

证书号第7216326号



专利公告信息

发明专利证书

发明名称：一种微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法

专利权人：上海交大平湖智能光电研究院;上海交通大学

地址：314200 浙江省嘉兴市平湖市经济开发区新兴二路988号三号楼三楼

发明人：陈洋河;何广强

专利号：ZL 2022 1 1576635.7

授权公告号：CN 115933275 B

专利申请日：2022年12月09日

授权公告日：2024年07月23日

申请日时申请人：上海交大平湖智能光电研究院;上海交通大学

申请日时发明人：陈洋河;何广强

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 115933275 A

(43) 申请公布日 2023. 04. 07

(21) 申请号 202211576635.7

(22) 申请日 2022.12.09

(71) 申请人 上海交大平湖智能光电研究院
地址 314200 浙江省嘉兴市平湖市经济开
发区新兴二路988号三号楼三楼
申请人 上海交通大学

(72) 发明人 陈洋河 何广强

(74) 专利代理机构 上海恒慧知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 31317
专利代理师 徐红银 张琳

(51) Int.Cl.
G02F 1/365 (2006.01)

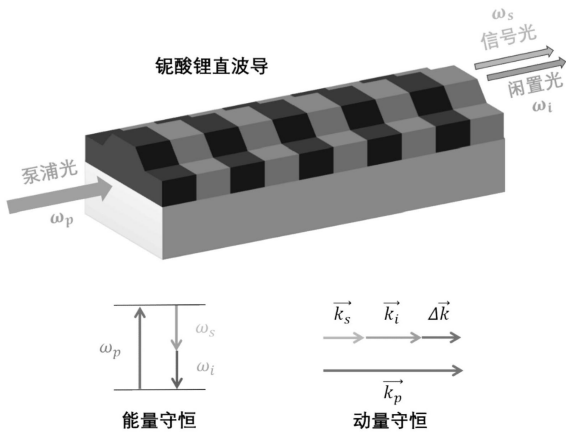
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法

(57) 摘要

本发明提供一种微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性直波导,基于所述铌酸锂晶体膜的二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$,在所述直波导结构内发生自发参量下转换SPDC过程,一个泵浦光子产生一个信号光光子和一个闲置光光子;产生的所述信号光光子和闲置光光子为超纠缠态双光子对,即在能量-时间维度存在纠缠关系,同时在偏振维度也存在纠缠关系。本发明通过优化设计截面结构可以调整波导的色散关系,控制双光子在偏振维度的纠缠程度,优化自发参量下转化(SPDC)过程的产生效率,实现宽带的信号光与闲置光光谱。



1. 一种微纳波导,其特征在于,包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性直波导,基于所述铌酸锂晶体膜的二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$,在所述直波导结构内发生自发参量下转换SPDC过程,一个泵浦光光子产生一个信号光光子和一个闲置光光子;产生的所述信号光光子和闲置光光子为超纠缠态双光子对,即在能量-时间维度存在纠缠关系,同时在偏振维度也存在纠缠关系。

2. 根据权利要求1所述的一种微纳波导,其特征在于,通过优化所述非线性直波导横截面的结构改变所述直波导的色散关系,控制生成双光子对的偏振纠缠关系以及带宽分布。

3. 根据权利要求1所述的一种微纳波导,其特征在于,所述铌酸锂晶体膜为z-cut铌酸锂薄膜,其底部设有 SiO_2 层构成的衬底。

4. 根据权利要求3所述的一种微纳波导,其特征在于,所述铌酸锂晶体膜的厚度为 $d_2=0.6\mu\text{m}$,宽度 $W=2\mu\text{m}$,刻蚀深度 $d_1=0.4\mu\text{m}$,刻蚀角度 $\theta=75^\circ$,所述衬底厚度 $d_3=2\mu\text{m}$ 。

