

文章编号: 1001-3806(2008)01-0088-04

飞秒激光实现微机电系统加工短流程工艺

王建中^{1,2}, 史铁林^{1*}, 熊良才¹

(1. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074; 2 海军工程大学, 武汉 430033)

摘要: 为探讨采用飞秒激光直接刻写样品取代传统光刻掩膜版方式来实现微机电系统 (MEMS) 加工短流程工艺的可行性, 采用中心波长为 800nm、脉宽为 50fs 的激光对 100 硅片 (薄膜为 350nm ~ 500nm 厚的氮化硅) 进行实验, 分析了飞秒激光材料加工特性。分析和实验结果表明, 飞秒激光比纳秒、皮秒激光更适用于短流程工艺。MEMS 加工短流程工艺减少了加工流程, 缩短了加工周期。通过对激光脉冲能量和平台移动速度的控制可实现精确微加工。

关键词: 激光技术; 短流程工艺; 飞秒激光; 微机电系统; 微加工

中图分类号: TG665; TN249 **文献标识码:** A

A shortened procedure of micro-electromechanical systems fabrication by means of femtosecond laser

WANG Jian-zhong^{1,2}, SHI Tie-lin¹, XIONG Liang-cai¹

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the feasibility of micro-electromechanical systems (MEMS) short processing technique with application of directly writing by means of femtosecond laser instead of traditional lithography, features of the material processing by means of femtosecond laser was analyzed and experiment was executed on 100 silicon wafers (SiN film thickness: 350nm ~ 500nm) by using a laser with 800nm wavelength and 50fs pulse width. Theoretic analysis and experimental result showed that femtosecond laser was superior for short process to nanosecond laser. MEMS shortened the processing flow and its cycle. Precise processing could be realized under precise control of laser pulse energy and workbench moving speed.

Key words: laser technique; shortened procedure; femtosecond laser; micro-electromechanical systems; microfabrication

引 言

近年来,微机电系统 (micro-electromechanical systems, MEMS) 的研究得到了快速发展, MEMS 产品的市场需求呈现指数上升趋势。优化 MEMS 加工工艺一直是人们关注的热点。传统的 MEMS 加工工艺中,由于光刻掩膜版制备工艺复杂、耗时长,不适于微快速原型开发。结合激光加工特性,国外有尝试使用纳秒、皮秒量级激光来代替光刻掩膜版改良 MEMS 加工^[1],简化传统的 MEMS 加工工艺。

飞秒激光器自 20 世纪 80 年代问世后,因其具有很高的峰值功率、极短的脉冲宽度等特性,已被应用于材料微加工。早期工作如:1996 年,DAVIS 等人首次利用再生放大的钛宝石飞秒激光成功在各种玻璃材料内写入光波导^[2],哈佛大学 MAZUR 领导的小组利用

飞秒激光在各种透明材料内部进行高密度三维存储^[3]。

飞秒激光比纳秒、皮秒量级激光有着更优异的冷加工特性,其加工对周围区域热学、力学、化学影响小,其横向加工精度可达几十纳米,而深度加工精度甚至可达亚纳米级^[4]。作者尝试将飞秒激光引入到 MEMS 的加工工艺中,以飞秒激光直写代替光刻掩膜版的使用,使得整个加工流程缩短,耗时减少。

1 与光刻掩膜版流程的比较

首先在硅片表面形成一层掩膜,再利用飞秒激光直写掩膜代替标准 MEMS 工艺中的光刻掩膜版步骤来刻写预定图形,最后通过刻蚀获得所需微结构原型。具体工艺流程如图 1 所示。

在传统的 MEMS 加工中,加工图形是光照通过光刻掩膜版对光刻胶进行改性来实现的。而光刻掩膜版的制备存在成本高、耗时长的缺点。引入激光直写方式将省去光刻掩膜版的制作过程。相对于标准 MEMS 工艺周期由近百小时缩短到约 13h。

