

文章编号 1004-924X(2006)01-0139-06

模糊神经网络在 UV-LIGA 工艺优化中的应用

郑晓虎^{1,2}, 朱 荻¹

(1. 南京航空航天大学 机电工程学院, 江苏 南京 210016; 2. 淮阴工学院 机械系, 江苏 淮安 223001)

摘要:将模糊神经网络理论和算法应用于负性光刻胶(SU-8)加工高分辨率和高深宽比微结构的工艺研究,在正交试验的基础上对网络进行训练,建立了光刻图形质量与前烘时间、前烘温度、曝光量、后烘时间之间的预测模型。该模型采用五层前向模糊神经网络,学习算法为梯度下降法。进行了实验,实验结果表明,前烘温度与前烘时间对光刻质量影响最大。对 120~340 μm 厚的光刻胶,前烘温度取 95 $^{\circ}\text{C}$,前烘时间 100 min 时,图形的相对线宽差最小;超声搅拌能缩短显影时间,显著改善图形质量,试验结果与计算结果十分吻合。将模糊神经网络应用于 UV-LIGA 工艺中,能实现光刻加工微结构的工艺参数优化。

关键词:负性光刻胶;UV-LIGA;模糊神经网络;工艺参数

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A

Application of fuzzy neural network to optimizing UV-LIGA process

ZHENG Xiao-hu^{1,2}, ZHU Di¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Mechanical Department of Huaiyin Institute, Huai'an 223001, China)

Abstract: The theory and the algorithm of the fuzzy neural network were applied in the research of the fabrication of high resolute microstructure using negative (SU-8), the artificial neural network were trained based on orthogonality experiment, and the prediction model was built between the fabrication structure quality and the main technology parameters. The model was a Feedforward Fuzzy neural network possessing five layers, and Gradient Descent was adopted as learning algorithm. The experiment results show that the temperature and the soft bake time is the most important factor of the structure quality. when thickness of the photoresist is ranged from 120~340 μm , the temperature and time of the soft bake is 95 $^{\circ}\text{C}$ and 100 min, respectively, then the optimal microstructure with the least relative line width discrepancy can be obtained. In addition, the developing time is reduced and the image quality is greatly improved through ultrasonic agitation. The predict results are in good agreement with the experimental results, and the lithographic process could be optimized with fuzzy neural network.

Key words: negative photoresist; UV-LIGA; fuzzy neural network; process parameter

收稿日期:2005-08-10;修订日期:2005-10-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375073)。

1 引言

LIGA 是光刻、电镀和压模的德语简称,该技术首先由德国喀尔斯鲁厄核研究中心发明,以深层辐射 X 射线为光刻光源。环氧基紫外负性光刻胶(SU-8)是一种近几年发展起来的新型光刻胶材料,该光刻胶以紫外线(UV)为光源,不同于以前的酚醛树脂光刻胶,是一种专为高深宽比的应用而设计的环氧树脂光刻胶。其特点为:经一次旋转即可得数百微米厚的光刻胶层;在深紫外光波段内光吸收度低,故整个光刻胶层所获得的曝光量均匀一致,可得到具有垂直侧壁外形和高深宽比的厚膜图形;该光刻胶还具有良好的力学特性、抗化学腐蚀性和热稳定性^[1],能形成结构复杂的图形,在电镀时可以直接作为绝缘体使用。由于具有如此多优点,SU-8 胶正被逐渐应用于微机电和微加工等领域^[2]。采用深紫外光对 SU-8 胶进行光刻需经多道工序,涉及的工艺参数较多,而且各参数对具体的试验条件较为苛刻,不同设备及工艺条件下工艺参数存在较大的差异,相互作用关系复杂,早期的工作都是借助于经验,很难找到反映其内在规律的数学模型。

模糊系统、人工神经网络技术以及它们相互结合所组成的模糊神经网络(也称神经模糊系统)是计算智能领域研究的重要内容,为研究非线性系统提供了一种强有力的工具,在微细制造领域的应用也越来越受到重视^[3]。模糊神经网络不仅继承了模糊系统与人工神经网络各自的优点,也弥补了它们单独建模所固有的不足,集学习、联想、自适应及模糊信息处理于一体,可提高整个系统的学习能力和表达能力。本研究选择模糊神经网络技术作为 UV-LIGA 工艺的优化方法,实现了全实验域上影响因素到结果的映射,通过影响因素各水平上的连续扫描,实现全实验域上的寻优。建立了光刻图形质量与前烘时间、前烘温度、曝光量、后烘时间之间的预测模型,提出一套适用于本实验室条件下的最优工艺参数及加工高分辨率和高深宽比微结构的有效方法。