5. 一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,其特征在于,泵浦光正入射至所述非线性直波导,入射的泵浦光频率 ω_p ,发生自发参量下转换后生成信号光 ω_s 和闲置光 ω_i ;在所述转化过程中,进行波矢失配量补偿,使所述信号光和闲置光之间在偏振维度和能量-时间维度同时存在纠缠关系,产生超纠缠态双光子对,并且具有一定的带宽分布。

6. 根据权利要求5所述的一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,其特征在于,在所述自发参量下转换过程中,满足能量守恒条件 $\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$;基于波导的色散关系,不满足动量守恒条件 $k_p = k_s + k_i$,泵浦光和信号光、闲置光之间存在波矢失配量 $\Delta\vec{k} = k_p - k_s - k_i$;用单周期极化的方式,进行波矢失配量补偿,所述补偿的波矢失配量为 $k_{pp} = k_p - k_s - k_i$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,其特征在于,所述单周期极化的晶体能够补偿的波矢失配量 k_{pp} 与极化周期 Λ 满足 $k_{pp} = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 。

8. 根据权利要求6所述的一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,其特征在于,对于铌酸锂负单轴晶体中存在的双折射现象,一束泵浦光(o光)正入射至非线性波导,经过自发参量下转换后生成的信号光(o/e光)和闲置光(o/e光),其偏振态共有 $2^2=4$ 种可能的情况,不同偏振情况具有不同的转化效率;通过控制非线性直波导的色散关系,使其中两种偏振态情况具有极高的转化效率,而其余偏振态情况的转化效率极低,使得生成双光子对的量子态满足 $|\Psi\rangle \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle)$,其中 $|H\rangle$ 代表水平偏振态, $|V\rangle$ 代表垂直偏振态,实现偏振维度的双光子纠缠。

9. 根据权利要求6所述的一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,其特征在于,自发参量下转换后生成信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 为在能量-时间维度具有纠缠关系的双光子对,其联合不确定乘积满足 $\Delta(\omega_s + \omega_i) \cdot \Delta(t_s - t_i) < 1$, t_s 和 t_i 表示到达时间。

10. 一种偏振和能量-时间量子超纠缠态制备装置,其特征在于,使用权利要求1-4任一项所述的微纳波导或者采用权利要求5-9任一项所述的基于微纳波导的偏振和能量-时间

量子超纠缠态制备方法。

一种微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法

技术领域

[0001] 本发明涉及量子通信领域,具体地,涉及一种微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法。

背景技术

[0002] 量子纠缠源是量子系统中不可或缺的部分。基于二阶非线性构成的铌酸锂波导结构,在腔内发生自发参量下转换 (SPDC) 过程,是一种产生量子纠缠源的有效方案。SPDC过程是指二阶非线性材料中泵浦光(频率为 ω_p)和非线性材料相互作用生成信号光(频率为 ω_s)和闲置光(频率为 ω_i)的非线性过程。该过程需要满足能量守恒条件($\omega_p = \omega_s + \omega_i$)和动量守恒条件($\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$)。

[0003] 量子纠缠可以在多个自由度中产生,如偏振自由度、空间模式自由度和时间自由度。这种在多个自由度都存在纠缠关系的量子态称为超纠缠态。超纠缠光子对具有优秀的信息携带能力,是量子通信系统非常理想的物理载体。由于超纠缠态具有多个自由度,因此可以提高量子通信的信道容量和安全性,在量子信息科学等诸多应用实践领域发挥着重要作用。

[0004] 目前,量子超纠缠态的制备往往是利用光纤法布里-珀罗腔 (PPFC) 和50:50分光器中的HOM干涉,只能制备离散变量的超纠缠光子对,并且难以实现片上集成。

发明内容

[0005] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法。

[0006] 根据本发明的一个方面,提供一种微纳波导,包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性直波导,基于所述铌酸锂晶体膜的二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$,在所述直波导结构内发生自发参量下转换SPDC过程,一个泵浦光子产生一个信号光光子和一个闲置光光子;产生的所述信号光光子和闲置光光子为超纠缠态双光子对,即在能量-时间维度存在纠缠关系,同时在偏振维度也存在纠缠关系。

