



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103658993 B

(45) 授权公告日 2015. 05. 06

(21) 申请号 201310677091. 8

(22) 申请日 2013. 12. 11

(73) 专利权人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72) 发明人 姜澜 韩伟娜 李晓炜

(51) Int. Cl.

B23K 26/362(2014. 01)

B23K 26/064(2014. 01)

(56) 对比文件

CN 101323053 A, 2008. 12. 17, 全文.

CN 1916746 A, 2007. 02. 21, 全文.

US 2002/0162973 A1, 2002. 11. 07, 全文.

WO 2009/103313 A1, 2009. 08. 27, 全文.

CN 102000912 A, 2011. 04. 06, 全文.

CN 102601529 A, 2012. 07. 25, 全文.

Yan Li. et al. Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses. 《OPTIC LETTERS》. 2001, 第 26 卷 (第 23 期), 第 1912 页第 2-3 段, 第 1914 页第 1-3 段及附图 1.

审查员 王立美

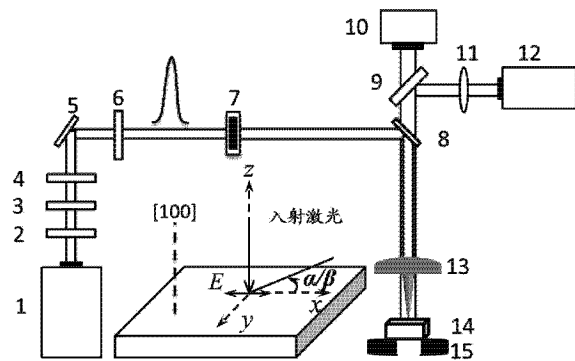
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法,属于飞秒激光应用技术领域。本方法综合激光偏振参数与晶硅材料的晶格性质,通过有效调节飞秒激光线或者椭圆偏振与单晶硅的夹角,调控材料表面瞬时电子激发动态来控制晶硅表面周期性波纹微纳结构选择性诱导产生,能高效精确的按照预先的设计实现晶硅表面周期性波纹微纳结构的诱导产生。本发明从静态激光辐照及激光直写两方面对具有金刚石晶格结构的硅表面周期性波纹微纳结构进行选择烧蚀控制,大大提高了其表面处理的加工精度及加工效率,在信息存储等方面具有至关重要的应用价值。



1. 基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤一,调节激光能量使之大于被加工样品材料的烧蚀阈值,且激光能量能够连续调节;

步骤二,调节飞秒激光脉冲偏振方向与晶轴方向的夹角;

若选择线偏振进行加工,则利用半波片调节飞秒激光脉冲的线偏振方向与晶轴方向夹角  $\alpha$ ;若选择椭圆偏振进行加工,则利用四分之一波片与半波片的组合调节椭圆主轴方向与晶轴方向夹角  $\beta$ ,在调节过程中保持椭圆的振幅比不变;

步骤三,将飞秒激光聚焦到被加工样品表面,被加工样品固定在 6 维移动平台上;

步骤四,寻找飞秒激光脉冲的加工规律;具体方法为:

在静态条件下,即加工过程中激光脉冲单点入射,与加工样本无相对移动:保持步骤一确定的能量大小,作用在被烧蚀材料上的飞秒激光脉冲数通过设定飞秒激光脉冲频率与机械开关开启时间控制在一个固定值;然后在  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  或者  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$  范围内,按设定角度间隔连续改变辐照到晶硅表面的线/椭圆偏振飞秒激光的角度  $\alpha$  或者  $\beta$ ;从而在晶硅表面烧蚀出类余弦曲线分布的选择性周期性波纹微纳结构;

所述静态条件下的类余弦曲线分布的特征为:曲线最低点为烧蚀抑制点,顶点为烧蚀最强点,最低点到最高点烧蚀强度递增;每个烧蚀强度值对应一个激光脉冲夹角值;

