

证书号第7231886号



专利公告信息

发明专利证书

发明名称：拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法

专利权人：上海交通大学

地址：200240 上海市闵行区东川路800号

发明人：胡晨华;姜震;息朝祥;何广强

专利号：ZL 2022 1 1140454.X

授权公告号：CN 115524894 B

专利申请日：2022年09月20日

授权公告日：2024年07月26日

申请日时申请人：上海交通大学

申请日时发明人：胡晨华;姜震;息朝祥;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 115524894 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 27

(21) 申请号 202211140454.X

(22) 申请日 2022.09.20

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72) 发明人 胡晨华 姜震 息朝祥 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 1/355 (2006.01)

G02F 1/35 (2006.01)

G02F 1/365 (2006.01)

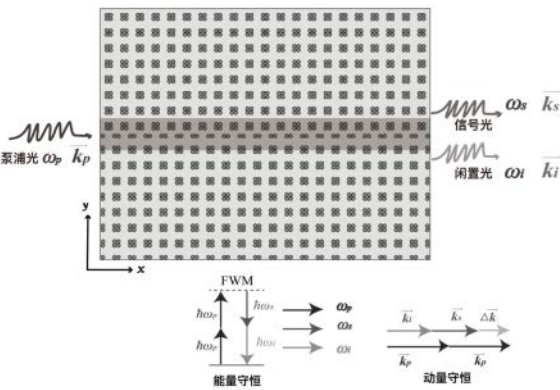
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法

(57) 摘要

本发明提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构和产生方法,包括波导分界面,所述波导分界面的两侧分别为结构不同的非线性光子晶体;所述非线性光子晶体的结构参数可调,通过调整所述结构参数调所述波导分界面处的色散关系,产生拓扑带隙,调节拓扑绝缘体的工作带宽。本发明能够产生能量-时间纠缠的双光子,其转换能量高、鲁棒性强,且实现拓扑保护传输。



1. 一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构, 设置于拓扑绝缘体中, 其特征在于, 包括非线性的波导界面, 所述波导分界面的两侧分别为结构不同的非线性光子晶体; 所述非线性光子晶体的结构参数可调; 通过调整所述结构参数调整所述波导分界面处的色散关系, 产生拓扑带隙, 从而调节所述拓扑绝缘体的工作带宽。

2. 根据权利要求1所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构, 其特征在于, 所述结构参数包括单元晶胞的晶格常数 a 、光子晶体介质棒的半径 r 以及表征介质棒位置的参数 l_x 和 l_y 。

3. 根据权利要求1所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构, 其特征在于, 所述非线性光子晶体的材料具备三阶非线性系数, 其能利用非线性的自发四波混频FWM效应产生能量和时间纠缠双光子态, 即两个泵浦光光子产生纠缠的一个信号光光子和一个闲置光光子。

4. 根据权利要求3所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构, 其特征在于, 所述拓扑绝缘体的工作带宽与所述自发四波混频FWM过程的相互作用频率重叠, 能够实现对所述纠缠双光子态的拓扑保护传输。

5. 根据权利要求3所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构, 其特征在于, 所述波导结构为非线性波导, 其由室温下, 即 20°C 至 25°C 的所述非线性光子晶体制备而成。

6. 一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 采用权利要求1-3任一项所述的波导结构, 其特征在于, 包括:

调节非线性光子晶体的结构参数, 打开拓扑带隙;

入射泵浦光 ω_p 正入射至非线性的波导界面;

入射泵浦光 ω_p 经过非线性的自发四波混频FWM过程后, 生成能量-时间纠缠双光子态的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 。

7. 根据权利要求6所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述非线性的自发四波混频FWM过程, 满足能量匹配条件 $2\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$ 和动量守恒条件 $2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$, 其中 ω_p 、 ω_s 和 ω_i 分别为泵浦光、信号光和闲置光的频率; $\vec{k}_p$ 、 $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_i$ 分别是泵浦光、信号光和闲置光的波矢量。