[0007] 优选地,所述非线性直波导的横截面为梯形,通过优化所述横截面的结构改变所述直波导的色散关系,控制生成双光子对的偏振纠缠关系以及带宽分布。

[0008] 优选地,所述铌酸锂晶体膜为z-cut铌酸锂薄膜,其底部设有SiO₂层构成的衬底。

[0009] 优选地,所述铌酸锂晶体膜的厚度为 $d_2 = 0.6\mu\text{m}$,宽度 $W = 2\mu\text{m}$,刻蚀深度 $d_1 = 0.4\mu\text{m}$,刻蚀角度 $\theta = 75^\circ$,所述衬底厚度 $d_3 = 2\mu\text{m}$ 。

[0010] 根据本发明的第二个方面,提供一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,泵浦光正入射至所述非线性直波导,入射的泵浦光频率 ω_p ,发生自发参量下转换后生成信号光 ω_s 和闲置光 ω_i ;在所述转化过程中,进行波矢失配量补偿,使所述信号光和闲置光之间在偏振维度和能量-时间维度同时存在纠缠关系,产生超纠缠态双光子对,并且具有一定的带宽分布。

[0011] 优选地,在所述自发参量下转换过程中,满足能量守恒条件 $\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$;基于波导的色散关系,不满足动量守恒条件 $k_p = k_s + k_i$,泵浦光和信号光、闲置光之间存在波矢失配量 $\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i$;用单周期极化的方式,进行波矢失配量补偿,所述补偿的波矢失配量 $k_{pp} = k_p - k_s - k_i$ 。

[0012] 优选地,所述单周期极化的晶体能够补偿的波矢失配量 k_{pp} 与极化周期 Λ 满足 $k_{pp} = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 。

[0013] 优选地,对于晶体中存在的双折射现象,一束泵浦光(o光)正入射至非线性波导,经过自发参量下转换后生成的信号光(o/e光)和闲置光(o/e光),其偏振态共有 $2^2=4$ 种可能的情况,不同偏振情况具有不同的转化效率;通过控制非线性直波导的色散关系,可以让其中两种偏振态情况具有极高的转化效率,而、其余偏振态情况的转化效率极低,使得生成双光子对的量子态满足 $|\Psi\rangle \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle)$ (其中 $|H\rangle$ 代表水平偏振态, $|V\rangle$ 代表垂直偏振态),从而实现偏振维度的双光子纠缠。

[0014] 优选地,自发参量下转换后生成信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 为在能量-时间维度具有纠缠关系的双光子对,其联合不确定乘积满足 $\Delta(\omega_s + \omega_i) \cdot \Delta(t_s - t_i) < 1$, t_s 和 t_i 表示到达时间。

[0015] 根据本发明的第三个方面,提供一种偏振和能量-时间量子超纠缠态制备装置,使用上述的微纳波导或者采用上述的基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法。

[0016] 与现有技术相比,本发明具有如下的有益效果:

[0017] 本实施例提供的微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,通过优化设计截面结构可以调整波导的色散关系,控制双光子在偏振维度的纠缠程度,优化自发参量下转化SPDC过程的产生效率,实现一定宽带的信号光与闲置光光谱。

[0018] 本实施例提供的微纳波导及偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,可以产生在能量-时间维度具有纠缠关系的双光子对,其联合不确定乘积满足 $\Delta(\omega_s + \omega_i) \cdot \Delta(t_s - t_i) < 1$ 。

附图说明

[0019] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0020] 图1为本发明一实施例中可产生超纠缠态双光子对的非线性直波导设计示意图以及能量守恒条件和动量守恒条件。