在动态条件下,即加工方式为激光直写,激光脉冲与加工样本相对移动:设定脉冲频率、移动平台与激光焦点的相对速度,并在加工过程中保持脉冲频率,激光脉冲与晶轴方向以不同的夹角  $\gamma$  匀速运动;激光直写过程中线偏振激光方向始终平行于激光直写方向;在  $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$  范围内,按设定角度间隔连续改变  $\gamma$ ,能在晶硅表面直写加工出连续度呈类余弦曲线分布的表面周期性波纹微纳波纹链结构;

所述动态条件下的类余弦曲线分布的特征为:曲线最低点为连续度最低点,最高点为连续度最高点,最低点到最高点连续度递增;每个连续度对应一个  $\gamma$  的值,最高点对应  $0^\circ$  或者  $90^\circ$ ;

步骤五,按照步骤四找到的静态和动态下的类余弦曲线分布加工规律,结合实际对脉冲能量、脉冲个数、脉冲频率及速度的要求,选择加工所需夹角  $\alpha$  或者  $\beta$  或者  $\gamma$  进行加工。

2. 根据权利要求 1 所述的基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法,其特征在于:激光能量调节通过半波片-偏振片组合实现。

3. 根据权利要求 1 所述的基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法,其特征在于:在线偏振条件下产生的周期性波纹微纳结构条纹规则性好,在椭圆偏振条件产生的波纹结构根据材料和振幅比的不同而不同,能满足不同加工要求。

4. 根据权利要求 1 所述的基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法,其特征在于:移动平台与激光焦点的相对速度在  $1-2000 \mu\text{m/s}$  范围内。

## 基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀方法,属于飞秒激光应用技术领域。

### 背景技术

[0002] 单晶硅表面微纳结构是半导体和晶体硅太阳能领域研究中的一个重点,原因是单晶硅表面的微纳结构与晶体光电性能密切相关。因而有效地调节硅表面微纳结构成为一个研究的重点。随着锁模及放大技术的出现,飞秒激光技术得到了飞速发展。飞秒激光加工与传统的长脉冲激光加工相比,具有不可比拟的优点,主要表现在极高的峰值功率和较小的损伤阈值,加工热影响区小,三维超高精度。由于飞秒激光脉冲宽度极短抑制了热扩散过程,所以飞秒激光可以在不对亚表面层产生显著影响的情况下改变表面形貌和结构,通过控制加工参数等就可以获得独特的材料表面结构。

[0003] 材料的表面形貌大大地影响着其光学、润湿、化学、生物等特性,半导体单晶硅经飞秒激光辐照后可诱导产生不同形态的表面微/纳结构,如表面波纹结构,微凸起结构等,改变了其表面材料的光学、电子学等性质,可广泛应用于光子学、光电子学、热辐射源和生物光学器件中。由于飞秒激光与物质的相互作用过程不同于传统的制造方法,极其复杂使得对于晶硅表面周期性波纹微纳结构诱导的精确控制制约了其实际的应用。因而对晶硅表面波纹微纳结构的精确高效诱导对于其实际应用至关重要,对于飞秒激光诱导晶硅表面周期性波纹微纳结构的控制研究具有重大意义。然而对于这种表面周期性微纳结构的高效精确控制上的难题仍然制约着其广泛的应用。偏振态是影响激光与物质相互作用的一个重要参数之一,尤其是材料在飞秒激光作用下所诱导产生的表面周期性波纹微纳结构形态。如在文献“Revealing local field structure of focused ultrashort pulses”中 Hnatovsky 等人通过飞秒激光偏振态整形实现了各种走向的表面波纹结构的生成。但对这种飞秒激光诱导材料表面周期性波纹微纳结构产生的研究其主要聚焦于激光本身性质—偏振态,而未考虑材料本身的性质。作为影响材料的特性之一,其晶格结构也是影响飞秒激光诱导材料表面周期性波纹微纳结构产生的重要参数之一,因而将激光偏振态与材料的晶格特性综合考虑来实现对表面周期性波纹微纳结构的精确高效烧蚀控制对于其广泛应用具有至关重要作用。通过对激光偏振态的调控改变材料特定局部区域的电子激发密度,从而影响其烧蚀特性,为调制表面微纳结构的诱导产生提供了可能。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是为解决综合考虑晶格结构来实现对表面周期性波纹微纳结构的精确高效烧蚀控制问题,提供一种于电子动态调控的晶硅表面飞秒激光选择性烧蚀的方法。

