

证书号第8076184号



专利公告信息

发明专利证书

发明名称：一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法

专利权人：广东国腾量子科技有限公司;上海交通大学

地址：526238 广东省肇庆市高新区北江大道18号富民大厦1319室

发明人：何广强;姜震;息朝祥;胡敏;郭邦红

专利号：ZL 2021 1 0739302.0

授权公告号：CN 113515000 B

专利申请日：2021年06月30日

授权公告日：2025年07月15日

申请日时申请人：广东国腾量子科技有限公司;上海交通大学

申请日时发明人：何广强;姜震;息朝祥;胡敏;郭邦红

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

申长雨





(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113515000 A

(43) 申请公布日 2021.10.19

(21) 申请号 202110739302.0

(22) 申请日 2021.06.30

(71) 申请人 广东国腾量子科技有限公司

地址 526238 广东省肇庆市高新区北江大道18号富民大厦1319室

申请人 上海交通大学

(72) 发明人 何广强 姜震 息朝祥 胡敏
郭邦红

(51) Int. Cl.

G02F 1/39 (2006.01)

G02F 1/355 (2006.01)

权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法

(57) 摘要

本发明公开了一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法通过制备直波导结构,然后将泵浦光从直波导结构的梯形截面的凸起部分正入射到直波导中进行传播,在直波导进行自发参量下转换过程的失配量,经过直波导结构内发生自发参量下转换过程后,一个频率为 ω_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_i 的闲置光光子。本发明提供的非线性直波导的横截面为梯形,该截面结构可以调整直波导的色散关系,改变泵浦光、信号光和闲置光空间模式匹配,实现更宽带的信号光与闲置光光谱。

步骤1:制备直波导结构,在衬底的上表面生成LiNbO₃晶体薄膜层,所述LiNbO₃晶体薄膜层上设置有梯形截面的凸起

步骤2: 泵浦光从直波导结构的梯形截面的凸起部分正入射到直波导中进行传播,在直波导进行自发参量下转换过程的失配量

步骤3: 经过直波导结构内发生自发参量下转换过程后,一个频率为 ω_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_i 的闲置光光子

1. 一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 该方法包括以下步骤:

步骤1: 制备直波导结构, 在衬底的上表面生成 LiNbO_3 晶体薄膜层, 所述 LiNbO_3 晶体薄膜层上设置有梯形截面的凸起;

步骤2: 泵浦光从直波导结构的梯形截面的凸起部分正入射到直波导中进行传播, 在直波导进行自发参量下转换过程的失配量:

所述 LiNbO_3 晶体薄膜层的二阶非线性极化系数 $x^{(2)}$ 沿泵浦光传播方向周期性反转, 实现二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = +1$ 的晶畴和二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = -1$ 的晶畴规律交替出现, 实现补偿多个自发参量下转换过程的波矢失配量 $\Delta\vec{k}$;

步骤3: 经过直波导结构内发生自发参量下转换过程后, 一个频率为 w_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 w_s 的信号光光子和一个频率为 w_l 的闲置光光子。

2. 如权利要求1所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述 LiNbO_3 晶体薄膜层厚度 d_2 为180-220nm;

梯形截面的凸起设置在 LiNbO_3 晶体薄膜层的中部, 梯形截面的凸起的横截面为等腰梯形, 等腰梯形的高度 d_1 为380-420nm, 上底的长度 W 为1500-1700nm, 腰与下底的夹角 θ 为65-80度。

3. 如权利要求1所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述 LiNbO_3 晶体薄膜层掺杂4%-6%MgO。

4. 如权利要求3所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, LiNbO_3 晶体薄膜层掺杂5%MgO。

5. 如权利要求1所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述衬底层的材质为 SiO_2 , 所述衬底的长度 L 为6.5-10mm, 高度 D 为1.8-2.2 μm 。

6. 如权利要求5所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述衬底的长度 L 为8mm, 高度 D 为2 μm 。