[0021] 图2为本发明一优选实施例中产生超纠缠态双光子对的非线性直波导横截面结构以及对应的色散关系,该图针对不同的偏振态(o/e光),分别给出了对应的有效折射率随波长的变化曲线。

[0022] 图3为本发明一优选实施例中产生超纠缠态双光子对的非线性直波导在泵浦光(o光)波长为780nm时对应的模式电场分布。

[0023] 图4为本发明一优选实施例中不同切割角 θ 及偏振态情况(o/e光)对应的SPDC过程

转化效率曲线。

[0024] 图5为本发明一优选实施例中生成双光子对的联合谱幅度(JSA)。

具体实施方式

[0025] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明的保护范围。

[0026] 参见图1,本发明提供一种微纳波导,包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性直波导,基于铌酸锂晶体膜的二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$,在直波导结构内发生自发参量下转换SPDC过程,一个泵浦光光子产生一个信号光光子和一个闲置光光子;产生的信号光光子和闲置光光子为超纠缠态双光子对,即在能量-时间维度存在纠缠关系,同时在偏振维度也存在纠缠关系。

[0027] 本实施例提供的微纳波导,其基于优化设计的截面结构获得的波导的色散关系,控制双光子在偏振维度的纠缠程度,优化自发参量下转化(SPDC)过程的产生效率,能够获得满足一定带宽的超纠缠态双光子对。超纠缠光子对具有优秀的信息携带能力,是量子通信系统非常理想的物理载体;获得超纠缠态双光子对提高了量子通信的信道容量和安全性,能够在量子信息科学等诸多应用实践领域发挥着重要作用。

[0028] 在本发明的一个优选实施例中,非线性直波导的横截面为梯形,通过优化横截面的结构改变所述直波导的色散关系,控制生成双光子对的偏振纠缠关系以及带宽分布。当然,横截面的形状并不仅限于梯形。一般的,横截面结构包括了铌酸锂晶体膜的厚度 d_2 ,宽度 W ,刻蚀深度 d_1 ,刻蚀角度 θ ,衬底厚度 d_3 ,色散关系曲线通过设置这些参数,通过软件仿真而得。

[0029] 在本发明的一个优选实施例中,非线性直波导的横截面如图2(a)所示,波导结构是在 $d_2=0.6\mu\text{m}$ 厚的z-cut铌酸锂薄膜上制备而成,衬底为 SiO_2 层,厚度 $d_3=2\mu\text{m}$ 。波导的优选宽度 $W=2\mu\text{m}$,优选刻蚀深度 $d_1=0.4\mu\text{m}$,优选刻蚀角度 $\theta=75^\circ$ 。该结构对应不同偏振光(o/e光)的色散关系如图2(b)所示,在泵浦光(o光)波长为780nm时对应的模式电场分布如图3所示。通过优化设计截面结构可以调整直波导的色散关系,控制双光子在偏振维度的纠缠程度,优化自发参量下转化(SPDC)过程的产生效率,实现宽带的信号光与闲置光光谱。

[0030] 基于相同的发明构思,本发明还提供一种基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法,泵浦光正入射至非线性直波导,入射的泵浦光频率 ω_p ,发生自发参量下转换后生成信号光 ω_s 和闲置光 ω_i ;在转化过程中,进行波矢失配量补偿,使信号光和闲置光之间在偏振维度和能量-时间维度同时存在纠缠关系,产生超纠缠态双光子对,并且具有一定的带宽分布。

[0031] 在本发明的一个优选实施例中,如图1所示,非线性直波导的长度为 $L=8\text{mm}$,泵浦光波长优选为780nm,泵浦光正入射到直波导中,由于铌酸锂晶体的二阶非线性系数,在直波导结构内发生自发参量下转换过程,产生信号光光子和闲置光光子,信号光和闲置光的波长位于1560nm的两侧,该过程满足能量守恒条件 $\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$ 。但由于波导特定的色散关系,该过程并不满足动量守恒条件 $k_p = k_s + k_i$,泵浦光和信号光、闲置光之间存在波矢失

