

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.03.018

光纤阵列的超声椭圆振动辅助化学机械抛光*

陈涛^{a,b}, 刘德福^{a,b}, 余亦曦^a, 严日明^a

(中南大学 a. 机电工程学院, b. 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 为了获得平整的光纤阵列端面, 设计了一套超声椭圆振动辅助化学抛光系统, 并进行常规化学机械抛光和超声椭圆振动辅助化学机械抛光的对照试验。结果表明, 应用超声椭圆振动辅助化学机械抛光技术加工光纤阵列, 选择合理的抛光工艺参数, 可获得质量较好的光纤阵列端面, 相比于常规化学机械抛光技术, 光纤的表面粗糙度降低了25%。采用单因素试验法, 分别研究了抛光粒子材料及抛光液酸碱性对于超声椭圆振动辅助化学机械抛光的作用效果, 并利用Veeco表面轮廓仪对抛光后光纤阵列端面进行观察和分析。采用正交试验法获得了一组超声椭圆振动辅助化学机械抛光光纤阵列的优化工艺参数, 最佳工艺参数组为: 超声振动频率25 kHz, 抛光液流量35 mL/min, 抛光压力50 kPa, 抛光盘转速20 r/min, 抛光粒子质量分数0.5%。

关键词: 光纤阵列; 超声椭圆振动; 化学机械抛光; 表面粗糙度

中图分类号: TG175 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2016)03-0132-07

Ultrasonic Elliptical Vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing for Fiber Array

CHEN Tao^{a,b}, LIU De-fu^{a,b}, SHE Yi-xi^a, YAN Ri-ming^a

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering, b. State Key Laboratory of high performance complex manufacturing, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: In order to obtain a flat end face of fiber array, an ultrasonic elliptic vibration assisted chemical polishing system is designed, which is used for conducting a controlled trial between routine chemically mechanical polishing and the ultrasonic elliptic vibration assisted chemical mechanical polishing. The experiments shows that applying ultrasonic elliptic vibration assisted chemical mechanical polishing to process fiber array with reasonable process parameters can get better quality of end face of which roughness declines 25% compared with using routine chemically mechanical polishing. Via single factor experiments, we do the researches of analyzing the effect to ultrasonic elliptic vibration assisted chemical mechanical polishing by controlling two factors, polishing particle and the pH of the polishing solution. And we also utilize Veeco surface profiler to assay and observe the polished end face of fiber array. Orthogonal experiment method is used to get a group of process parameters of ultrasonic elliptic vibration assisted chemical mechanical polishing fiber array, which is that the frequency of ultrasonic is 25 kHz, the flow quantity of polishing solution is 35 mL/min, the pressure of polishing is 50 kPa, the speed of the polishing disc is 20 r/min, the mass fraction of the polishing particle is 0.5%.

Keywords: fiber array; ultrasonic elliptical vibration; chemical mechanical polishing; surface roughness

0 引言

光纤阵列(Fiber Array, FA)是集成光波导器件的重要组成部分, 它采用直接对接耦合合法与光电

子芯片的光路相连接, 其端面制造质量直接影响光通信的质量^[1]。

光纤阵列如图1所示, 主要由光纤、V型槽、

收稿日期: 2015-11-03; 修回日期: 2016-05-08; 基金项目: *国家自然科学基金(51275534); 湖南省自然科学基金(2015JJ2153)

通讯作者: 刘德福(1971—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 精密制造; Tel: (0731) 8887 6248; E-mail: liudefu@csu.edu.cn

网络出版日期: 2016-06-20 09:34; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160620.0934.034.html>

引文格式: 陈涛, 刘德福, 余亦曦, 等. 光纤阵列的超声椭圆振动辅助化学机械抛光[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 132-138. CHEN T, LIU D F, SHE Y X, et al. Ultrasonic elliptical vibration assisted chemical mechanical polishing for fiber array[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 132-138.

