



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105468873 A

(43) 申请公布日 2016. 04. 06

(21) 申请号 201510988227. 6

(22) 申请日 2015. 12. 24

(71) 申请人 中北大学

地址 030051 山西省太原市尖草坪区学院路  
3号

(72) 发明人 闫树斌 张文栋 张志东 薛晨阳  
崔建功 陈慧斌 骆亮 苏莹  
王瑞兵

(74) 专利代理机构 太原科卫专利事务所(普通  
合伙) 14100

代理人 朱源

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

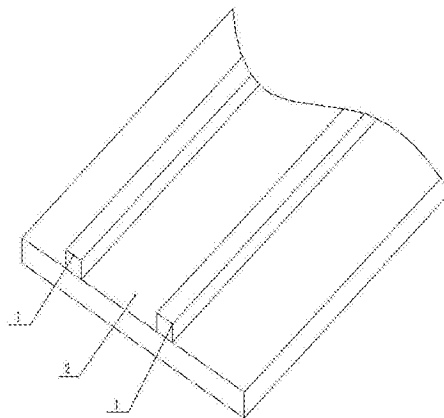
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

### (54) 发明名称

硅基光波导激光表面光滑化仿真方法

### (57) 摘要

本发明属于集成光学领域和材料表面工程领域,尤其涉及采用激光以降低波导侧壁粗糙度的方式降低硅光波导散射损耗的仿真模拟方法,具体为一种硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,解决了使用激光对硅基光波导做表面粗糙度处理过程中,凭经验设置工艺参数的不准确,成功率低等关键问题。该数值仿真方法可以重现任何工艺制作的波导侧壁产生的粗糙表面。根据还原的侧壁真实形貌,结合相变要求的熔深、时长数据,获得相应的激光能量密度、入射角、脉冲时长参数。为工艺过程提供了准确可靠的参数数据。本发明分析结果准确性、精度高,极大地缩短了工艺参数获得的周期,为光波导器件的大规模生产和自适应加工奠定了坚实的基础。



1. 硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于包括以下步骤:

第一步:确定激光照射下,硅基光波导的热源分布,分析硅基光波导与环境之间的热交换,用于设定边界条件;

第二步:分析在激光照射下,硅基光波导在升温过程中的物理机理并进行简化,在有限元分析方法中根据简化的物理机理将实际硅基光波导棱柱三维结构建立成硅基光波导棱柱二维模型;

第三步:设置硅基光波导的材料对激光能量的吸收系数、常压热容、密度和热导系数,设置热源激光照射角度、激光平均能量密度和激光脉冲时长,以及对流传输系数,将设置的激光参数作为边界条件施加在硅基光波导棱柱二维模型上,然后根据热传导理论,利用有限元分析方法对激光照射下的硅基光波导进行瞬态温度场分析,得出硅基光波导在激光作用下的各区域温度随时间变化的数据,为分析硅基光波导的相变熔化区流体流动情况奠定基础;

第四步:温度场获得的各区域温度随时间变化的数据用于在硅基光波导棱柱二维模型上得到区分硅基光波导受热熔化区域和未熔化区域的等温线,然后根据真实硅基光波导制造后留下的粗糙侧壁数据,在有限元分析方法中重构侧壁粗糙表面;

第五步:采用间接法,在流场中使用温度场获得的等温线数据控制重构的侧壁粗糙表面受热后的熔化区域和未熔化区域,采用不可压缩流体条件下的纳维-斯托克斯方程在有限元软件中计算熔化区域的流体流动,获得流体流动特性;

第六步:根据流体流动特性,通过有限元分析方法求解计算,得到硅基光波导受热熔化凝固后的表面图,表面图用于检验激光参数的设定是否合理,若表面图粗糙度低可直接指导实际加工,若表面图粗糙度高,需要重新调整激光参数。

2. 根据权利要求1所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于硅基光波导的对激光能量的吸收系数、常压热容、密度和热导系数均设置为温度的函数。

3. 根据权利要求1或2所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于真实硅基光波导制造后留下的粗糙侧壁数据的测量使用原子力显微镜或者扫描隧道显微镜进行测量。

4. 根据权利要求1或2所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于硅基光波导热源包括棱柱上表面照射激光和棱柱侧壁照射激光,热源的设置采用以下公式:

$I \cdot \cos(\theta_i) \cdot g(t) \cdot T_{top} \cdot f_{top}(x, y) \cdot A_0(T) \cdot \exp(A_0(T) \cdot \cos(\theta_t))$ , 式中:  $I$  为激光平均能量密度,单位为  $J/cm^2$ ;  $\theta_i$  为激光的照射角度,单位为度;  $\theta_t$  为激光的折射角度,单位为度;  $g(t)$  为高斯分布函数;  $T_{top}$  为强吸收条件下的菲涅耳热产生函数;  $f_{top}(x, y)$  为与模型相关的能量分布函数;  $A_0(T)$  为硅的吸收系数,单位为  $1/cm$ ;  $\exp(A_0(T) \cdot \cos(\theta_t))$  为倏逝场的指数衰减项。

5. 根据权利要求1或2所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于温度场的瞬态分析,使用二维热传导方程进行计算,基本方程如下:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u}_1 \cdot \nabla T + \nabla \vec{q} = Q + q_0 + Q_{rad}$$

$$\vec{q} = k \nabla T$$

式中:  $\rho$  为材料密度,单位  $Kg/m^3$ ;  $C_p$  为常压热容,单位  $J/(Kg \cdot K)$ ;  $T$  为材料的温度,单位  $K$ ;

$\vec{u}_1$ 为对流速度场的张量写法; $\vec{q}$ 为热流强度,单位 $W/m^2$ ;k为热传导系数,单位 $W/(m^2 \cdot K)$ ;Q为外部热源,单位J; $q_0$ 为瞬态热源,单位J; $Q_{ted}$ 为辐射传热项,单位J。

6.根据权利要求1或2所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于相变熔化过程采用热焓分析法,热焓分析法等效热容如下:热焓法对硅材料比热容的修正公式为:

$$Cp' = Cp_a + \delta \Delta H, \delta = \frac{\exp(-(T - T_m)^2 / (\Delta T)^2)}{\Delta T \sqrt{\pi}}$$

式中: $Cp'$ 为发生相变过程中的等效热容,单位 $J/(Kg \cdot K)$ ;  $Cp_a$ 为相变前的材料热容值,单位 $J/(Kg \cdot K)$ ;  $\delta$ 为热焓法热容修正系数,单位 $1/K$ ;  $\Delta H$ 为硅材料熔化潜热,单位 $J/g$ ;  $T$ 为波导材料各点瞬时温度,单位 $K$ ,  $T_m$ 为硅的熔点温度,单位 $K$ ,  $\Delta T$ 为硅的相变半径,单位 $K$ 。

7.根据权利要求1或2所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于流体的计算采用不可压缩流体的纳维-斯托克斯方程:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot [-p + \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \rho \vec{g} + F_{ST} + F$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

式中: $\rho$ 为液体硅的密度,单位 $Kg/m^3$ ;  $\vec{u}$ 为流体流动速度矢量,单位 $m/s$ ;  $\mu$ 为粘滞系数,单位 $Ns/m^2$ ;  $\vec{g}$ 为重力加速度,单位 $m/s^2$ ;  $F_{ST}$ 为界面张力项,单位 $N/m$ ;  $F$ 为力源项,单位 $N/m$ 。

8.根据权利要求1或2所述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,其特征在于对于流体计算过程的计算机可视化,采用水平集方法追踪熔融区域的流体情况,水平集基本方程如下:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\epsilon_{1s} \nabla \phi - \phi (1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|})$$

式中: $\phi$ 为描述两相流界面的标量函数;  $\vec{u}$ 为流体流动速度矢量;  $\gamma$ 为重新初始化参数,单位 $m/s$ ;  $\epsilon_{1s}$ 为界面厚度控制参数,单位 $m$ 。

## 硅基光波导激光表面光滑化仿真方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于集成光学领域和材料表面工程领域,尤其涉及采用激光以降低波导侧壁粗糙度的方式降低硅基光波导散射损耗的仿真模拟方法,具体为一种硅基光波导激光表面光滑化仿真方法。

### 背景技术

[0002] 随着光通信技术的发展,光子器件和光子集成代替电子器件成为重要发展方向。鉴于硅成本低廉,加工工艺技术和集成电路技术发展已经相当成熟,同时在1.3-1.6 $\mu\text{m}$ 的光通信波段内,光吸收损耗非常低等优点,将硅从微电子学领域拓展到光电子学领域,开展全硅(包括绝缘体上硅材料,SOI)光集成有源和无源器件已经成为一个重要的发展趋势。