2 工艺过程和试验方案

2.1 工艺过程

本试验采用 SU-8 100 光刻胶,紫外厚胶光刻

的工艺过程为:(1)匀胶;(2)前烘(Soft Bake),前烘可采用分几步的方法,即先在 65 °C 下预热一段时间,再升至最终温度 95 °C;(3)冷却;(4)曝光(Expose),功率密度:12 mW/cm²,曝光剂量随胶厚度变化;(5)后烘(Post Expose Bake)约 30 min,后烘温度 85~95 °C,后烘后应避免快速冷却;(6)显影(Developing),显影时采用超声搅拌,时间 1~18 min;(7)漂洗,用 IPA(异丙基酒精)与去离子水清洗,然后用热空气流或氮气烘干;(8)硬烘坚膜,SU-8 有很好的机械性能,可省略。(9)电铸,采用焦磷酸铜电解液电铸。

涂胶前首先对涂有金属膜的基底进行酸洗、烘片,本次实验采用不锈钢基底。整个过程如图 1 所示。由于 SU-8 系列光刻胶的粘度较高,一次匀胶可制备较厚的胶膜,在胶膜的制备过程中采用了调整匀胶机转速的方法。匀胶设备采用国产 SJT-2/J 型匀胶机,曝光采用的设备是上海光学机械厂生产的 JKG-2A 型光刻机。实验按不同胶厚进行分组,每组以正交试验方法分别调整不同的工艺参数作对比试验。

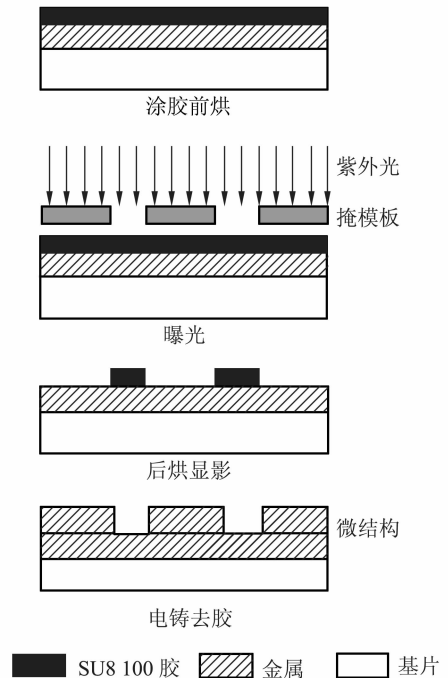


图 1 SU-8 100 胶工艺过程

Fig. 1 Process of SU-8 100

2.2 试验方案

用 SU-8 胶进行光刻加工微结构涉及多个工艺参数,不同胶厚所采用的参数相差很大,其中前

后烘温度与时间、曝光量、显影时间及显影时超声功率影响最大^[4],这些参数主要取决于光刻胶厚度。由于显影参数受光刻图形的形状、搅拌等因素影响较大,不列入神经网络模型。为选定各工艺参数的取值范围,结合以往的试验研究,对 120~340 μm 厚的光刻胶分组进行了 200 余批次的摸索性试验,确定正交实验参数为:前烘温度、前烘时间、后烘时间、曝光时间 4 因素,采用 4 水平。根据不同胶厚,正交试验按照 L16(4⁵) 正交表进行。指标项目为光刻胶图形整体质量(Total Figure Quality, TFQ)与相对线宽差(Relative Line Width Difference, RLWD),相对线宽差指显影后图形尺寸与掩模板尺寸之差再除以掩模板尺寸,用 RLWD 可以评价形成图形的尺寸精度。表 1 是胶厚度为 300 μm 因素水平表,其中后烘温度固定为 95 ℃。

表 1 因素水平表

Tab. 1 Factor and level table

因素	水平			
	1	2	3	4
前烘温度 /℃	80	85	90	95
前烘时间 /min	60	80	100	120
后烘时间 /min	20	30	40	50
曝光时间 /s	300	360	420	480

3 模糊神经网络模型

该模糊神经网络为一个五层前馈神经网络,其连接权值、输入和输出都由模糊数给出。输入层节点数、第二层节点数、第三层节点数、第四层节点数分别用 n, m, p 和 k 来表示。如果将一个 n 维向量 $x_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 作为输入向量,那么整个网络的输入输出关系可用图 2 表示。