盖板以及UV固化胶等组成,其中光纤及盖板部分由石英玻璃材料制成,V型槽由单晶硅材料制成,UV固化胶材料为复杂有机物。3种材料的物理及化学性质均存在着明显差异。在对光纤阵列端面进行抛光时,材料性质差异会导致三者的去除效果有明显不同,从而影响整个光纤阵列端面抛光的效果。

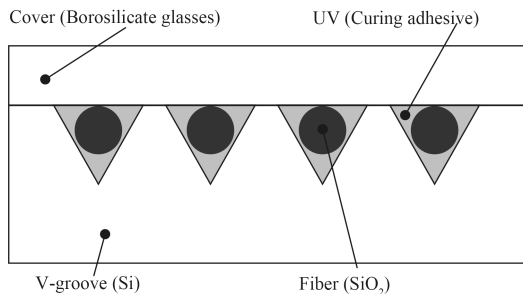


图1 光纤阵列的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of fiber array

目前,光纤阵列的端面抛光主要是采用化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, 简写CMP)技术。化学机械抛光避免了机械抛光容易划伤表面和化学抛光速度慢、表明平整度低及抛光一致性差的特点,已被广泛应用于硬脆材料超精密加工中^[2]。

超声椭圆振动辅助加工技术在硬脆材料的加工方面有着得天独厚的优势,表现出许多优良的加工效果,可提高工件的加工效率、降低表面粗糙度、提高加工精度^[3-5]。若将超声椭圆振动用于化学机械抛光过程,抛光效果也得到了明显的改善^[6]。

文中设计了一套夹心式模式转换型超声椭圆振动辅助化学机械抛光装置并进行了超声椭圆振动辅助化学机械抛光(Ultrasonic Elliptical Vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing, 简写UEV-CMP)实验研究。通过对比不同压力下常规化学机械抛光技术与超声椭圆振动辅助化学机械抛光对光纤阵列端面的抛光效果,得到了超声椭圆振动辅助作用对光纤阵列端面抛光的作用规律,并通过正交试验得到一组超声椭圆振动辅助化学机械抛光的最优工艺参数。

1 试验装置

设计的光纤阵列超声椭圆振动辅助化学机械

抛光试验装置示意图如图2所示。在该试验装置中,光纤阵列被固定在超声振动系统下方模式转换圆盘的圆周位置,并在超声振动系统重力作用下与抛光垫表面发生接触并进行抛光。超声振动系统由精密弹簧及光纤阵列端面共同提供支撑,通过控制弹簧拉力的大小以实现光纤阵列抛光压力的调节。抛光盘通过行星齿轮带动进行旋转运动,避免光纤阵列与抛光垫同一位置反复接触。

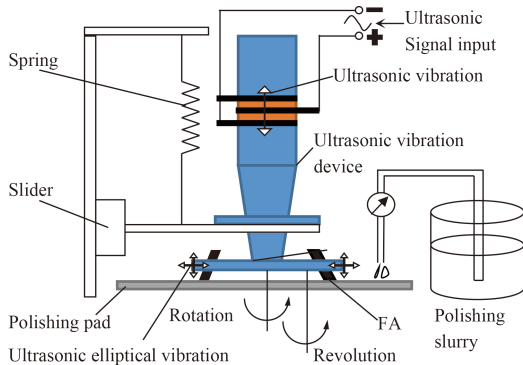


图2 光纤阵列超声椭圆振动辅助化学机械抛光系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic elliptical vibration assisted chemical mechanical polishing system for fiber array

超声振动系统由超声换能器、超声变幅杆及模式转换圆盘3部分组成。超声换能器中压电陶瓷组在受到超声发生器发出的超声电信号后,将激发超声换能器产生纵向机械振动,纵向机械振动通过变幅杆的放大作用后在模式转换圆盘中心位置产生一个中心激励作用,使得模式转换圆盘产生弯曲振动,并最终在圆盘圆周位置形成轴向和径向两个方向的超声振动,即超声椭圆振动。根据抛光所需要的超声振动频率的不同,可以在抛光试验装置上安装不同振动频率的超声振动装置。超声加工常用的振动频率为20 k~40 kHz。文中分别设计了工作频率为25、30和35 kHz的3套超声振动装置,纵向振幅为4 μm ,横向振幅为2 μm 。