[0003] 采用现有光刻技术制作的硅波导的结构如图1所示,硅波导包括两棱柱和棱柱之间的凹槽,光刻技术制作的硅波导不可避免地在波导棱柱侧壁留下了较大的表面粗糙度,同时由于光刻过程的不稳定,波导棱柱侧壁粗糙度值的大小带有一定随机性。相关研究表明,粗糙侧壁引起的散射损耗是光波导损耗的主要部分。采用相应的技术降低波导侧壁粗糙度,从而降低散射损耗成为光波导器件从实验室走向生产线的关键技术,其中使用高能束激光,利用激光的热效应加热波导侧壁至熔化再凝固技术成为硅波导表面处理的重要研究方向。利用激光做硅波导侧壁粗糙度处理的技术发展情况如下:目前,由于硅波导结构微小,利用激光做硅波导侧壁粗糙度处理的实验条件较苛刻,这一技术仅停留在实验室阶段。利用激光做硅波导侧壁粗糙度处理的仿真仅停留在温度场的分析上,没有涉及这一过程的全过程仿真。

[0004] 现有技术存在的缺陷主要包括以下三个方面:(1)无法确定激光束的精确参数。广泛采用的光刻技术加工的硅波导,由于光的衍射和掩模版自有的粗糙侧边,制作的硅波导不可避免地留下了粗糙的侧壁,激光参数的选择主要依靠经验,实验效果不佳,成功率低。(2)无法调控激光束参数。由于光刻过程的不稳定性,使得粗糙度的分布带有随机性。仅对温度场的仿真无法根据表面粗糙度的变化对激光参数进行精确调控。(3)缺乏针对硅基光波导激光表面光滑化这个整个物理过程的仿真模拟系统。目前的仿真仅停留在对温度场的分析中,难于指导实验和生产。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服上述缺陷,提供一种硅基光波导激光表面光滑化仿真方法。

[0006] 本发明是采用如下的技术方案实现的:硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,包括以下步骤:

[0007] 第一步:确定激光照射下,硅基光波导的热源分布,分析硅基光波导与环境之间的热交换,用于设定边界条件;

[0008] 第二步:分析在激光照射下,硅基光波导在升温过程中的物理机理并进行简化,在

有限元分析方法中根据简化的物理机理将实际硅基光波导棱柱三维结构建立成硅基光波导棱柱二维模型；

[0009] 第三步：设置硅基光波导的材料对激光能量的吸收系数、常压热容、密度和热导系数，设置热源激光照射角度、激光平均能量密度和激光脉冲时长，以及对流传输系数，将设置的激光参数作为边界条件施加在硅基光波导棱柱二维模型上，然后利用二维热传导方程在有限元软件中对激光照射下的硅基光波导进行瞬态温度场分析，得出硅基光波导在激光作用下的各区域温度随时间变化的数据，为分析硅基光波导的相变熔化区流体流动情况奠定基础；

[0010] 第四步：温度场获得的各区域温度随时间变化的数据用于在硅基光波导棱柱二维模型上得到区分硅基光波导受热熔化区域和未熔化区域的等温线，然后根据真实硅基光波导制造后留下的粗糙侧壁数据，在有限元分析方法中重构侧壁粗糙表面；

[0011] 第五步：采用间接法，在流场中使用温度场获得的等温线数据控制重构的侧壁粗糙表面受热后的熔化区域和未熔化区域，采用不可压缩流体条件下的纳维-斯托克斯方程在有限元软件中计算熔化区域的流体流动，获得流体流动特性；

[0012] 第六步：根据流体流动特性，通过有限元分析方法求解计算，得到硅基光波导受热熔化凝固后的表面图，表面图用于检验激光参数的设定是否合理，若表面图粗糙度低可直接指导实际加工，若表面图粗糙度高，需要重新调整激光参数。

[0013] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，硅基光波导的对激光能量的吸收系数、常压热容、密度和热导系数均设置为温度的函数。考虑到物理过程涉及硅材料的吸热升温、熔化相变、液体硅流动、凝固相变过程，因此材料参数均设为温度的函数。

[0014] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，真实硅基光波导制造后留下的粗糙侧壁数据的测量使用原子力显微镜(AFM)或者扫描隧道显微镜(STM)进行测量。