[0005] 本方法基于局部瞬时电子激发动态调制,综合飞秒激光线或者椭圆偏振与单晶硅(100)的晶格特性,通过有效调节飞秒激光线或者椭圆偏振与单晶硅的夹角,实现选择性诱

导晶硅表面周期性波纹微纳结构烧蚀加工。具体实施方法通过偏振飞秒激光调控晶硅材料激发瞬时局部电子密度,进而调控光子与电子之间的能量耦合,实现高效精确的选择性烧蚀加工。

[0006] 本发明的目的是通过以下技术来实现的:

[0007] 步骤一,调节激光能量:利用半波片-偏振片组合调节激光能量使之大于被加工样品材料的烧蚀阈值,且激光能量能够连续调节。

[0008] 步骤二,调节飞秒激光脉冲偏振方向与晶轴方向的夹角。

[0009] 线偏振与椭圆偏振均可达到周期性波纹微纳结构的加工,在线偏振条件下产生的周期性波纹微纳结构条纹规则性好,在椭圆偏振条件产生的波纹结构根据材料和振幅比的不同而不同,能满足不同加工要求;如椭圆偏振作用于电解质氟化钙材料表面产生的表面周期性波纹结构为断续的波纹链条。

[0010] 若选择线偏振进行加工,则利用半波片调节飞秒激光脉冲的线偏振方向与晶轴方向夹角  $\alpha$ ;若选择椭圆偏振进行加工,则利用四分之一波片与半波片的组合调节椭圆主轴方向与晶轴方向夹角  $\beta$ ,在调节过程中保持椭圆的振幅比不变。

[0011] 步骤三,利用消色差双胶合平凸透镜将飞秒激光聚焦到被加工样品表面,被加工样品固定在 6 维移动平台上。

[0012] 步骤四,寻找飞秒激光脉冲的加工规律。具体方法为:

[0013] 在静态条件下,即加工过程中激光脉冲单点入射,与加工样本无相对移动:保持步骤一确定的能量大小,作用在被烧蚀材料上的飞秒激光脉冲数通过设定飞秒激光脉冲频率与机械开关开启时间控制在一个固定值;然后在  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  或者  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$  范围内(从  $0^\circ$  开始到  $90^\circ$  结束),按设定角度间隔连续改变辐照到晶硅表面的线/椭圆偏振飞秒激光的角度(线偏振时为  $\alpha$ ,椭圆偏振时为  $\beta$ );根据材料在多个脉冲作用下、能量在烧蚀阈值以上能自组装产生表面周期性波纹微纳波纹结构的理论,能在晶硅表面烧蚀出类余弦曲线分布的选择性周期性波纹微纳结构。

[0014] 所述静态条件下的类余弦曲线分布的特征为:曲线最低点为烧蚀抑制点,顶点为烧蚀最强点,最低点到最高点烧蚀强度递增。每个烧蚀强度值对应一个激光脉冲夹角值( $\alpha$  或者  $\beta$  的值)。

[0015] 在动态条件下,即加工方式为激光直写,激光脉冲与加工样本相对移动:设定脉冲频率、移动平台与激光焦点的相对速度(在  $1-2000 \mu\text{m/s}$  范围内),并在加工过程中保持脉冲频率,激光脉冲与晶轴方向以不同的夹角( $\gamma$ )匀速运动;激光直写过程中通过半波片调节线偏振激光方向始终平行于激光直写方向以排除激光偏振的影响作用;在  $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$  范围内(从  $0^\circ$  开始到  $90^\circ$  结束),按设定角度间隔连续改变  $\gamma$ ,能在晶硅表面直写加工出连续度呈类余弦曲线分布的表面周期性波纹微纳波纹链结构。