在常规化学机械抛光过程中,夹持器将待抛光试件以一定载荷垂直压紧在工作台的抛光垫上,工作台和试件保持相对运动,同时将抛光液不断加入试件与抛光垫之间。抛光垫通常由聚氨酯等多孔材料制成以便抛光液渗入其中。抛光液中含有硬质磨粒和多种化学物质,其中的化学物质与试件发生反应形成变质层,然后通过抛光垫

及硬质磨粒与试件间的机械摩擦作用将变质层去除^[7]。但是由于抛光压力的存在,使得试件与抛光垫始终保持紧密接触,抛光液不易进入抛光区域,从而降低了抛光液的利用率,进而影响工件抛光质量与抛光效率。因此,将超声椭圆振动与上述常规化学机械抛光技术相结合形成了超声椭圆振动辅助化学机械抛光技术,与常规化学机械抛光相比,由于纵向振动在光纤阵列与抛光垫之间形成空化作用,使得抛光区域内的抛光液流速加快,流速加快的抛光液对抛光垫产生了较好的清洗作用,减小了磨屑在抛光垫上的沉积,保证了抛光垫始终处于一个良好的工作状态;另外由于横向振动可以产生较大的切向力和切向速度,从而使得光纤阵列材料去除率得到了提高^[8]。

2 超声振动辅助化学机械抛光效果验证试验

在图2所示的抛光试验装置上进行试验,对比光纤阵列的常规化学机械抛光与超声椭圆振动辅助化学机械抛光的表面质量。抛光工艺参数如表1所示。常规和超声辅助化学机械抛光的光纤阵列样品数均为12个。

表 1 光纤阵列的常规化学机械抛光与超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺参数
Table 1 Process parameters of conventional CMP and UEV-CMP for fiber array

Parameters	Value
Frequency of ultrasonic vibration/kHz	0.35
The original surface roughness of FA Ra/μm	0.25
Polishing pad material	Polyurethane
Polishing particles	SiO ₂
Diameter of polishing particles/nm	50
Concentration of polishing articles/%	5
Composition of polishing slurry	PEG800,NaOH,H ₂ O
Supplies of polishing slurry/(mL·min ⁻¹)	25
Polishing time/min	30
Polish pressure/kPa	10,30,50,70,90

经过30 min的抛光之后,采用美国Veeco公司WYKO NT9100型光学表面轮廓仪对抛光后光纤阵列端面进行观察,并得到图3所示的光纤阵列抛光后端面整体及光纤端面表面形貌和图4所示的光纤阵列端面及光纤端面的表面粗糙度值。

通过对比常规化学机械抛光及超声椭圆振动辅助化学机械抛光得到的光纤阵列端面和光纤端

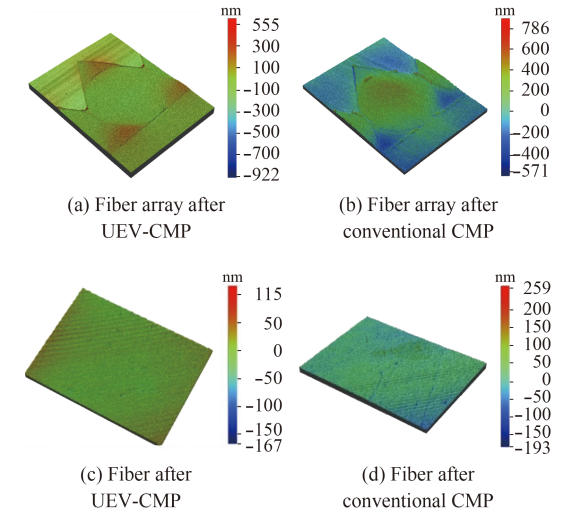


图 3 常规化学机械抛光和超声椭圆振动辅助化学机械抛光后光纤阵列端面表面形貌

Fig. 3 Surface topographies of the fiber array end-face after conventional CMP and UEV-CMP