[0015] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，硅基光波导热源包括棱柱上表面照射激光和棱柱侧壁照射激光，热源的设置采用以下公式： $I \cdot \cos(\theta_i) \cdot g(t) \cdot T_{top} \cdot f_{top}(x, y) \cdot A_0(T) \cdot \exp(A_0(T) \cdot \cos(\theta_t))$ ，式中： $I$ 为激光平均能量密度，单位为 $J/cm^2$ ； $\theta_i$ 为激光的照射角度，单位为度； $\theta_t$ 为激光的折射角度，单位为度； $g(t)$ 为高斯分布函数； $T_{top}$ 为强吸收条件下的菲涅耳热产生函数； $f_{top}(x, y)$ 为与模型相关的能量分布函数； $A_0(T)$ 为硅的吸收系数，单位为 $1/cm$ ； $\exp(A_0(T) \cdot \cos(\theta_t))$ 为倏逝场的指数衰减项。

[0016] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，温度场的瞬态分析，使用二维热传导方程进行计算，基本方程如下：

$$[0017] \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \bar{u}_i \cdot \nabla T + \nabla \bar{q} = Q + q_0 + Q_{ted}$$

$$[0018] \quad \bar{q} = k \nabla T$$

[0019] 式中： $\rho$ 为材料密度，单位 $Kg/m^3$ ； $C_p$ 为常压热容，单位 $J/(Kg \cdot K)$ ； $T$ 为材料的温度，单位 $K$ ； $\bar{u}_i$ 为对流速度场的张量写法； $\bar{q}$ 为热流强度，单位 $W/m^2$ ； $k$ 为热传导系数，单位 $W/(m^2 \cdot K)$ ； $Q$ 为外部热源，单位 $J$ ； $q_0$ 为瞬态热源，单位 $J$ ； $Q_{ted}$ 为辐射传热项，单位 $J$ 。

[0020] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，相变熔化过程采用热焓分析法，热焓分析法等效热容如下：热焓法对硅材料比热容的修正公式为： $C_p' = C_{p\_a} + \delta \Delta H$ ，

$$\delta = \frac{\exp(-(T-T_m)^2/(\Delta T)^2)}{\Delta T \sqrt{\pi}}$$

式中： $C_p'$ 为发生相变过程中的等效热容，单位J/(Kg·K)； $C_{p\_a}$ 为相变前的材料热容值，单位J/(Kg·K)； $\delta$ 为热焓法热容修正系数，单位1/K； $\Delta H$ 为硅材料熔化潜热，单位J/g； $T$ 为波导材料各区域瞬时温度，单位K， $T_m$ 为硅的熔点温度，单位K， $\Delta T$ 为硅的相变半径，单位K。

[0021] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，流体的计算采用不可压缩流体的纳维-斯托克斯方程：

$$[0022] \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot [-p + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \rho \vec{g} + F_{ST} + F$$

$$[0023] \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

[0024] 式中： $\rho$ 为液体硅的密度，单位Kg/m<sup>3</sup>； $\vec{u}$ 为流体流动速度矢量，单位m/s； $\mu$ 为粘滞系数，单位N\*s/m<sup>2</sup>； $\vec{g}$ 为重力加速度，单位m/s<sup>2</sup>； $F_{ST}$ 为界面张力项，单位N/m； $F$ 为力源项，单位N/m。

[0025] 上述的硅基光波导激光表面光滑化仿真方法，对于流体计算过程的计算机可视化，采用水平集方法追踪熔融区域的流体情况，水平集基本方程如下：

$$[0026] \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\epsilon_{1s} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|})$$

[0027] 式中： $\phi$ 为描述两相流界面的标量函数； $\vec{u}$ 为流体流动速度矢量； $\gamma$ 为重新初始化参数，单位m/s； $\epsilon_{1s}$ 为界面厚度控制参数，单位m。

[0028] 与现有技术相比，本发明的有益效果在于：

[0029] 1)本发明将激光作用下的硅基光波导作为一个整体进行热特性流体数值仿真，独创性地对两个场进行耦合，比仅考虑温度场更加接近真实激光作用下的硅波导物理过程。更准确的预测了在一定能量密度和照射角度下的硅波导温度分布和侧壁粗糙度下降情况，可为控制激光能量对光波导侧壁进行表面处理提供可靠的技术数据。