[0016] 所述动态条件下的类余弦曲线分布的特征为:曲线最低点为连续度最低点,最高点为连续度最高点,最低点到最高点连续度递增。每个连续度对应一个  $\gamma$  的值,最高点对应  $0^\circ$  或者  $90^\circ$ 。

[0017] 步骤五,按照步骤四找到的静态和动态下的类余弦曲线分布加工规律,结合实际加工要求(脉冲能量、脉冲个数、脉冲频率及速度),选择加工所需夹角( $\alpha$  或者  $\beta$  或者  $\gamma$ ),进行加工。

[0018] 有益效果

[0019] 本发明提出了一种基于局部瞬时电子动态调控方法,综合激光偏振参数与晶硅材料的晶格性质通过调控材料表面瞬时电子激发动态来控制晶硅表面周期性波纹微纳结构选择性诱导产生,可高效精确的按照预先的设计实现晶硅表面周期性波纹微纳结构的诱导产生。本发明从静态激光辐照及激光直写两方面对具有金刚石晶格结构的(100)硅表面周期性波纹微纳结构进行选择烧蚀控制,大大提高了其表面处理的加工精度及加工效率,在信息存储等方面具有至关重要的应用价值。

### 附图说明

[0020] 图 1 为具体实施例中,飞秒激光诱导晶硅表面周期性波纹微纳结构选择性烧蚀加工光路图:

[0021] 图 2 为具体实施例中线偏振激光直写选择性诱导晶硅表面周期性波纹微纳结构控制加工示意图:

[0022] 标号说明:1-飞秒激光器;2-第一半波片;3-偏振片;4-第二半波片;5-反射镜;6-四分之一波片;7-机械开关;8-二向色镜;9-分束镜;10-照明白光源;11-聚焦透镜;12-成像 CCD;13-消色差双胶合平凸透镜;14-样本;15-六维移动平台。

### 具体实施方式

[0023] 下面结合附图以及实施例对本发明做进一步的介绍。

[0024] 本实施方式中,调控飞秒激光诱导晶硅表面周期性波纹微纳结构选择性烧蚀的加工方法,具体加工光路如图 1 所示。其加工光路为飞秒激光器 1 产生飞秒激光脉冲,飞秒激光脉冲经过第一半波片 2、偏振片 3、第二半波片 4 之后,被第一反射镜 5 反射后经过四分之一波片 6、机械开关 7,被第二反射镜 8 反射后经过消色差双胶合平凸透镜 13 后聚焦到样本 14 表面,待加工样本 14 固定在六维移动平台 15 上;照明白光源 10 经过分束镜 9、二向色镜 8、消色差双胶合平凸透镜 13 后照射到样本 14 后反射光经消色差双胶合平凸透镜 13、二向色镜 8,被分束镜反射后经聚焦透镜 11 后入射到成像 CCD 中。

[0025] 实验过程中采用的飞秒激光器参数如下:中心波长为 800nm,脉冲宽度为 50fs,重复频率为 1kHz,线偏振;实验中待加工样品为具有金刚石晶格结构的(100)硅,其 [011] 晶轴方向平行于 x 轴方向。

[0026] 上述系统的加工方式如下:

[0027] 调整光路,确保激光入射方向与所加工样本表面垂直;

[0028] (一)基于飞秒激光线偏振方向与晶轴方向夹角控制的选择性烧蚀调控方法:

[0029] (1)在光路中加入半波片,调节半波片光轴方向与晶轴方向夹角得到不同激光偏振方向与晶轴方向夹角的线偏振飞秒激光脉冲。

[0030] (2)打开机械开关 Shutter,借助成像 CCD,通过消色差双胶合平凸透镜把激光聚焦到材料表面;

[0031] (3)调整激光入射频率并控制机械开关 Shutter 开启时间,激光脉冲以设定的脉冲数作用到样本表面;