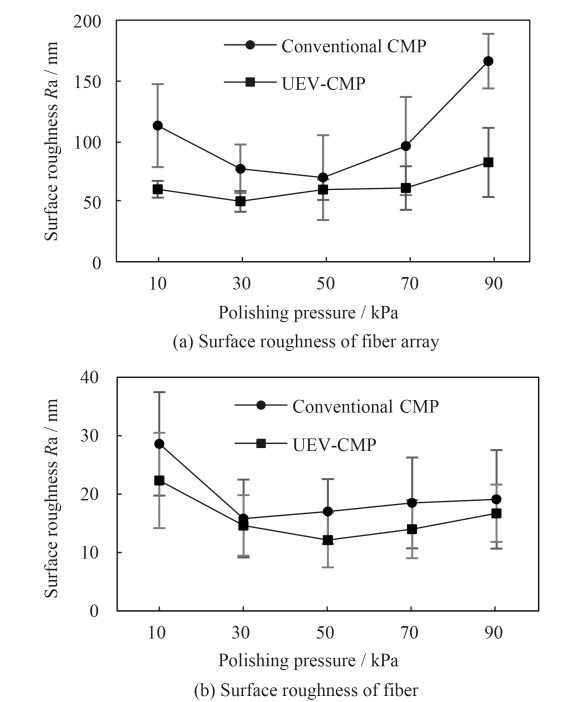


图 4 不同抛光压力下常规化学机械抛光和超声椭圆振动辅助化学机械抛光后光纤阵列及光纤端面的表面粗糙度

Fig. 4 Surface roughness of the fiber array and fiber after conventional CMP and UEV-CMP with different pressures

面的形貌,如图3所示,可以看出,在常规化学机械抛光中引入超声椭圆振动辅助作用,不仅有利于光纤阵列表面粗糙度的降低,同时减少了表面的划痕、凸起及凹陷等表面缺陷的发生。

由图4(a)可知,当抛光压力为30 k~50kPa时,常规化学机械抛光光纤阵列整体端面表面粗糙

度最小为78 nm, 超声椭圆振动辅助化学机械抛光光纤阵列整体端面表面粗糙度最小为50 nm。抛光压力过大或者过小都会对光纤阵列的超声椭圆振动辅助化学机械抛光质量产生较大的影响。较小的抛光压力导致抛光垫与光纤阵列端面接触不充分, 机械去除作用较小, 导致整个端面的材料去除率减小, 抛光效率降低。较大的抛光压力则导致机械去除作用增强, 材料去除率增加, 同时, 较大的抛光压力导致抛光液难以进入抛光区域, 进而引起抛光液润滑散热效果变差、抛光区域局部温度过高、碎屑难以从抛光区域排出等问题, 影响了抛光质量的提高。

相对于常规化学机械抛光, 在其他抛光条件不变的情况下, 超声椭圆振动辅助化学机械抛光得到的光纤阵列端面的表面粗糙度有明显下降。这是因为常规化学机械抛光对光纤阵列端面的单晶硅、二氧化硅、盖板以及固化胶4种材料的材料去除率不同, 影响了端面整体表面粗糙度的降低。而超声椭圆振动辅助化学机械抛光对光纤阵列端面几种材料的去除一致性较好, 从而降低了端面整体的表面粗糙度。由图4(b)可知, 超声椭圆振动辅助化学机械抛光对于二氧化硅光纤的抛光效果同样有所提高。抛光压力为30 k~50 kPa时, 常规化学机械抛光光纤最小表面粗糙度为16 nm, 超声椭圆振动辅助化学机械抛光光纤最小表面粗糙度为12 nm。