7. 如权利要求2所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述 d_2 的厚度为200nm。

8. 如权利要求2所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述等腰梯形的高度 d_1 为400nm, 上底的长度 W 为1600nm, 腰与下底的夹角 θ 的角度为75度。

9. 如权利要求1所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 记泵浦光、信号光和闲置光的波矢分别为 $\vec{k}_p$, $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_l$, 则波矢失配量 $\Delta\vec{k}$ 可以通过以周期为 Λ 变化的 $x^{(2)}$ 来补偿, 其中周期 Λ 为 $\Lambda = 2\pi / \Delta k$ 。

10. 如权利要求9所述的一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 波矢失配量 $\Delta\vec{k}$ 满足动量守恒: $\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_l$ 。

一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法

技术领域

[0001] 本发明涉及的量子信息技术领域,具体涉及一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法。

背景技术

[0002] 量子纠缠描述的是粒子或粒子组之间的一种关联特性。量子纠缠源是量子通信系统中不可或缺的部分。基于非线性材料的二阶非线性极化系数的作用下发生自发参量下转换 (Spontaneous parametric down-conversion, SPDC) 过程,是一种产生能量-时间纠缠的有效方案。自发参量下转换是指二阶非线性晶体中泵浦光(频率为 w_p)和非线性晶体相互作用生成信号光(频率为 w_s)和闲置光(频率为 w_l)的非线性参量过程。该过程需要满足能量守恒条件($w_p = w_s + w_l$),而动量守恒条件($\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_l$)一般不满足。对于LiNbO₃直波导,通常采用准相位匹配技术来补偿非线性过程中的波矢失配量 $\Delta\vec{k}$ ($\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_l$)。

[0003] 然而,准相位匹配技术通常只能匹配一个波矢失配量 $\Delta\vec{k}$,所以产生的信号光闲置光光谱较窄,难以产生超宽带的纠缠光子对,因此需要对现有技术进行进一步的改进。

发明内容

[0004] 本发明针对现有技术中存在的上述不足,提供了一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法。

[0005] 为实现上述目的,本发明采取的技术方案如下:一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法,该方法包括以下步骤:

[0006] 步骤1:制备直波导结构,在衬底的上表面生成LiNbO₃晶体薄膜层,所述LiNbO₃晶体薄膜层上设置有梯形截面的凸起;

[0007] 步骤2:泵浦光从直波导结构的梯形截面的凸起部分正入射到直波导中进行传播,在传播过程中进行自发参量下转换过程;

[0008] 步骤3:所述LiNbO₃晶体薄膜层的二阶非线性极化系数 $x^{(2)}$ 沿泵浦光传播方向周期性反转,实现二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = +1$ 的晶畴和二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = -1$ 的晶畴规律交替出现,补偿多个自发参量下转换过程的失配量 $\Delta\vec{k}$;

[0009] 步骤4:经过直波导结构内发生自发参量下转换过程后,一个频率为 w_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 w_s 的信号光光子和一个频率为 w_l 的闲置光光子。

[0010] 所述LiNbO₃晶体薄膜层设置在衬底层的上表面,所述LiNbO₃晶体薄膜层厚度d2为180-220nm;

[0011] 梯形截面的凸起设置在LiNbO₃晶体薄膜层的中部,梯形截面的凸起的横截面为等腰梯形,等腰梯形的高度d1为380-420nm,上底的长度W为1500-1700nm,腰与下底的夹角 θ 为65-80度。