[0030] 2)本发明针对激光作用下的硅波导温度场仿真分析时，充分考虑了硅波导受热的热源情况，采用数值方法将其处理为体热源，避免了理论分析中不合理简化热源为线热源对结果分析的影响，提高了采用激光表面光滑技术降低硅或绝缘体上硅材料光波导损耗的仿真模拟的准确性。

[0031] 3)本发明在处理硅波导表面粗糙度数据时，采用直接测量和导入仿真模拟系统的方法，可以完全重现所要加工的硅波导侧壁粗糙情况，针对不同的粗糙度情况获得相应的激光能量密度和照射角度等数据，为这一技术的自适应加工提供了软件基础。

## 附图说明

[0032] 图1为现有光波导的结构示意图。

[0033] 图2为光波导棱柱的二维结构示意图。

[0034] 图中：1-棱柱，2-凹槽。

## 具体实施方式

[0035] 下面结合实施例对本发明作进一步的说明,本发明的实施方式包括但不限于下列实施例。本发明提供了一种硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,该方法将激光作用下的硅基光波导表面物理衍化过程作为一个整体进行热流体数值仿真,再结合运算获得的数据可以对激光相关参数进行优化,获得的数据结果准确性好精度高。

[0036] 下面以SOI光波导为例进行详解,波导材料为硅,绝缘体衬底材料为二氧化硅,波导棱柱上表面宽度200nm,侧壁深度200nm,侧壁均方根粗糙度值约为15nm。

[0037] 硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,包括以下步骤:

[0038] 第一步:先进行温度场的仿真,确定激光照射下,硅基光波导的热源分布,如图2所示,硅基光波导热源包括上表面照射激光和侧壁照射激光,分析硅基光波导与环境之间的热交换,用于设定边界条件,所用激光为单脉冲纳秒量级,实验条件在真空腔中进行;

[0039] 热源的设置采用以下公式,需要利用以下公式对顶部和侧壁设置热源:

$$[0040] \quad I \cdot \cos(\theta_i) \cdot g(t) \cdot T_{top} \cdot f_{top}(x, y) \cdot A_0(T) \cdot \exp(A_0(T) \cdot \cos(\theta_t))$$

[0041] 式中: $I$ 为平均激光能量密度,单位为 $J/cm^2$ ;  $\theta_i$ 为激光的入射角度,单位为度;  $\theta_t$ 为激光的折射角度,单位为度;  $g(t)$ 为高斯分布函数;  $T_{top}$ 为强吸收条件下的菲涅耳热产生函数;  $f_{top}(x, y)$ 为与模型相关的能量分布函数;  $A_0(T)$ 为硅的吸收系数,单位为 $1/cm$ ;  $\exp(A_0(T) \cdot \cos(\theta_t))$ 为倏逝场的指数衰减项。

[0042] 第二步:分析在激光照射下,硅基光波导在升温过程中的物理机理并进行简化,在有限元分析方法中根据简化的物理机理将实际硅基光波导棱柱三维结构建立成硅基光波导棱柱二维模型,简化内容包括:1、采用光波导棱柱的正向切面图作为仿真使用的波导侧壁二维模型;2、温度场的仿真忽略表面粗糙度对温升的影响;3、激光的能量分布近似看做高斯分布;4、温度场的热源设置忽略侧壁受热熔化的塌陷过程;5、流体模型仅研究棱柱侧壁上的单个凸起的吸热熔化的流动过程,侧壁上其他的凸起和该单个凸起的流动情况相同;6、熔融硅的流动假定为不可压缩流体;

[0043] 第三步:对建立的波导棱柱二维模型设置材料种类和材料参数,需要进行激光处理的波导材料设置为硅,衬底材料设置为二氧化硅,与温度相关的材料参数包括硅材料对激光能量的吸收系数、常压热容、密度、热导系数和液体硅粘滞系数,材料参数设定时考虑到物理过程涉及硅材料的吸热升温、熔化相变、液体硅流动、凝固相变过程,因此材料参数均设为温度的函数,再设置热源激光照射角度、激光平均能量密度和激光脉冲时长,以及对流传输系数(所用激光为单脉冲纳秒量级,实验条件在真空腔中进行,因而不考虑波导与接触环境的热对流,仅考虑波导与相应衬底的热传导,对流传输系数设为0),将设置的激光参数作为边界条件施加在硅基光波导棱柱二维模型上,然后利用有限元分析方法对激光照射下的硅基光波导进行瞬态温度场分析,得出硅基光波导在激光作用下的各区域温度随时间变化数据,为分析硅基光波导的相变熔化区流体流动情况奠定基础;