可以看出, 在光纤阵列化学机械抛光中引入超声椭圆振动, 明显提高了光纤阵列的抛光质量, 在最佳抛光压力下, 光纤阵列端面整体表面粗糙度降低了37%, 光纤表面粗糙度降低了25%。

3 超声椭圆振动辅助化学机械抛光的工艺参数优化

为确定每个因素的变化水平, 首先针对抛光粒子材料及抛光液酸碱性分别做单因素试验, 抛光工艺参数如表2所示, 抛光结果如图5所示。由图5(a)可得, 采用含有二氧化硅粒子的抛光液对光纤阵列端面整体抛光效果较好, 二氧化硅及二氧化铈粒子的抛光液对光纤端面抛光效果较好。

经过进一步试验研究发现含有二氧化铈粒子的抛光液对于单晶硅的材料去除率较低而对石英玻璃的材料去除率较高, 含有氧化铝粒子的抛光液对于石英玻璃的材料去除率较高而对单晶硅的

表 2 光纤阵列的超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺参数

Parameters	Test of polishing particles	Test of pH value of polishing slurry
Frequency of ultrasonic vibration / kHz	35	35
Polishing pressure / kPa	30	30
Polishing speed / (r·min ⁻¹)	25	25
Concentration of polishing particles / %	5	5
Supplies of polishing slurry / (mL·min ⁻¹)	25	25
Diameter of polishing particles / nm	50	50
Polishing time / min	30	30
Polishing particles	SiO ₂ ,CeO ₂ ,Al ₂ O ₃	SiO ₂
pH value of polishing slurry	7	5,7,10

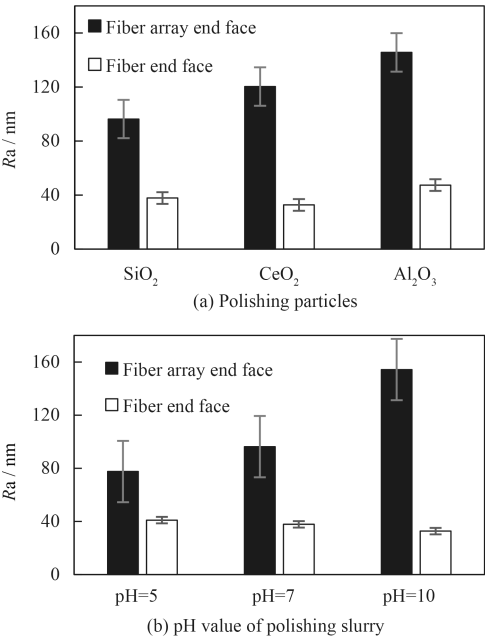


图 5 抛光粒子材料与抛光液pH值对抛光后表面粗糙度的影响
Fig. 5 Effect of polishing particles and pH value of polishing slurry on surface roughness after polishing

材料去除率较低, 而含有二氧化硅粒子的抛光液对于单晶硅及石英的材料去除率比较一致。因为光纤阵列端面由异质材料组成, 采用含有二氧化铈或氧化铝粒子的抛光液进行抛光可能会因为不同材料去除率存在较大差异而在抛光端面产生明显斜面或台阶面。含有二氧化硅粒子的抛光液对单晶硅和石英去除率较为一致, 因此抛光效果较好。由此在超声椭圆振动辅助化学机械抛光中采用含有二氧化硅粒子的抛光液对光纤阵列端面进行抛光。

由图5(b)可以看出, 光纤阵列端面在pH为5的酸性(HF)抛光液作用下抛光效果较好。进一步研究发现, 采用碱性抛光液抛光后的光纤阵列中起连接作用的UV固化胶突出明显, 而采用酸性抛光液抛光的光纤阵列端面较为平坦。这是因为光纤阵列由异质材料组成, 碱性抛光液对UV固化胶的去除效果不佳, 容易产生UV固化胶的凸起, 影响光纤阵列端面的全局平坦化, 而酸性抛光液能够通过化学去除作用对UV固化胶进行软化并去除, 有利于光纤阵列端面全局平坦化, 因此, 在光纤阵列的超声椭圆振动辅助化学机械抛光过程中采用pH值为5的酸性抛光液对光纤阵列进行抛光。