[0032] (4)在不同夹角  $\alpha$  的线偏振飞秒激光作用下,在晶硅样本表面选择性烧蚀出周期

性微 / 纳结构；

[0033] (5) 重复(3)、(4)过程,调整不同的入射脉冲数,在样本加工出不同烧蚀程度的选择性烧蚀表面周期性波纹微纳结构。

[0034] (二)基于不同振幅比椭圆偏振激光主轴方向与晶轴方向夹角控制的选择性烧蚀调控方法：

[0035] (1)在光路中加入四分之一波片,将线偏振激光调节为椭圆偏振激光,综合调节半波片与四分之一波片实现相同振幅比条件下椭圆主轴方向与晶轴方向夹角  $\beta$  的变化,具体为通过四分之一波片设定椭圆偏振的振幅比,在通过半波片调节椭圆偏振主轴方向的变化角度  $\beta$  为保证振幅比不变四分之一波片需旋转  $2\beta$  角；

[0036] (2)重复(一)中(2)、(3)过程,在不同夹角  $\beta$  的椭圆偏振飞秒激光作用下,在单晶硅样本表面选择性烧蚀出周期性波纹微纳结构。

[0037] (三)控制飞秒激光直写方向与晶轴方向夹角调控线偏振激光扫描微 / 纳结构的选择性烧蚀产生：

[0038] (1)重复(一)中(2)过程；

[0039] (2)设置激光入射频率并编程控制移动平台速度以控制入射到样本表面单位面积上的脉冲数；

[0040] (3)编程控制激光直写方向与晶轴方向(x轴)夹角( $\gamma$ ),同时通过调节光路中的半波片以控制激光偏振方向始终平行于激光直写方向,随着  $\gamma$  角的变化在样本表面选择性诱导出垂直于激光偏振方向的链状波纹微纳结构。

[0041] 上述飞秒激光系统采用的是美国光谱物理(SpectrumPhysics)公司生产的激光器,激光波长 800nm,脉冲宽度 50fs,重复频率 1KHz,单脉冲最大能量 3mJ,光强分布为高斯型,线偏振。

[0042] 试验样本为具有金刚石晶格结构的(100)单晶硅。线偏振激光直写选择性诱导晶硅表面周期性波纹微纳结构控制加工如图 2 所示。双箭头表示激光偏振方向, $0^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  为激光偏振方向与晶轴方向夹角,单箭头  $v$  表示激光直写方向。

[0043] (1)在  $0.2\text{J}/\text{cm}^2$  的能量密度下,脉冲作用个数从 100 以 50 为间隔增大到 500,调节线偏振方向与晶轴方向夹角( $\alpha$ )从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  ( $10^\circ$  为一个间隔)变化,通过对辐照表面区域特定方向上的局部瞬时电子动态的激发特性进行调控,使得单晶硅在单点飞秒激光脉冲作用下得到特定  $\alpha$  角条件下的选择性表面周期性波纹微纳结构烧蚀产生,从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  呈现出类余弦曲线的烧蚀程度(表面周期性波纹微纳结构的面积)变化规律。

[0044] (2)根据电子动态调控理论依据,采用不同振幅比的椭圆偏振飞秒激光对材料的局部电子动态进行调控来控制晶硅表面周期性波纹微纳结构形态及烧蚀特性。在  $0.25\text{J}/\text{cm}^2$  的能量密度下,脉冲作用个数从 100 以 50 为间隔增大到 500,通过四分之一波片将线偏振激光变换为不同振幅比的椭圆偏振激光,进一步通过半波片的综合调节实现椭圆主轴方向与晶轴方向夹角  $\beta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  ( $10^\circ$  为一个间隔)变化,单晶硅在单点椭圆偏振飞秒激光脉冲作用下得到特定  $\beta$  角条件下的选择性表面周期性波纹微纳结构烧蚀产生。