[0044] 温度场的计算公式为:

$$[0045] \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \bar{u}_1 \cdot \nabla T + \nabla \bar{q} = Q + q_0 + Q_{led}$$

$$[0046] \quad \bar{q} = k \nabla T$$

[0047] 式中: $\rho$ 为材料密度,单位 $Kg/m^3$ ;  $C_p$ 为常压热容,单位 $J/(Kg \cdot K)$ ;  $T$ 为材料的温度,单位 $K$ ;  $\bar{u}_1$ 为对流速度场的张量写法;  $\bar{q}$ 为热流强度,单位 $W/m^2$ ;  $k$ 为热传导系数,单位 $W/(m^2 \cdot$

K);Q为外部热源,单位J;q<sub>0</sub>为瞬态热源,单位J;Q<sub>ted</sub>为辐射传热项,单位J。

[0048] 第四步:温度场获得的各区域温度随时间变化数据用于在硅基光波导棱柱二维模型上得到区分硅基光波导受热熔化区域和未熔化区域的等温线,然后根据真实硅基光波导制造后留下的粗糙侧壁数据,在有限元分析方法中重构侧壁粗糙表面;设置涉及相变过程的热焓法参数,硅的熔融潜热为1800J/g,相变半径2K,对所建波导棱柱二维模型进行网格划分,由于建立的是正方形模型,采用矩形的网格划分,并对硅波导部分进行较密的划分,对二氧化硅衬底进行较疏的划分,加快仿真运算速度。最后计算获得相应激光能量密度,一定角度照射下,材料各点温度随时间的变化数据。可以获得T=1685K(硅的熔点)等温线,作为熔化区和未熔化区分界线,同时可以得到随着波导侧壁向下的熔池深度数据,用于控制液体硅的熔前深度和流动时长。

[0049] 热焓法对硅材料比热容的修正公式为:

$$[0050] \quad C_p' = C_{p\_a} + \delta \Delta H$$

$$[0051] \quad \delta = \frac{\exp(-(T-T_m)^2/(\Delta T)^2)}{\Delta T \sqrt{\pi}}$$

[0052] 式中:C<sub>p</sub>'为发生相变过程中的等效热容,单位J/(Kg·K);C<sub>p\_a</sub>为相变前的材料热容值,单位J/(Kg·K);δ为热焓法热容修正系数,单位1/K;ΔH为硅材料熔化潜热,单位J/g;T为波导材料各点瞬时温度,单位K,T<sub>m</sub>为硅的熔点温度,单位K,ΔT为硅的相变半径,单位K;

[0053] 第五步:采用间接法,在流场中使用温度场获得的等温线数据控制重构的侧壁粗糙表面受热后的熔化区域和未熔化区域,使用水平集方法追踪熔化区域的流体情况,控制流体的开始流动时间和流动持续时长,获得流体流动特性;

[0054] 流体的计算采用不可压缩流体的纳维-斯托克斯方程:

$$[0055] \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot [-p + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \rho \vec{g} + F_{ST} + F$$

$$[0056] \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

[0057] 式中:ρ为液体硅的密度,单位Kg/m<sup>3</sup>;ū为流体流动速度矢量,单位m/s;μ为粘滞系数,单位Ns/m<sup>2</sup>;ḡ为重力加速度,单位m/s<sup>2</sup>;F<sub>ST</sub>为界面张力项,单位N/m;F为力源项,单位N/m;解此偏微分方程可以获得流体在任何时刻的位置数据和流速加速度等数据。

[0058] 计算机对流体界面的追踪采用水平集函数进行运算,其基本方程如下:

$$[0059] \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\epsilon_{1s} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|})$$

[0060] 式中:Φ为描述两相流界面的标量函数;ū为流体流动速度矢量;γ为重新初始化参数,单位m/s;ε<sub>1s</sub>为界面厚度控制参数,单位m;

[0061] 第六步:根据流体流动特性,通过有限元分析方法求解计算,从而获得在激光能量和照射角度下的硅波导侧壁升温、熔化流动、再凝固后形成的表面形貌,从而获得采用激光表面光滑技术获得的硅波导表面粗糙度值,根据流场中获得的粗糙度值,判断激光的平均激光能量密度,入射角度等相关参数设置是否合理,并作出相应的优化。