然后针对超声振动频率、抛光盘转速、抛光压力、抛光液中磨粒浓度以及抛光液流量5个抛光工艺因素进行试验, 并确定5个因素的试验水平如表3所示。在进行正交试验过程中, 通过更换超声椭圆振动装置实现超声振动频率的改变, 通过调节抛光机调速旋钮实现抛光转速的改变, 通过调节精密弹簧实现抛光压力的改变, 通过更换抛光液实现抛光液浓度的调整, 通过流量计控制流量水平的变化。

表 3 光纤阵列超声椭圆振动辅助化学机械抛光正交试验水平表
Table 3 Factors and levels of UEV-CMP orthogonal tests for fiber array

Factor	Code	Levels		
		1	2	3
Frequency/kHz	A	25	30	35
Rotational speed/(r/min)	B	10	20	30
Pressure/ kPa	C	25	50	75
Concentration/%	D	0.5	2	5
Flow/mL·min ⁻¹	E	15	25	35

根据因素水平表选用L27(3¹³)正交表进行试验, 将各因素按照A、B、C、D、E的顺序安排在L27(3¹³)的第1、2、5、8、11列, 交互作用A×B安排在第3、4列, 交互作用A×C安排在第6、7列, 交互作用A×D安排在第9、10列。抛光后光纤阵列端面整体表面粗糙度与光纤粗糙度见表4。

利用极差分析法对光纤阵列超声椭圆振动化学机械抛光结果进行分析, 如表5、表6所示。其中, K_{ij} 表示第*j*列的因素第*i*水平试验结果表面粗糙度之和, k_{ij} 表示第*j*列的因素第*i*水平试验结果表面

表 4 超声椭圆振动辅助化学机械抛光正交试验结果
Table 4 Result of UEV-CMP orthogonal tests for fiber array

Number		Ra of FA	Ra of fiber
1	L ₂₇ (3 ¹³)	135.1	20.3
2		33.2	11.2
3		81.1	28.3
4		33.3	24.9
5		48.4	22.7
6		55.0	13.7
7		67.0	25.6
8		40.1	8.3
9		46.5	30.3
10		71.9	35.3
11		41.7	22.2
12		55.9	35.4
13		82.9	32.3
14		72.5	25.1
15		46.5	9.1
16		35.4	21.1
17		72.7	25.7
18		114.6	60.6
19		49.2	14.6
20		82.5	15.1
21		53.5	14.7
22		94.8	15.7
23		40.9	7.7
24		119.8	13.8
25		185.5	41.3
26		69.3	9.4
27		106.3	19.8

粗糙度的平均值, K_{ij} 与 k_{ij} 之间关系为:

$$k_{ij}=\frac{k_{ij}}{\text{第}j\text{列中第}i\text{水平试验次数}} \tag{1}$$

R_j 表示第*j*列因素的极差水平, 即第*j*列因素最大值与最小值之差:

$$R_j = \text{MAX}(k_{ij}) - \text{MIN}(k_{ij}) \tag{2}$$

根据极差*R*的大小, 首先可以确定各个因素的重要程度。对于光纤阵列端面表面粗糙度来说, 5个因素及3个交互作用的重要性从大到小的顺序为: A×B、A、C、B、A×D、A×C、E、D; 对于光纤表面粗糙度来说, 5个因素及3个交互作用的重要性从大到小的顺序为: A、C、D、B、E、A×D、A×B、A×C。

