0.45 \text{ mW}$;

光斑相对扫描速率 $v = 10 \text{ mm/s}$ 。

注意, 此为某一环的数据, 其它环的数据将有不一样的 P 和 v , 其由激光图形发生器的软件依据曝光量等同原则自动生成(也可手控输入生成)。

实验制取结果见图 4, 不同环带由随机分布的多个弧线段组成, 不同弧线段的曝光量相同。在图 4 中选取线条清晰的连续离焦弧线段进行线宽测试, 测试结果(图 3 中的 experimental data)与理论模拟线宽(图 3 中的 Gaussian model)、束直径(图 3 中的 beam diameter)等同绘于图 3 中。其中束直径指离焦量 δ 处的光束名义截面半径的两倍; 静态高斯模型指不考虑光斑扫描运动但考虑离焦时得出的线宽模型(限于篇幅不展开, 可参考恩田的论文)。

图 3 表明动态高斯模型与实验结果有更好的吻合。

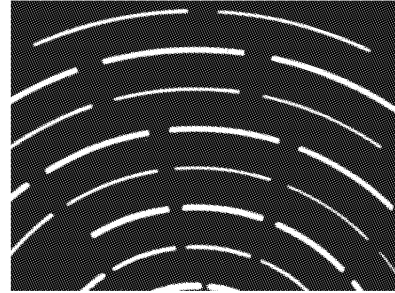


图 4 动态高斯模型的线宽实验图

Fig. 4 Experimental linewidth photo for dynamic Gaussian model

由图 3 可见, 静态高斯模型与动态高斯模型在低离焦区较接近, 同时也比较接近束直径, 但在高离焦区则有明显的分歧, 其中静态高斯模型有更早出现的极点。日本学者恩田的模型比较接近本论文提及的静态高斯模型, 其实验结果中, 理论预测和实验值在大离焦区相差太大(后者远大于前者), 显然, 本论文的动态高斯模型能更好地解释其实验结果。

4 结 论

在利用激光图形发生器制作集成光学器件时, 采用离焦方式有助于提高多线宽制作效率。但离焦制作牵涉到很多加工条件或者说参量, 比如光点扫描速度、胶层的性能、激光的光功率、光波长、光学系统参量如物镜的数值孔径等, 这些参量能否精确控制或有效预测将直接影响最终加工线宽的精度, 这使基于离焦的多线宽制作比单纯细线条拟合在线宽控制方面有更高的要求。

静态高斯模型按照高斯光束在离焦面上的中心对称径向扩展进行线宽计算, 忽略了激光束相对胶层运动而导致的沿运动方向的线宽积分效应, 因此在原理上会引入系统误差。本文提出的动态高斯模型则考虑到了光束的运动特征并在模型中引入相关参量, 因此它较好地克服了静态高斯模型在原理上的不足, 当然, 动态高斯模型在实验上也取得了更好的吻合, 这对指导离焦制作是有现实意义的。尽管如此, 动态高斯模型仍是不完善和有所欠缺的, 它简化或忽略了某些客观存在, 比如胶层内部光束的多次反射、物镜出射光的衍射效应影响等, 因此它更多