[0045] (3)基于上述(1)单点线偏振飞秒激光对晶硅表面周期性波纹微纳结构的选择性烧蚀调控,将其应用于飞秒激光直写技术。通过线偏振态的飞秒激光在特定晶格方向上的电子激发动态调节实现表面周期性波纹微纳结构的选择性直写烧蚀产生。具体为在  $0.2\text{J}/$

cm<sup>2</sup> 的能量密度, 脉冲重复频率 200Hz, 激光直写速度 200 μ m/s 条件下, 保持线偏振激光方向与激光直写方向平行, 程序控制激光直写方向(即线偏振方向)与晶轴方向夹角( $\gamma$ )从 0° 到 90° 变化(10° 为一个间隔), 在晶硅表面选择性诱导产生周期性表面微 / 纳结构, 且呈现出不同的连贯性, 当  $\gamma$  为 0° 及 90° 得到最均匀, 烧蚀程度最深的表面周期性波纹微纳结构, 当  $\gamma$  为 45° 时样本表面未产生烧蚀。当  $\gamma$  从 0° 变化到 90° 的过程中其烧蚀程度及连贯性呈现出类余弦曲线的变化规律。

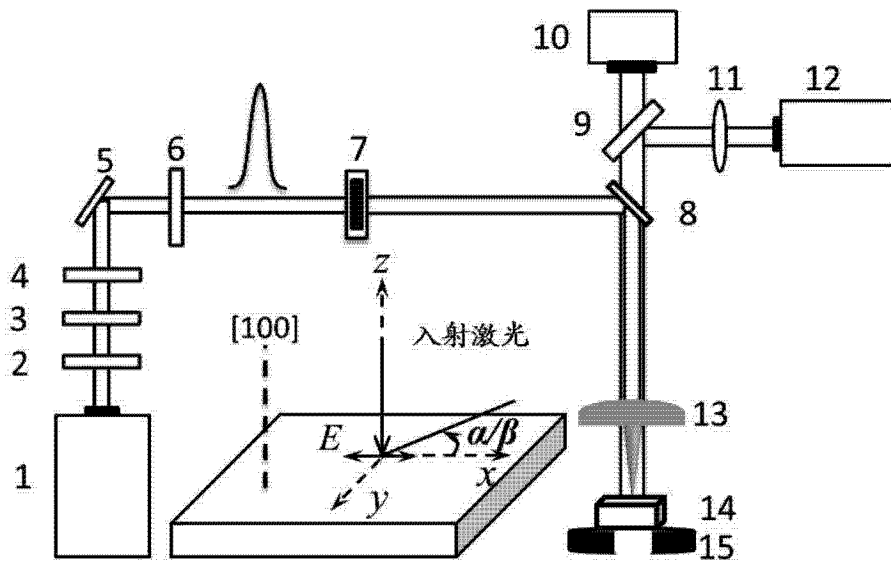


图 1

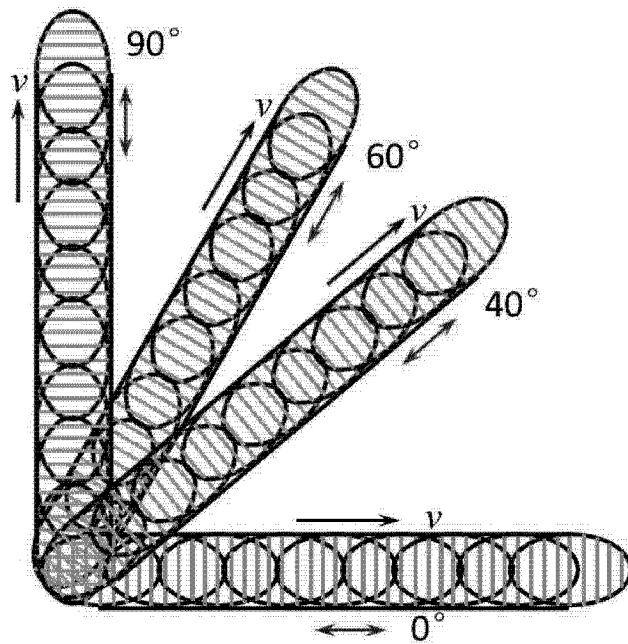


图 2