[0012] 优选地,所述LiNbO₃晶体薄膜层掺杂4%-6%MgO。

- [0013] 优选地, LiNbO_3 晶体薄膜层掺杂 5% MgO 。
- [0014] 优选地, 所述衬底层的材质为 SiO_2 , 所述衬底的长度 L 为 6.5-10mm, 高度 D 为 1.8-2.2 μm 。
- [0015] 优选地, 所述衬底的长度 L 为 8mm, 高度 D 为 2 μm 。
- [0016] 优选地, 所述 d_2 的厚度为 200nm。
- [0017] 优选地, 所述等腰梯形的高度 d_1 为 400nm, 上底的长度 W 为 1600nm, 腰与下底的夹角 θ 为 75 度。
- [0018] 优选地, 记泵浦光、信号光和闲置光的波矢分别为 $\vec{k}_p$, $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_i$, 则失配量 $\Delta\vec{k}$ 可以通过以周期为 Λ 变化的 $x^{(2)}$ 来补偿, 其中周期 Λ 表示为: $\Lambda = 2\pi / \Delta k$ 。
- [0019] 优选地, 波矢失配量 $\Delta\vec{k}$ 满足动量守恒: $\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i$ 。
- [0020] 本发明有益的技术效果:
- [0021] 1、本发明提供的非线性直波导的横截面为梯形, 该截面结构可以调整直波导的色散关系, 改变泵浦光、信号光和闲置光空间模式匹配, 实现更宽带的信号光与闲置光光谱。
- [0022] 2、本发明采用准相位匹配技术来补偿非线性过程中的波矢失配量。通过改变铌酸锂晶体的二阶非线性系数 $x^{(2)}$, 能够同时补偿多个自发参量下转换过程的相位失配量。
- [0023] 3、本发明提供可以产生超宽带的信号光和闲置光光谱, 可以用于制备能量-时间纠缠的双光子对。

附图说明

- [0024] 图1为本发明一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法的步骤流程图。
- [0025] 图2为本发明中直波导结构整体结构示意图。
- [0026] 图3为本发明中直波导结构横截面示意图。
- [0027] 图4为本发明中直波导结构的结构色散波形图。
- [0028] 图5为本发明中准周期晶格结构示意图。
- [0029] 图6为本发明中每个准周期对应的极化长度示意图。

具体实施方式

- [0030] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合实施例对本发明进行进一步详细说明, 但本发明要求保护的范围并不局限于下述具体实施例。
- [0031] 如图1所示, 一种超宽带能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 该方法包括以下步骤:
- [0032] 步骤1: 制备直波导结构: 在温度 18-28 $^{\circ}\text{C}$ 的环境下, 在衬底上生成 LiNbO_3 晶体薄膜层, 构成直波导结构, 所述 LiNbO_3 晶体薄膜层上设置有梯形截面的凸起;
- [0033] 步骤2: 泵浦光从直波导结构的梯形截面的凸起部分正入射到直波导中进行传播, 在传播过程中进行自发参量下转换过程;
- [0034] 步骤3: 所述 LiNbO_3 晶体薄膜层的二阶非线性极化系数 $x^{(2)}$ 沿泵浦光传播方向周期性反转, 实现二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = +1$ 的晶畴和二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = -1$ 的晶畴规律交替出现, 补偿多个自发参量下转换过程的失配量 $\Delta\vec{k}$;

[0035] 步骤4:经过直波导结构内发生发参量下转换过程后,一个频率为 w_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 w_s 的信号光光子和一个频率为 w_l 的闲置光光子。

[0036] 如图2-6所述,优选地,本实施例中直波导结构生成温度采用20-25度,直波导结构包括衬底层1,所述衬底1层上设置有LiNbO₃晶体薄膜层2,所述LiNbO₃晶体薄膜层2掺杂4%-6%MgO,优选地,本实施例中MgO的配比为5%,LiNbO₃薄膜容易在强激光下受到损伤,掺杂5%MgO可以提高LiNbO₃薄膜的抗激光损伤阈值。所述非线性直波导由室温下(20℃至25℃)5%MgO掺杂的LiNbO₃晶体薄膜制备而成。

[0037] 所述衬底1采用SiO₂衬底,所述衬底1的长度L为6.5-10mm,高度D为1.8-2.2 μ m,本实施例中,优选值为L为8mm,厚度D为2 μ m。