第一层 为输入变量层,其作用只是将输入变量传送到下一层。输入变量即为所要控制的工艺参数或影响产品性能指标的因素。按表 1,系统有 4 个输入变量,每个变量在其论域上分为 4 个模糊子集。具体规则见图 3,取 S=1, MS=2, M=3, B=4。

第二层 是将前一层输入的变量划分为隶属函数为高斯型的模糊区间套。输入 x_i 满足模糊子集 x_{ij} 的隶属函数为:

$$o_{yj}(x_i) = \mu_{x_{ij}}(x_i) = \exp \left[- \sum_{i=1}^4 \frac{(x_i \cdot \omega_{ji} - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2} \right]$$

$$j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中, m_{ij}, σ_{ij} 分别为函数的均值和方差,是需要优化调整的隶属函数参数。

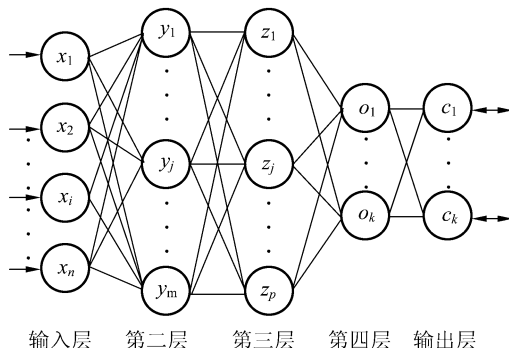


图 2 模糊神经网络结构图

Fig. 2 Structure of the fuzzy neural network

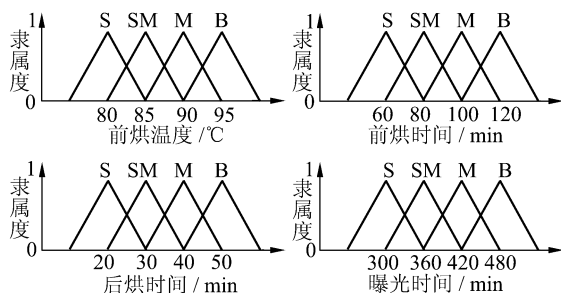


图 3 规则定义图

Fig. 3 Definition of the regulation

第三层 代表模糊规则库,每一节点表示对前一层与它相关联的所有节点输出进行“与”运算。该层的神经元个数就是规则数,系统最多有 256 条规则。其输出为:

$$o_{z_j} = \min[\mu_{j1}, \mu_{j2}, \dots, \mu_{jm}] \quad j=1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

第四层 代表模糊规则结论部分,每一节点表示对前一层与它相关联的所有节点输出进行“或”运算,并由权系数 ω_{ji} 相连接。该层节点输出为:

$$o_{o_j} = \max \left[\sum_{j=1}^p \beta_j \cdot \omega_{ji} \right]$$

$$i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

$$\beta_j = o_{z_j} / \sum_{j=1}^k o_{z_j} \quad j=1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

第五层 为系统输出层。该层完成中心平均反模糊化操作,以得到数值型输出。到此,网络的输出已确定,需要学习的参数为 m_{ij} 、 σ_{ij} 和 ω 。

网络学习算法采用梯度下降法,设 d_p 为在第 p 组样本输入时的期望输出 E_p 为网络的目标函数,定义

$$E_p = \frac{1}{2} \|d_l - o_l\| = \frac{1}{2} \sum_l [d_l - o_l]^2, \quad (5)$$

式中 o_l 为第 p 组样本输入时,经权值调整网络的输出, l 是输出层第 l 个节点。

作为对网络学习状况的评价。

判别:若

$$E_p \leq \epsilon, \quad (6)$$

ϵ 是预先确定的, $\epsilon \geq 0$

则算法结束,否则按 BP 算法^[5]逐层调整权值。

文中网络训练次数取 1 000;网络的输入输出需分别进行正规化处理。由于不同胶厚试验参数变化较大,为提高预测精度及计算效率,样本按胶厚变化进行分组,构建不同胶厚的预测网络。