作者简介:王建中 (1974-),男,硕士研究生,研究方向为微机电系统研究。

* 通讯联系人。E-mail: tlshi@public.wh.hb.cn

收稿日期:2006-10-20;收到修改稿日期:2007-01-12

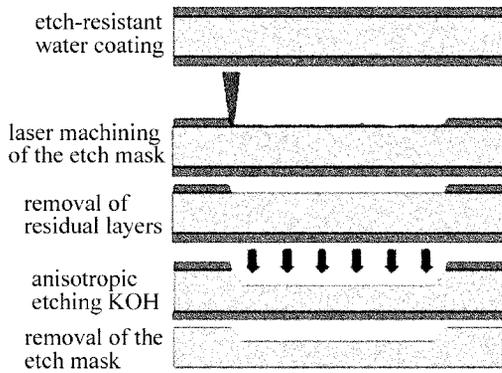


Fig 1 An illustration of the process flow

选择光刻胶在传统的 MEMS 加工中很重要,而且显影前对环境遮光要求很高。但在飞秒激光加工中,由于飞秒激光脉宽窄、功率高,其冷加工特性对加工材料没有特定的选择性,覆盖膜的选择也变得容易,且加工效果基本不受环境光照影响。

在传统的 MEMS 加工中,利用光刻掩膜版能够达到亚微米的关键尺寸。大量研究表明,利用飞秒激光直接烧蚀亦可以实现亚微米量级的加工^[5]。

激光直写使用逐点扫描方式绘制图形到样品,若批量生产则刻写效率相对较低,所以不适用于批量生产 MEMS 器件。光刻掩膜版方式是一次曝光整个光刻掩膜版,已成功应用在 MEMS 器件的批量生产上。

总之,引入激光直写能使 MEMS 加工流程简化,工时缩短,成本降低,但较适合少量样品的研制,而不适于批量生产。

2 激光的选择

短脉冲激光一般按脉宽的时间量级分为纳秒、皮秒和飞秒激光。3种短脉冲激光均先后被成功地应用到各种微加工工艺中,表现出优异的加工特性。飞秒激光拥有相对更窄的脉宽,更适于高精度的微结构加工。

研究人员进行了大量关于短脉冲激光烧蚀材料的物理过程研究,建立有多种数学模型。其中得到广泛认同的是苏联学者 AN ISMOV 于 1974 年提出双温模型:

$$C_e(T_e) \frac{\partial}{\partial t} T_e = \frac{\partial}{\partial x} \kappa \frac{\partial}{\partial x} T_e - g(T_e - T_i) + S(x, t) \quad (1)$$

$$C_i \frac{\partial}{\partial t} T_i = g(T_e - T_i) \quad (2)$$

式中, T 代表温度, C 代表热容, 下角 e 和 i 分别代表电子和晶格系统。 κ 代表电子热导率, g 是耦合系数, $S(x, t) = I(t)(1-R)\alpha \exp(-\alpha x)$ 是激光热源。

在双温模型中,将电子和晶格分成两个系统,(1)式右边第 1 项是热传导项,考虑了电子之间能量传递

的因素;第 2 项是耦合因素;第 3 项考虑了电子对激光能量的吸收。(2)式右边说明了晶格温度的变化是由于电子之间的能量耦合引起的。文献 [6] 中的分析指出,在强激光作用下,半导体材料经过极短时间的本征吸收后,将产生大量的自由载流子,此时可以视为感应金属对待。在文献 [7] 中针对 3 种时间量级的激光烧蚀金属将双温模型作了化简。综合文献 [6]、文献 [7] 中的结论,对 3 种短脉冲激光作用于半导体材料的物理特性作出如下推论。

飞秒激光脉冲时间短于电子冷却时间,电子与晶格之间的能量耦合可以忽略不计了。这样,电子与晶格之间的能量耦合就可以忽略不计了。(1)式就转化成一元微分方程。当激光脉宽达到飞秒量级时,可以忽略电子之间热传导对电子温度变化的影响。方程简化求解后可以得到强烈蒸发发生的条件:

$$F_\alpha \geq F_{th} \exp(-x/\delta) \quad (3)$$

式中, F_{th} 是飞秒激光脉冲引起蒸发的能流阈值。令 $F_\alpha = I(t)(1-R)\tau_1$, $F_{th} \approx \rho\Omega$, $\delta = 2/\alpha$, 其中, τ_1 是激光的脉宽, ρ 是材料的密度, Ω 是单位质量材料蒸发需要的热能。可以得到单脉冲引起材料烧蚀深度的解析表达式:

$$L \approx \alpha^{-1} \ln(F_\alpha/F_{th}) \quad (4)$$

由此得出结论:使用飞秒激光脉冲烧蚀半导体材料时,单脉冲烧蚀深度与脉冲能流成对数关系。烧蚀过程中,材料的移除主要是由直接蒸发引起的,因此,可以较容易地通过调整脉冲能流大小来达到控制加工深度的目的,这一点十分有利于进行高精度的微纳加工。