[0038] LiNbO₃晶体薄膜层2的厚度d2为180-220nm层,在LiNbO₃晶体薄膜层的中部设置有LiNbO₃晶体薄膜层凸起3,所述LiNbO₃晶体薄膜层凸起3的横截面为等腰梯形,等腰梯形的高度d1为380-420nm,上底的长度W为1500-1700nm,腰与下底的夹角 θ 的角度为65-80度。本实施例中,各参数的优选值为所述d2的厚度为200nm。所述等腰梯形的高度d1为400nm,上底的长度W为1600nm,腰与下底的夹角 θ 的角度为75度。

[0039] 本发明的结构色散如图4所示,通过优化设计截面结构可以改变直波导的结构色散,根据不同的结构色散,可以调整自发参量下转换过程中的波矢失配量,提高自发参量下转换过程的非线性转换效率。

[0040] 通过外加电压改变LiNbO₃晶体的二阶非线性系数 $x^{(2)}$ 的正负系数,LiNbO₃晶体加电压的区域与不加电压的区域的二阶非线性系数分别为 $x^{(2)} = -1$, $x^{(2)} = +1$,分别对应图4中白色与黑色区域,它们交替排列出现,每一个白色与黑色区域的宽度 Λ 随着直波导的位置在变化,即准周期极化结构。利用准周期极化结构可以补偿自发参量下转换过程的波矢失配量,实现更高的非线性转换效率。

[0041] 非线性直波导的长度为8mm,泵浦光波长优选为775nm,泵浦光从波导截面梯形部分正入射到直波导中,由于LiNbO₃晶体的二阶非线性系数,在直波导结构内发生发参量下转换过程,一个频率为 w_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 w_s 的信号光光子和一个频率为 w_l 的闲置光光子。产生的信号光和闲置光的波长位于1550nm的两侧。该过程满足能量匹配条件,但不满足动量守恒条件 $\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_l$ 。

[0042] 记泵浦光、信号光和闲置光的波矢分别为 $\vec{k}_p$, $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_l$,则失配量 $\Delta\vec{k}$ 可以通过以周期为 Λ 变化的 $x^{(2)}$ 来补偿,波矢失配量 $\Delta\vec{k}$ 满足动量守恒: $\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_l$,为了实现动量守恒条件 $\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_l$,采用准周期极化结构来补偿非线性过程中的波矢失配量,通过改变LiNbO₃晶体的二阶非线性系数 $x^{(2)}$,能够同时补偿多个自发参量下转换过程的失配量。二阶非线性系数的变化周期随着晶体的坐标而改变,以同时补偿多个自发参量下转换过程。我们采取啁啾的形式改变 $x^{(2)}$ 的翻转周期。 $x^{(2)}$ 的翻转周期可以表示为: $\Lambda = 2\pi / \Delta k$ 。

[0043] 使用LiNbO₃薄膜结构的有效折射率,并选取信号光和闲置光的光谱宽度为10THz,非线性直波导的长度为8mm,用以上参数可以设计得到 $x^{(2)}$ 的空间分布如图5所示。该图展示了部分波导的 $x^{(2)}$ 分布,其中黑色表示 $x^{(2)} = +1$,白色表示 $x^{(2)} = -1$ 。其中每一个准周期的宽度如图6所示。基于该实施案例的非线性直波导,可以产生带宽达10THz的超宽带能量-时间双光子纠缠。通过优化参数及准周期结构,可以实现更大的带宽。

[0044] 根据上述说明书的揭示和教导,本发明所属领域的技术人员还可以对上述实施方式进行变更和修改。因此,本发明并不局限于上面揭示和描述的具体实施方式,对发明的一些修改和变更也应当落入本发明的权利要求的保护范围内。此外,尽管本说明书中使用了一些特定的术语,但这些术语只是为了方便说明,并不对发明构成任何限制。