配量 $\Delta \vec{k} = k_p - k_s - k_i$ 。

[0032] 在本发明的一个优选实施例中,为了补偿自发参量下转换过程中的波矢失配量 $\Delta \vec{k}$,采用单周期极化的方式,使得补偿的波矢失配量 $k_{pp} = k_p - k_s - k_i$ 。根据准相位匹配的理论,周期性极化的晶体能够补偿的波矢失配量 k_{pp} 与极化周期 Λ 满足 $k_{pp} = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 。

[0033] 一较佳实施例中,当刻蚀角度 $\theta = 75^\circ$ 、泵浦光波长为 780nm 时,根据色散关系曲线,泵浦光(o光)入射经 SPDC 产生信号光(o/e光)和限制光(e/o光),当信号光和闲置光频率相等时所产生的波矢失配量 $\Delta k = 1.8205 \times 10^6 \text{m}^{-1}$,从而所需的极化周期 $\Lambda = 3.4513 \text{m}$ 。

[0034] 当信号光和闲置光频率不同时,SPDC 过程会有一部分波矢失配量 Δk 无法通过单周期极化完全补偿,这时 SPDC 过程的转化效率会按照 $\text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k \cdot L}{2}\right)$ 降低。由于晶体中存在双折射现象,一束泵浦光(o光)正入射至非线性波导,经过自发参量下转换后生成的信号光(o/e光)和闲置光(o/e光),其偏振态共有 $2^2 = 4$ 中可能的情况,因此不同偏振情况具有不同的转化效率。不同切割角 θ 及偏振态情况(o/e光)对应的 SPDC 过程转化效率曲线如图 4 所示。当信号光和闲置光同时为 o 光(或 e 光)时,SPDC 过程的转化效率极低(约为 10^{-8} 量级),可以认为这两种偏振情况几乎不存在,因此生成双光子对的量子态满足 $|\Psi\rangle \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle)$ (其中 $|H\rangle$ 代表水平偏振态, $|V\rangle$ 代表垂直偏振态),从而实现偏振维度的双光子纠缠,并且具有 192GHz 的带宽。

[0035] 由上述实施例可知,光子的偏振纠缠程度可以通过色散关系进行调控。色散关系直接影响光子的波矢 k ,从而影响波矢失配量 Δk 。又由于 SPDC 过程的转化效率是 Δk 的 sinc 函数, $\Delta k = 0$ 时转化效率最高, Δk 增大时转化效率会逐渐降低。定义 sinc 函数第一个零点所对应的双光子频率差即为带宽。即色散关系通过影响 Δk ,从而影响 sinc 函数零点的位置,从而影响带宽。

[0036] 生成双光子对的联合谱幅度(JSA)如图 5 所示,通过计算可得 $\Delta(\omega_s + \omega_i) = 9.0358 \times 10^{10}$, $\Delta(t_s - t_i) = 4.5520 \times 10^{-12}$,其联合不确定乘积 $\Delta(\omega_s + \omega_i) \cdot \Delta(t_s - t_i) = 0.4113 < 1$,说明生成的双光子对在能量-时间维度也存在纠缠关系,超纠缠态双光子对由此制备而成。

[0037] 基于相同的发明构思,本发明的其他实施例中,提供一种偏振和能量-时间量子超纠缠态制备装置,使用上述的微纳波导或者采用上述的基于微纳波导的偏振和能量-时间量子超纠缠态制备方法。

[0038] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,这并不影响本发明的实质内容。上述各优选特征在互不冲突的情况下,可以任意组合使用。