8. 根据权利要求6所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述入射泵浦光 ω_p 经过非线性的自发四波混频FWM过程后, 生成能量-时间纠缠双光子态的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i , 其中:

记泵浦光、信号光和闲置光的波矢量分别为 k_p 、 k_s 和 k_i , 则失配量 $\Delta k = 2k_p - k_s - k_i$;

在拓扑绝缘体的工作带宽与所述非线性的自发四波混频FWM过程的相互作用频率重叠的带宽范围内, 选择最小化所述失配量 Δk 的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 的频率, 提高能量转化效率, 同时实现纠缠双光子态的拓扑保护传输。

9. 根据权利要求8所述的一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法, 其特征在于, 所述泵浦光、信号光和闲置光的频率 ω_p 、 ω_s 和 ω_i , 都在拓扑绝缘体的工作带宽的范围内; 在所述工作带宽内选定 ω_p 后, 选择 ω_s 和 ω_i 满足所述失配量 Δk 最小。

10. 一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生装置, 其特征在于, 包括权

利要求1-5任一项所述的波导结构,或者,采用权利要求6-9任一项所述的方法。

拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法

技术领域

[0001] 本发明涉及量子通信领域的量子纠缠源制备方法,具体地,涉及拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法。

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。基于材料的三阶非线性效应而产生的自发四波混频(Four Wave Mixing, FWM)过程,是一种产生能量-时间纠缠的有效方案。自发FWM过程是指非线性光子晶体中泵浦光(频率为 ω_p)和非线性晶体相互作用生成信号光(频率为 ω_s)和闲置光(频率为 ω_i)的非线性参量过程。该过程涉及能量和动量的转换,它们必须满足 $2\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 和 $2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$,其中 $\vec{k}_p$ 、 $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_i$ 分别是泵浦光、信号光和闲置光的波矢量。为了增强FWM效应,主要考虑的是相位匹配条件。特别是,当非线性波矢量失配量($\Delta\vec{k} = 2\vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i$)满足 $\Delta\vec{k} = 0$ 时,能量转换变得更加有效。

[0003] 然而,由于非线性FWM效应产生的光子对在波导中传输时对波导的拐角转弯及结构缺陷等的鲁棒性较低,传输损耗大,不利于其在量子通信中的应用。

发明内容

[0004] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法。

[0005] 根据本发明的一个方面,提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构,设置于拓扑绝缘体中,包括非线性的波导界面,所述波导分界面的两侧分别为结构不同的非线性光子晶体;所述非线性光子晶体的结构参数可调;通过调整所述结构参数调整所述波导分界面处的色散关系,产生拓扑带隙,从而调节所述拓扑绝缘体的工作带宽。

[0006] 优选地,所述结构参数包括单元晶胞的晶格常数a、光子晶体介质棒的半径r以及表征介质棒位置的参数 l_x 和 l_y 。

[0007] 优选地,所述非线性光子晶体的材料具备三阶非线性系数,其能利用非线性的自发四波混频FWM效应产生能量和时间纠缠双光子态,即两个泵浦光子产生纠缠的一个信号光光子和一个闲置光光子。

[0008] 优选地,所述拓扑绝缘体的工作带宽与所述自发四波混频FWM过程的相互作用频率重叠,能够实现对所述纠缠双光子态的拓扑保护传输。

[0009] 优选地,所述波导结构为非线性波导,其由室温下,即20℃至25℃的所述非线性光子晶体制备而成。

[0010] 根据本发明的第二个发明,提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法,采用上述的波导结构,包括:

[0011] 调节非线性光子晶体的结构参数,打开拓扑带隙;

[0012] 入射泵浦光 ω_p 正入射至非线性的波导界面；

[0013] 入射泵浦光 ω_p 经过非线性的自发四波混频FWM过程后，生成能量-时间纠缠双光子态的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 。

[0014] 优选地，所述非线性的自发四波混频FWM过程，满足能量匹配条件 $2\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$ 和动量守恒条件 $2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$ ，其中 ω_p 、 ω_s 和 ω_i 分别为泵浦光、信号光和闲置光的频率； $\vec{k}_p$ 、 $\vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_i$ 分别是泵浦光、信号光和闲置光的波矢量。