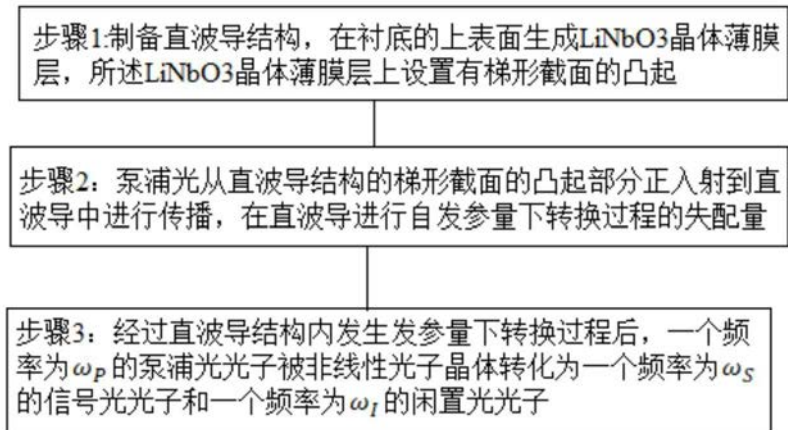


图1



图2

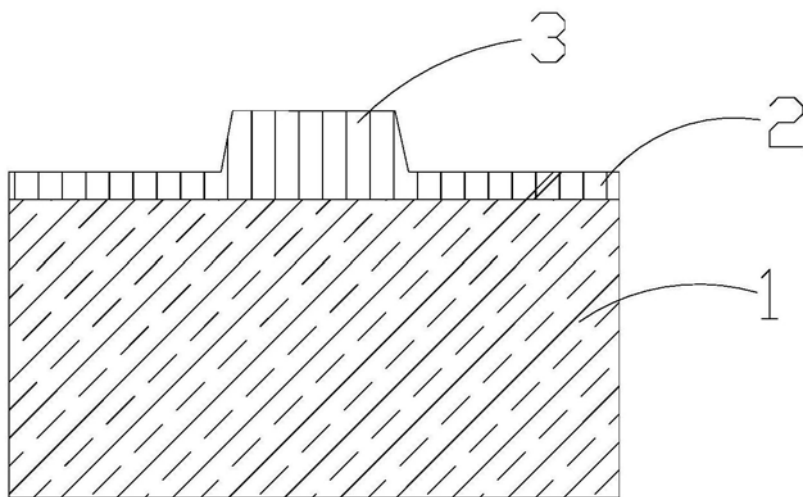


图3