表 5 超声椭圆振动辅助化学机械抛光正交试验的光纤阵列端面表面粗糙度极差分析计算表

	Table 5 Extreme difference analysis sheet of UEV-CMP orthogonal tests for fiber array										
	A	B	A×B		C	A×C		D	A×D		E
K_{1n}	540	603.9	728.1	812.7	755.1	645.3	702	659.7	677.7	749.7	685.8
K_{2n}	594	594	666.9	544.5	501.3	591.3	667.8	635.4	584.1	604.8	666.9
K_{3n}	801.9	737.1	540.9	578.7	679.5	699.3	565.2	639.9	674.1	671.4	583.2
k_{1n}	60.0	67.1	80.9	90.3	83.9	71.7	78.0	73.3	75.3	83.3	76.2
k_{2n}	66.0	66.0	74.1	60.5	55.7	65.7	74.2	70.6	64.9	67.2	74.1
k_{3n}	89.1	81.9	60.1	64.3	75.5	77.7	62.8	71.1	74.9	74.6	64.8
R_j	29.1	15.9	20.8	29.8	28.2	12	15.2	2.7	10.4	16.1	11.4

表 6 超声椭圆振动辅助化学机械抛光正交试验的光纤端面表面粗糙度极差分析计算表

	Table 6 Extreme difference analysis sheet of UEV-CMP orthogonal tests for fiber										
	A	B	A×B		C	A×C		D	A×D		E
K_{1n}	185.3	197.1	204.4	196.8	231.1	208.1	192.1	150.2	174.5	221.1	236.4
K_{2n}	266.8	165.0	224.7	213.1	147.4	179.2	218.9	232.1	200.2	185.8	173.1
K_{3n}	152.1	242.1	175.1	194.3	225.7	216.9	193.2	221.9	229.5	197.3	194.7
k_{1n}	20.6	21.9	22.7	21.9	25.7	23.1	21.3	16.7	19.4	24.6	26.3
k_{2n}	29.6	18.3	25.0	23.7	16.4	19.9	24.3	25.8	22.2	20.6	19.2
k_{3n}	16.9	26.9	19.5	21.6	25.1	24.1	21.5	24.9	25.5	21.9	21.6
R_n	12.7	8.6	5.5	2.1	9.3	4.2	3.0	9.1	6.1	3.9	7.0

其次, 根据各因素重要程度, 可以按照先后顺序确定各因素的水平。针对光纤阵列端面表面粗糙度, 可以确定超声振动频率为25 kHz、抛光盘转速为20 r/min、抛光压力为50 kPa、抛光液粒子质量分数为0.5%、抛光液流量为35 mL/min; 针对光纤表面粗糙度, 确定上述5因素的因素水平选择: 超声椭圆振动辅助作用的振动频率为35 kHz; 抛光压力为50 kPa; 抛光盘转速为20 r/min; 抛光液粒子质量分数为0.5%; 抛光液流量为25 mL/min。

由于获得最佳光纤阵列端面表面粗糙度和最佳光纤表面粗糙度的工艺参数的差异, 不能完全获得各因素的最佳水平, 因此画出各个因素的水平趋势图如图6、图7所示。

综合极差分析表与水平趋势图, 考虑到当超声振动频率由25 kHz上升至35 kHz时, 端面整体表面粗糙度均值上升了29.1 nm, 光纤表面粗糙度均值只下降了3.7 nm; 当抛光液流量由25 mL/min上升至35 mL/min时, 端面整体表面粗糙度均值减小了9.3 nm, 而光纤表面粗糙度均值仅升高了2.4 nm。因此, 抛光时超声振动频率选择25 kHz, 抛光液流量选择35 mL/min。其它3个因素水平为: 抛光压力50 kPa, 抛光盘转速20 r/min, 抛光粒子

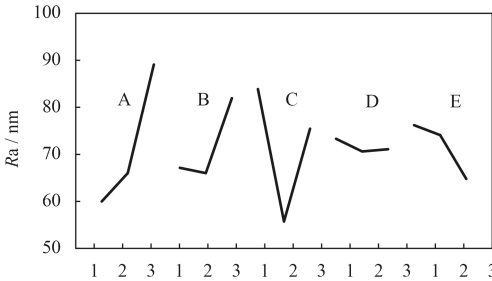


图 6 超声椭圆振动辅助化学机械抛光后的光纤阵列端面表面粗糙度与因素关系

Fig. 6 Relationship between factors and surface roughness of fiber array after UEV-CMP