根据脉冲时间量级,对双温方程作出相应简化可知^[7]:脉宽处于皮秒量级时,单脉冲烧蚀深度与脉冲能流仍旧成对数关系。使用这种脉冲烧蚀时,由于热传导的作用,材料内部会形成熔融区。材料内部液相的存在无疑会导致加工精度的降低。当脉冲宽度达到纳秒量级时,整个烧蚀过程中,可认为电子和晶格具有相同的温度^[6],热波有足够的时间传输进入材料,产生了相当大的熔融材料层。在这种情况下,存在大量的液态材料,因此,使用纳秒脉冲进行高精度加工是有一定困难的。

大量飞秒激光烧蚀材料的实验研究亦表明^[8-10],飞秒激光脉冲进行加工具有以下特点:热影响区小、可加工各种材料、阈值效应精确等等。这些特点明显优于皮秒、纳秒激光,其更适于 MEMS 短流程工艺中直写掩膜层的工作。

3 飞秒激光直写微加工实验系统

实验所用激光器是美国 Spectra-Physics 公司生产

的 1kHz/50fs/2mJ 飞秒激光系统。实验光路为单透镜系统,如图 2 所示。重复频率 1kHz,脉宽为 50fs 的飞

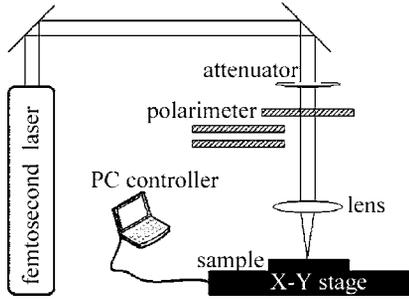


Fig 2 An illustration of lab system

秒激光系统射出直径 8mm 的圆形光斑,通过旋转偏振片的角度可以调节入射能量,在进入聚焦系统前使用中密度滤光片进行组合衰减。样品放在载物台上,通过精密微动平台准确控制样品的位置,微动平台在水平方向实现二维移动,平台最小分辨率为 1μm,精度约为 0.1μm。

4 实验与分析

4.1 实验方法

选择双面镀膜 100 硅片作为实验样品,薄膜为 350nm~500nm 厚的 SN,利用飞秒激光分别刻写长为 200μm 的线段和边长为 200μm 的方型区作为研究对象。实验时,通过改变平台移动速度和激光刻写能量获得不同组线段,用以定量分析这些因素对本工艺的影响。刻蚀等后道工序和传统工艺完全相同。实验中,选用 KOH 刻蚀和 HF 去除 SN 膜 (Si 与 SN 膜之间存在一层 SiO₂ 层),最终获得 V 型槽。

在扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 下对激光刻写后的硅片和 KOH 刻蚀的硅片进行高倍放大并测量宽度。利用台阶仪对激光刻写后的硅片刻写深度进行了测量。

4.2 实验结果与讨论

图 3a 是经 KOH 刻蚀后未去膜的 SEM 成像图,是激光在焦距为 30mm 透镜下聚焦,单脉冲能量为 4μJ,

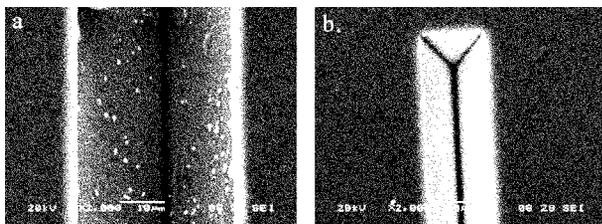


Fig 3 Photos of grooves after KOH etching

平台移动速度约为 5000μm/s 的槽型图,边缘清晰,沟底笔直,可以明显看到侧蚀现象。图 3b 是激光单脉冲能量为 0.2μJ 在焦距为 7.0mm 透镜下聚焦刻写,用 HF 去除 SN 膜后 SEM 成像图。经过湿法刻蚀后槽的边