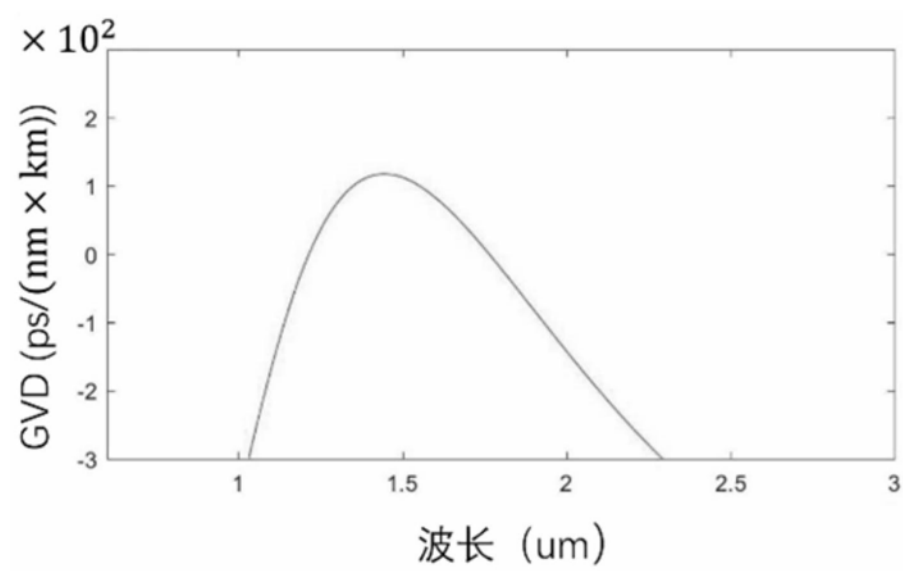


图4

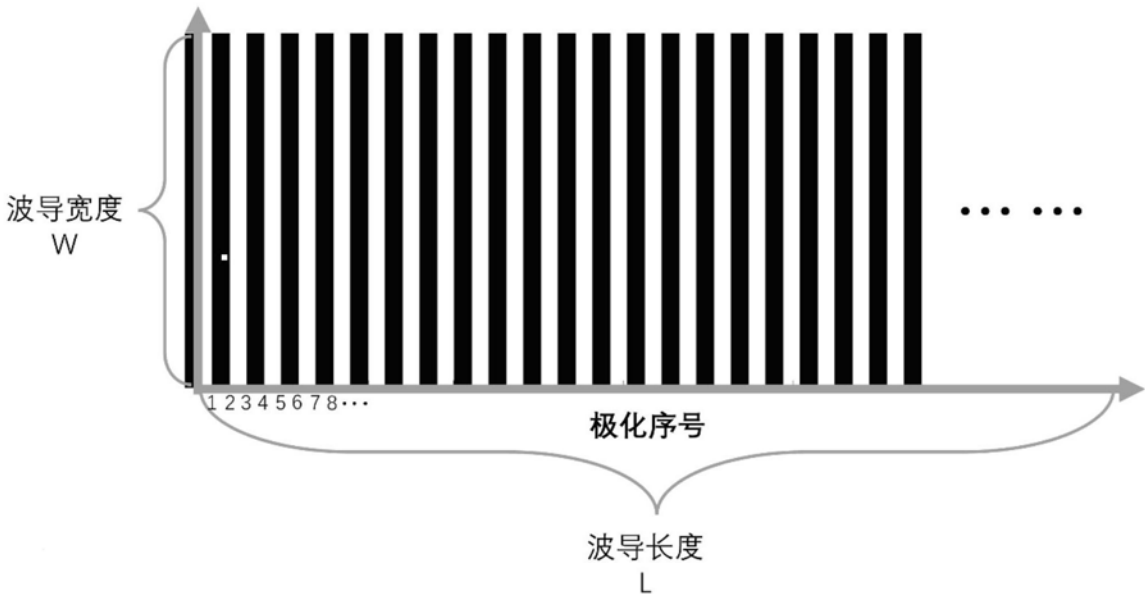


图5

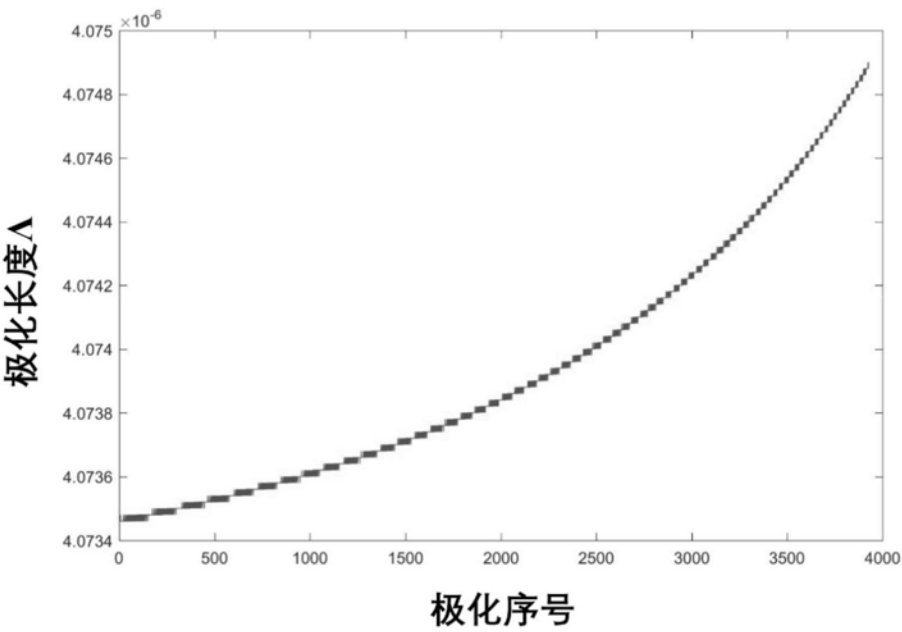


图6