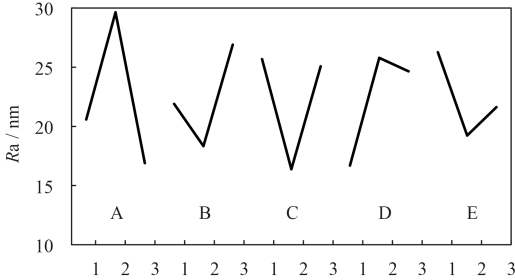


图 7 超声椭圆振动辅助化学机械抛光后的光纤端面表面粗糙度与因素关系

Fig. 7 Relationship between factors and surface roughness of fiber after UEV-CMP

质量分数0.5%。因此, 最终得到的超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺参数如表7所示。

表 7 光纤阵列超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺参数
Table 7 Process parameters of UEV-CMP for fiber array

Factor	Value
Frequency/ kHz	25
Rotational speed/ r/min	20
Pressure/ kPa	50
Concentration/%	0.5
Flow/(mL·min ⁻¹)	35

为了保证超声椭圆振动辅助化学机械抛光工艺参数的合理性,对得到的工艺参数组进行验证试验。试验得到光纤阵列整体表面粗糙度均值 $Ra=29.7\text{ nm}$;光纤表面粗糙度均值 $Ra=7.5\text{ nm}$,抛光结果优于正交试验组中已有的27组试验结果,达到了预期目标。

4 结 论

(1)化学机械抛光中引入超声椭圆振动作用,有利于降低光纤阵列表面粗糙度,在相同工艺条件下,相比于常规化学机械抛光,超声椭圆振动辅助化学机械抛光使光纤阵列端面表面粗糙度下降37%,光纤表面粗糙度下降25%。

(2)光纤阵列超声椭圆振动辅助化学机械抛光的正交试验得到的最佳工艺参数为:超声振动频率25 kHz,抛光液流量35 mL/min,抛光压力50 kPa,抛光盘转速20 r/min,抛光粒子质量分数0.5%。光纤阵列按其抛光后表面粗糙度得到明显降低。

参考文献

[1] 王铭杰. 平面光波导与光纤阵列的耦合封装研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
WANG M J. The coupling and package research of planar

lightwave circuit with fiber array[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese).

[2] 蒋建忠, 袁晓林, 赵永武. CMP材料去除机制的研究进展[J]. 润滑与密封, 2011, 36(5): 101-105.
JIANG J Z, YUAN X L, ZHAO Y W. Recent progress in study on the material removal mecallisms during chemical mechanical polishing[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5): 101-105 (in Chinese).

[3] TSAI M, YANG W. Combined ultrasonic vibration and chemical mechanical polishing of copper substrates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 69-76.

[4] XU W, LU X, PAN G, et al. Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(12): 3936-3940.

[5] 唐军, 赵波. 超声波椭圆振动加工技术的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2014, 34(1): 70-78.
TANG J, ZHAO B. Developments of ultrasonic elliptical vibration machining[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2014, 34(1): 70-78 (in Chinese).

[6] YING W, WU Y, KATO M. A new approach to silicon wafer edge treatment by ultrasonically assisted polishing (UAP)[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2008, 31(2/3/4): 159-175.

[7] 潘国顺, 雒建斌, 路新春, 等. 原子级光滑表面的制造技术与机理研究[J]. 数字制造科学, 2011, 9(4): 1-35.
PAN G S, LUO J B, LU X C, et al. Research on the manufacturing mechanism and technology of atomically smooth surfaces[J]. Digital Manufacture Science, 2011, 9(4): 1-35 (in Chinese).

[8] 谢会东, 王晓青, 沈光球. 晶体的超精密抛光[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(6): 1035-1040.
XIE H D, WANG X Q, SHEN G Q. Superpolishing of crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2011, 33(6): 1035-1040 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)