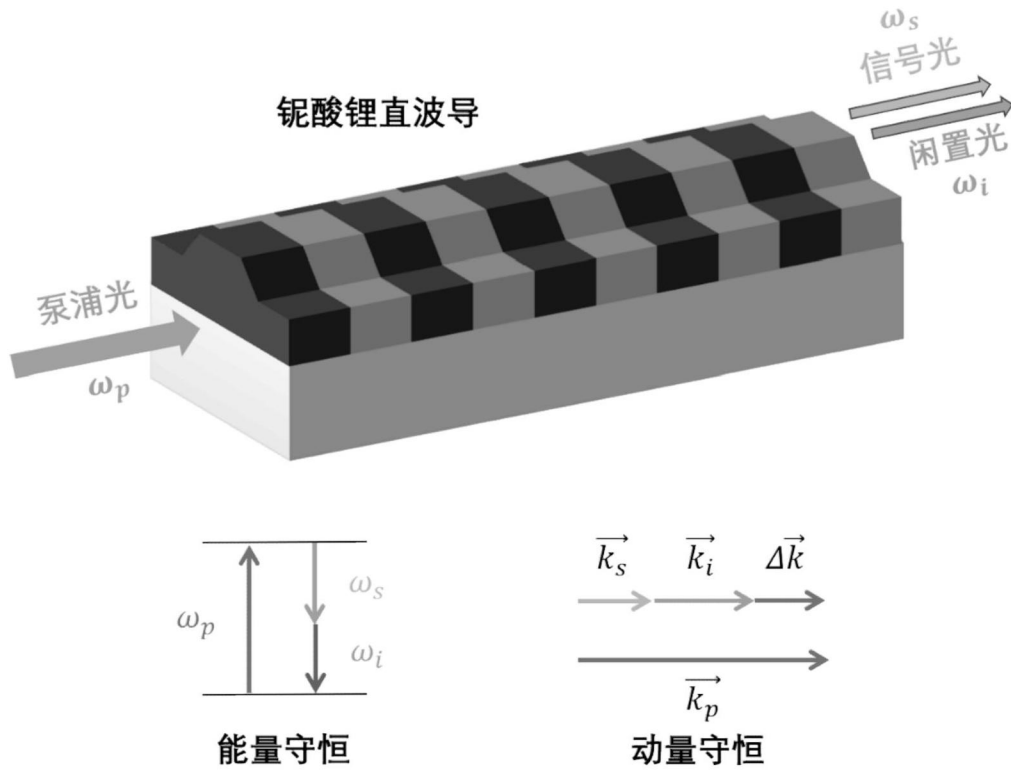


图1

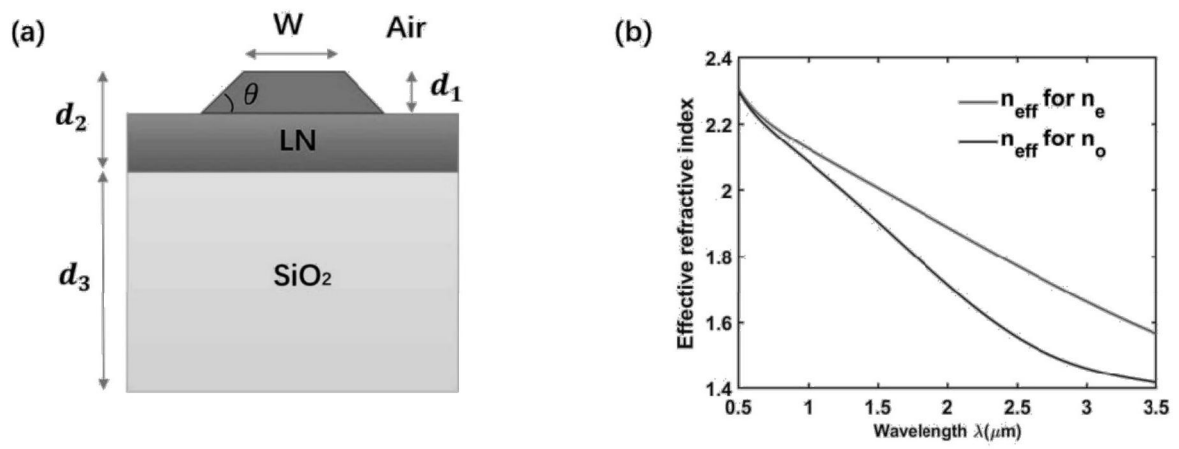