[0062] 本发明公开了一种硅基光波导激光表面光滑化仿真方法,解决了使用激光对硅基光波导做表面粗糙度处理过程中,凭经验设置工艺参数的不准确,成功率低等关键问题。该



数值仿真方法可以重现任何工艺制作的波导侧壁产生的粗糙表面。根据还原的侧壁真实形貌,结合相变要求的熔深、时长数据,获得相应的激光能量密度、入射角、脉冲时长数据。为工艺过程提供了准确可靠的参数数据。本发明分析结果准确性、精度高,极大地提高了工艺参数获得的周期,为光波导器件的大规模生产和自适应加工奠定了坚实的基础。

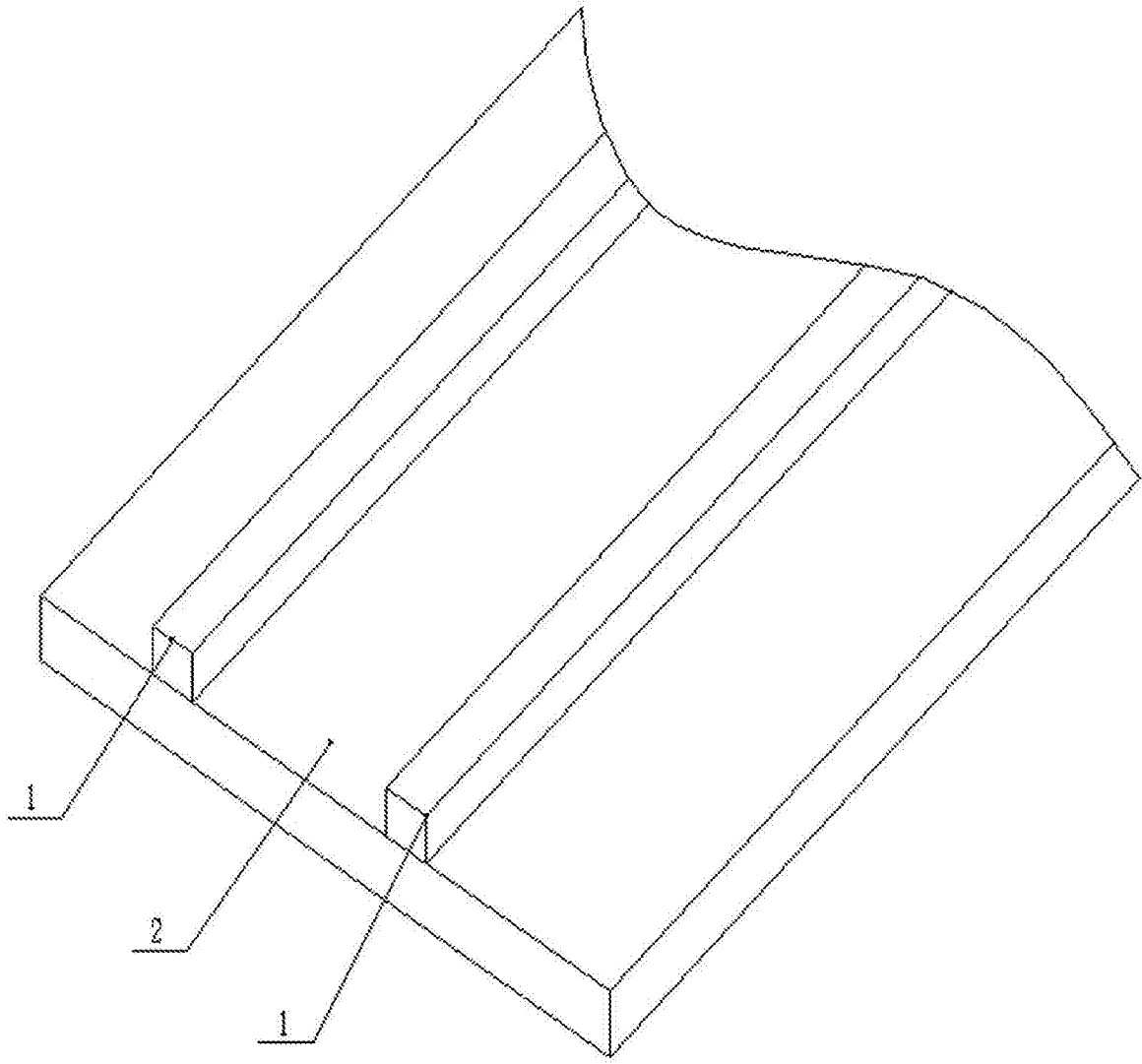


图1

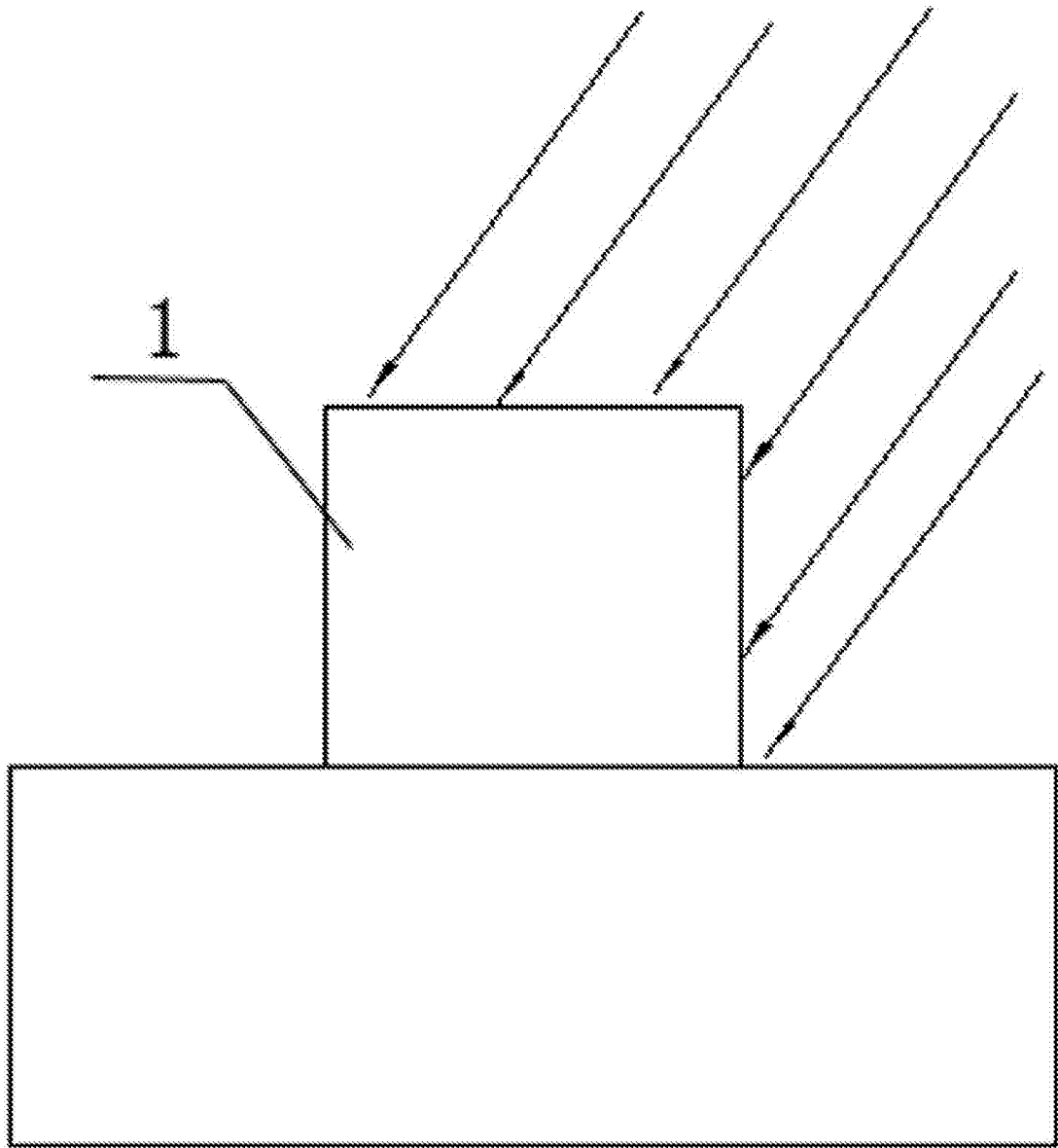


图2