4 结果与讨论

4.1 结果

为检验预测模型的可靠性与实用性,对 SU-8 胶光刻工艺参数:前后烘温度与时间,曝光量进行了网络学习,并与试验结果进行了比较。模型的输入节点数为 4 个工艺参数,输出指标项分别为图形整体质量与相对线宽差。图形总体质量分为 4 个等级:0(个别图形倒塌或变形)、1(一片图形倒塌、变形)、2(两片图形倒塌、变形)、3(多片图形倒塌、变形);相对线宽差用图形尺寸与掩模板尺寸相对差值的百分数表示,分为 4 个等级:0($\leq 1\%$)、1(1%–2%)、2(2%–3%)、3($\geq 3\%$)。为保证网络训练准确可靠,同时又具有一定的推广能力,在正交试验 16 组数据中选择 13 组作为训练样本,余下的 3 组以及正交优化工艺作为检测样本。经过 1 000 次训练,300 μm 胶厚的预测结果与试验数据的比较见表 2。从表 2 可以看出训练样本和检测样本的网络实际输出值与实验值都很接近,说明应用神经网络描述光刻图形质量与前烘时间、前烘温度、曝光量(时间)、后烘时间之

间的预测模型是十分有效的。表 3 是针对不同胶厚利用网络模型优化得到的工艺参数。

4.2 讨论

试验中发现上述 4 个参数所起作用各不相同。分述如下^[6]:

(1) 前烘温度与前烘时间对光刻质量影响最大。前烘的作用是蒸发胶中的溶剂,为曝光反应提供催化剂,时间根据光刻胶厚度增加而增大。若时间过短产生的催化剂少,后烘时胶交联不完全,图形与基底的结合力小、整体质量差。若时间过长对厚胶结构影响明显,使胶的内应力增大。同时为不影响胶中光引发剂的感光性,前烘温度控制在 80~95 $^{\circ}\text{C}$ 范围内。图 4 为 300 μm 胶厚时前烘温度、前烘时间与相对线宽差的关系图。显然,前烘温度取 95 $^{\circ}\text{C}$,前烘时间大于 100 min 时图形的相对线宽差最小;

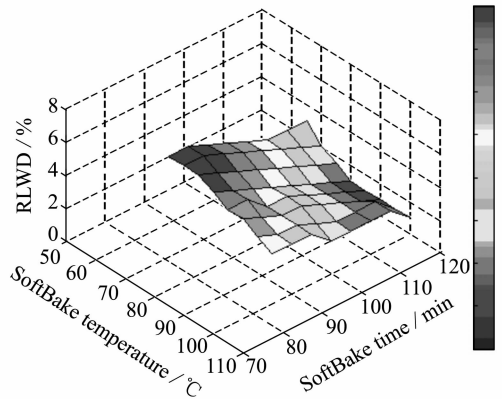


图 4 前烘温度、前烘时间与相对线宽差

Fig. 4 Soft bake and the relative line width difference

(2) 曝光使胶发生光化学反应产生催化剂,因此必须保证足够的时间。曝光量主要影响图形的线宽差,过高的曝光时间导致线宽差变大,特别当胶厚度超过 320 μm 时,底面与顶面实际曝光量误差较大,这与光的基底的反射等因素有关;

(3) 对曝光后的 SU-8 胶进行后烘热处理,目的是使经曝光的胶发生反应,得到交联的 SU-8 胶结构,后烘时间短将影响图形的整体质量,表现为显影时图形多处出现脱落、钻蚀现象。试验表明:后烘时间超过 40 min 后,图形质量无明显变化;

(4) 显影直接影响图形质量,时间根据厚度

不同一般在 18 min 以内,具体受图形形状、深宽比、搅拌强度等因素的影响较大。显影时加超声搅拌能缩短显影时间,显著改善图形质量;

需要注意的是:在烘烤过程中应避免激冷激热。研究中还发现:随着光刻胶厚度的变化,各工艺参数对图形质量的影响程度也发生变化(如前烘时间),并且相互制约,显然各工艺参数与光刻图形质量之间呈复杂的非线性关系。在前面工艺

研究的基础上,将 SU-8 100 的紫外厚胶光刻技术用于微结构的制作工艺中,图 5 是微机械平面线圈的 SU-8 100 胶微结构,图 6 是以预测工艺参数做出的 SU-8 100 胶微结构为模板经后序电铸铜工艺制作出的孔板。采用该预测模型提供的工艺参数可以制造具有高深宽比、结构精细、侧壁陡峭、表面光滑的微结构及 MEMS 器件,如微机械马达等。