图2

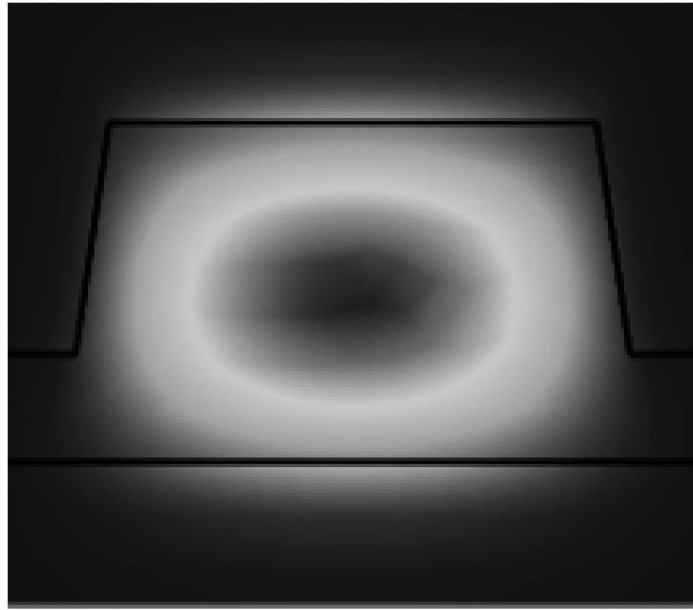


图3