缘平整,若用于制作规则的微结构将能达到很好边界效果。

MEMS 器件结构设计中必然存在实现不同尺寸的制作需求。由于结构图形是由激光直写完成,所以必须对刻写宽度实现控制,而器件结构纵向深度控制可以由后期化学刻蚀等工序来实现。因此,用激光直写代替光刻掩膜版的试验中,必须实现在充分刻去覆盖膜的前提下,对刻写宽度进行定量控制,这样短流程工艺对于 MEMS 器件的开发才具备实际意义。

在激光刻写过程中,单脉冲能量和平台移动速度是方便受控的。这两个受控因素直接改变刻写的激光能流密度。其对刻写宽度和刻写深度的影响规律是实现可控微加工的关键点。在经过一系列实验后得到了各个因素之间的关系图。

图 4 为同一平台移动速度下改变单脉冲能量的实

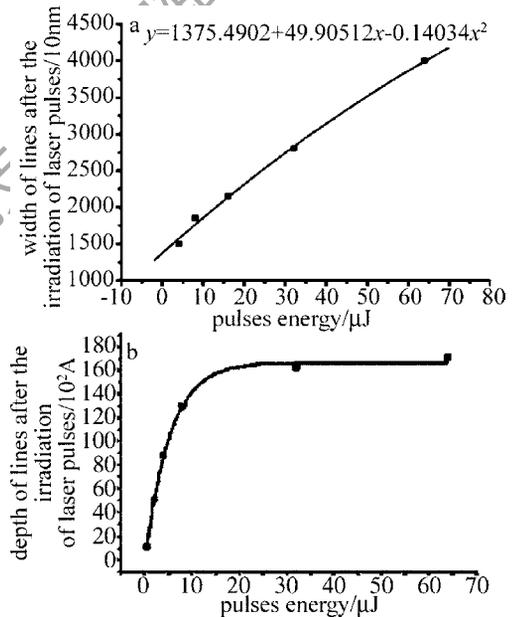


Fig 4 a—the relation of pulse energy and width of line b—the relation of pulse energy and depth of line

验结果,图中可以明显看到,脉冲能量与刻写宽度成线性关系。脉冲能量与刻写深度的拟合函数为: $y = 16669 - 17102e^{-x/5.2}$,相关指数为 0.99。

图 5 为激光在焦距为 30mm 透镜下聚焦,单脉冲能量为 4μJ 下改变激光扫描平移速度得到的一组刻

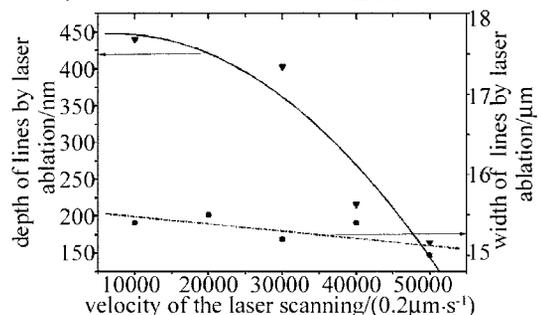


Fig 5 The relation of scanning velocity and width, depth of lines

写宽度、刻写深度的关系图。由图可知,刻写深度受扫描速度影响明显,速度越快槽就越浅,呈现规律性变化。而刻写宽度则没有明显变化,基本不受扫描速度影响。

刻写宽度主要受激光单脉冲能量影响,而刻写深度则由激光单脉冲能量和扫描速度二者共同决定。根据此规律可以实现对微结构实现可控加工。当然还要考虑到激光系统的稳定和平台移动系统的精度以及聚焦光斑的大小对实验效果的限制,这些因素限定了所能达到的精度极限。在限定的光学系统中,为了获得更为细小的线宽,保证能流密度高于烧蚀阈值的前提下,可以选择尽量小的速度来保证低能量下达到所需的刻写深度,这样在低能量下可以获得更细小的线宽。