表 2 神经网络预测值

Tab.2 Prediction of the ANN

试验编号	前烘温度 / °C	前烘时间 / min	后烘时间 / min	曝光时间 / s	相对线宽差 / %		图形整体质量	
					试验值	预测值	试验值	预测值
1	80	60	20	300	4.29	4.36	3	4
2	80	80	30	360	3.22	2.97	3	3
3	80	100	40	420	2.33	2.27	2	2
4	80	120	50	480	1.62	1.40	1	1
5 *	85	60	30	420	3.61	3.55	3	3
12 *	90	120	50	420	1.21	1.32	0	0

注: * 检测样本值,试验编号 12 为正交优化工艺

表 3 最优工艺参数

Tab.3 Optimal process parameters

厚度 [/ μm]	前烘时间 [/ min]		曝光时间 [/ s]	后烘时间 [/ min]		显影时间 * [/ min]
	65 °C	90 °C		65 °C	95 °C	
120	20	50	150	20	20	8
180	20	70	200	20	25	12
250	20	100	300	20	40	15
300	20	120	420	20	50	18

注: * 显影时加超声

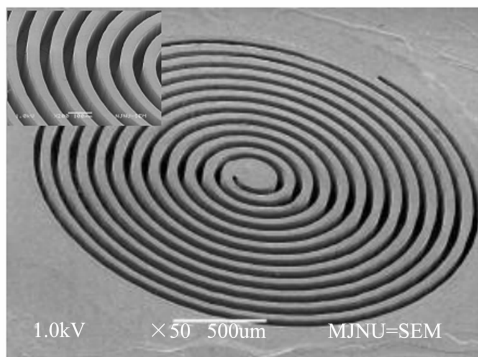


图 5 微机械平面线圈

Fig.5 MEMS planar coil

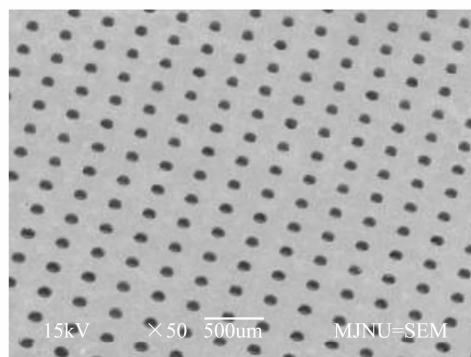


图 6 孔板

Fig.6 Board with the array hole

5 结 论

紫外厚胶光刻技术与 LIGA 技术相结合形成的 UV-LIGA 技术,是高深宽比微机械加工技术的关键工艺。对 SU-8 系列光刻胶的紫外厚胶光刻工艺进行了研究,在正交实验基础上建立起光

刻图形质量与工艺过程参数前烘时间、前烘温度、曝光量、后烘时间之间的映射模型。该模型的建立为光刻工艺过程这种多变量、非线性系统实现全实验域上的寻优提供了一个有效的工具。实现了高分辨率,高深宽比,侧壁陡直度较好的光刻图形的制造,为复杂结构的三维微机械器件的制作奠定了基础。

参考文献:

- [1] KOO H, LIU K, TSENG F. Mechanical strength and interfacial failure analysis of cantilevered SU-8 microposts [J]. *Micromech. Microeng.*, 2003, 13: 822-831.
- [2] ZHANG J, TAN L K, GONG Q H. Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its application in micro-electro-mechanical systems [J]. *Polymer Testing*, 2001, 20: 693-701.
- [3] HONG S J, CHOI S K, CHOL Y S, *et al.* Characterization of low-temperature SU-8 photoresist processing for MEMS applications [C]. 2004 *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, Hawaii.*, 2004: 404-408.
- [4] 杨承, 黄成军, 刘峰, 等. 毛细管电泳芯片制备工艺研究[J]. *华中科技大学学报*, 2004, 32(7): 92-94.
YANG CH, HUANG CH J, LIU F, *et al.* Study of microfabrication of capillary electrophoresis chip[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition)*, 2004, 32(7): 92-94. (in Chinese)
- [5] 王士同. 神经模糊系统及其应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
WANG SH T. *Fuzzy neural system and its application* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998.
- [6] 张立国, 陈迪, 杨帆, 等. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 266-269.
ZHANG L G, CHEN D, YANG F, *et al.* Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 266-269. (in Chinese)

作者简介: 郑晓虎(1972—), 男, 博士研究生, 淮阴工学院讲师, 主要研究方向为微机电系统及微细制造技术。E-mail: hyzxxh@126.com

朱 获(1954—), 男, 南京航空航天大学机电学院, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者计划特聘教授, 主要从事特种加工技术研究。