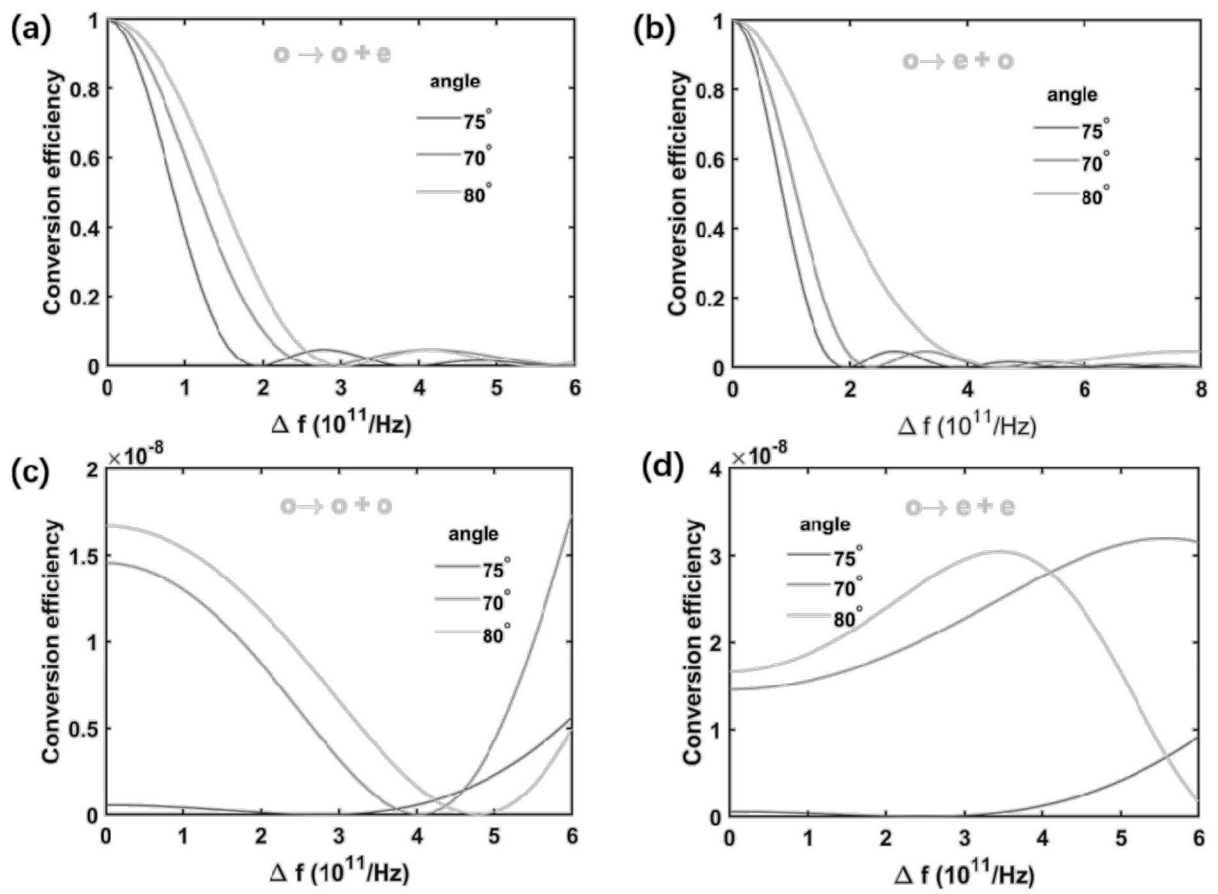


图4

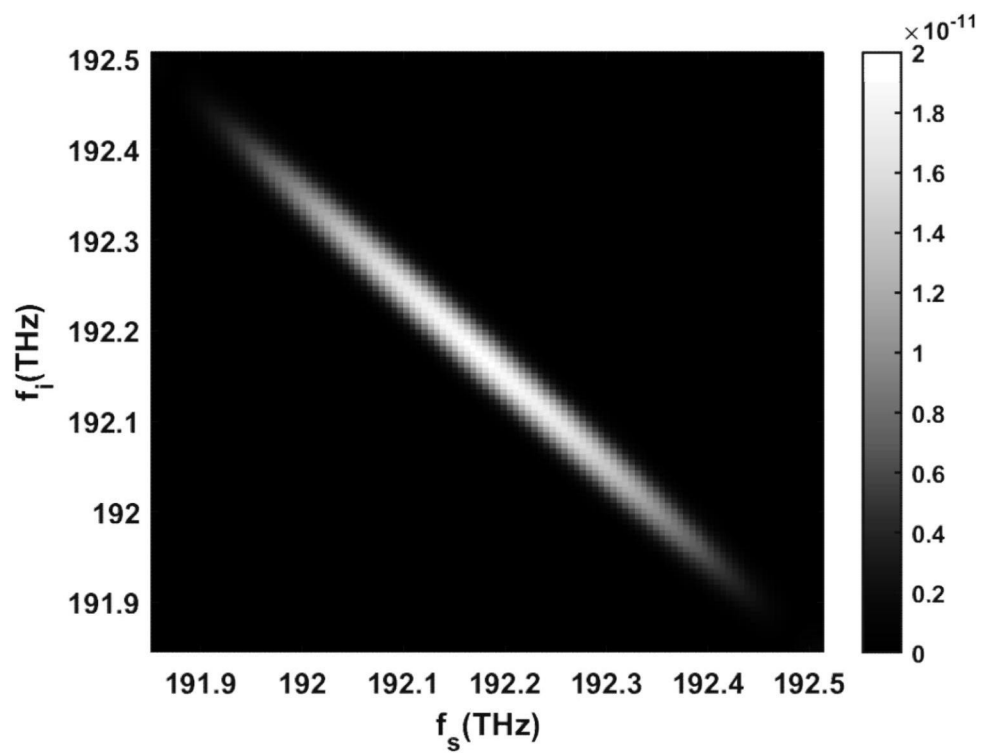


图5