另外,不管是湿法刻蚀还是干法刻蚀^[11-14], KOH 均会导致最终槽宽加大。所以在微结构设计和生产中推断最终槽宽时必须考虑这一变化。实验中对在 KOH 刻蚀前后槽宽变化关系作了分析(见图 6),基本成线性关系。在制造较为复杂的结构时,必须精确控制刻蚀过程,才能获得高质量的微结构。

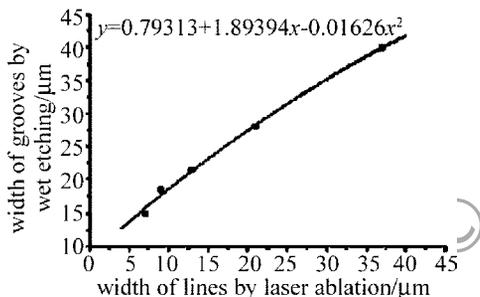


Fig 6 The relation of groove width with and without KOH etching

5 结论

总结了利用飞秒激光实现 MEMS 加工短流程工艺的探讨工作。该工艺的尝试应该是有价值的。其无需制作光刻掩膜版,可以减少加工流程步骤、缩短加工流程时间。比如在试制微米级的 MEMS 样品,可以采

用该工艺来实现,但不适于 MEMS 器件的批量加工。该工艺适于微快速原型,为微快速原型提供了一种新的手段。

参 考 文 献

- [1] MOORE D F, WILLIAMS J A. Laser prototyping of MEMS structures and SN cantilevers: experience teaching a practical undergraduate course [J]. Science Measurement and Technology, 2004, 151 (2): 54-59.
- [2] DAVIS K M, MURA K, SUGMOTO N, et al Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. Opt Lett, 1996, 21 (21): 1729-1731.
- [3] GLEZER E N, MLOSAVLJEVIC M, HUANG L, et al Three-dimensional optical storage inside transparent materials [J]. Opt Lett, 1996, 21 (24): 2023-2025.
- [4] NIX Ch, WANG Ch Y, HU M L, et al Thermal character in organic polymers with nanosecond femtosecond laser ablation [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1 (9): 547-549.
- [5] ANDREAS O. Precise structuring using femtosecond lasers [J]. The Review of Laser Engineering, 2002, 30 (5): 221-225.
- [6] SHEN Zh H, LU J, NIX W. Study of the heating mechanism of a semiconductor irradiated by picosecond and nanosecond laser pulses [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (9): 859-863 (in Chinese).
- [7] LANG J G. The study of femtosecond laser machining [D]. Tianjing: Tianjing University, 2005: 13-15 (in Chinese).
- [8] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S. Femtosecond, picosecond and nanosecond of solids [J]. Appl Phys, 1996, A63 (2): 109-115.
- [9] NOLTE S, MOMMA C, JACOBS H, et al Ablation of metals by ultrashort laser pulses [J]. J O S A, 1997, B14 (10): 2716-2722.
- [10] STUART B C, FEIT M D, HERMAN S, et al Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics [J]. Phys Rev, 1996, B53 (4): 1749-1761.
- [11] OU Y H, ZHOU M L, ZHANG Zh Y. A study on silicon deep etching technology [J]. Microelectronics, 2004, 34 (1): 45-47 (in Chinese).
- [12] HUTTON R S, PORT S N, SCHIFFR N D J, et al Photoelectrochemical imaging of the etching and passivation of silicon in aqueous KOH [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 1996, 418 (2): 153-158.
- [13] WEN L, WANG J Y, LU D G. Dry etching technique for silicon of high aspect ratio in MEMS device fabrication [J]. MEMS Device & Technology, 2004, 41 (6): 30-34 (in Chinese).
- [14] LONG Y H, XING L C, SHI T L. The quality study on excimer laser-induced electrochemical etching of silicon [J]. Laser Technology, 2006, 30 (3): 235-237 (in Chinese).

· 简 讯 ·

关于 2006 年度《激光技术》影响因子的最新报道

根据科情所《中国科技期刊引证报告(核心版)》最新报道,我刊 2006 年度的影响因子为 0.514,在本行业 62 本刊物中位居第 7 位。欢迎广大作者踊跃投稿!

《激光技术》编辑部