[0015] 优选地，所述入射泵浦光 ω_p 经过非线性的自发四波混频FWM过程后，生成能量-时间纠缠双光子态的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i ，其中：

[0016] 记泵浦光、信号光和闲置光的波矢量分别为 k_p 、 k_s 和 k_i ，则失配量 $\Delta k = 2k_p - k_s - k_i$ ；

[0017] 在拓扑绝缘体的工作带宽与所述非线性的自发四波混频FWM过程的相互作用频率重叠的带宽范围内，选择最小化所述失配量 Δk 的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 的频率，提高能量转化效率，同时实现纠缠双光子态的拓扑保护传输。

[0018] 优选地，所述泵浦光、信号光和闲置光的频率 ω_p 、 ω_s 和 ω_i ，都在拓扑绝缘体的工作带宽的范围内；在所述工作带宽内选定 ω_p 后，选择 ω_s 和 ω_i 满足所述失配量 Δk 最小。

[0019] 根据本发明的第三个方面，提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生装置，包括上述的拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构，或者，采用上述的拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法。

[0020] 与现有技术相比，本发明具有如下的有益效果：

[0021] 1、本发明实施例中的拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法，其非线性波导由两侧不同结构的光子晶体构成，通过优化设计两侧光子晶体的周期性结构可以调整波导的色散关系，在分界面处打开拓扑带隙，增大拓扑绝缘体工作带宽。

[0022] 2、本发明实施例中的拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法，利用FWM相互作用的频率与拓扑绝缘体的工作带宽之间的重叠，可以实现关联光子对的拓扑保护传输；同时在较小的相位失配量 Δk 条件下，实现更高的FWM过程效率。

[0023] 3、本发明实施例中的拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构与产生方法，可以产生拓扑保护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，提高在量子通信中的应用。

附图说明

[0024] 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：

[0025] 图1为本发明一具体实施例中光子晶体的晶格结构示意图，包括本发明一具体实施例中采用的不同的单元晶胞结构的图示，其中光子晶体 (Photonic Crystals, 简称为PC) PC1和PC2的相关结构参数如图1中所示；

[0026] 图2为本发明一具体实施例中由两种不同结构的光子晶体 (即PC1和PC2) 所构成的直波导交界面处的放大结构示意图；

[0027] 图3为本发明一具体实施例中可产生能量-时间双光子纠缠的非线性直波导三维设计示意图以及能量守恒条件和动量守恒条件；

[0028] 图4为本发明一具体实施例中产生能量-时间双光子纠缠的非线性光子晶体直波导准周期晶格结构的设计方案示意图以及电场模拟分布结果图；

[0029] 图5为本发明一具体实施例中产生能量-时间双光子纠缠的光子晶体分界面沿波导分界面直角转弯的三维示意图以及电场分布模拟结果图；

[0030] 图6为本发明一具体实施例中拓扑保护的FWM效应中生成的光子对的纠缠量子特性结果图，其中：

[0031] 图(a)为波矢失配量 Δk 仿真结果图， ν_p 、 ν_s 和 ν_i 分别表示泵浦光、信号光和闲置光的频率；

[0032] 图(b)为该具体实施例的联合谱幅度图(Joint Spectrum Amplitude, JSA)；

[0033] 图(c)为该具体实施例中沿拓扑界面传播的光子对的归一化施密特系数(Normalized Schmidt Coefficients)图；

[0034] 图(d)为该具体实施例中 Si_3N_4 拓扑光子晶体FWM过程产生的光子对的联合时间幅度图(Joint Temporal Amplitude, JTA)。

具体实施方式

[0035] 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。

[0036] 本发明提供一个实施例，一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠波导结构，包括波导分界面，该波导分界面的两侧分别为结构不同的非线性光子晶体；非线性光子晶体的结构参数可调，通过调整其结构参数调整该波导分界面处的色散关系，产生拓扑带隙，调节拓扑绝缘体的工作带宽。

[0037] 本实施例中的波导结构，能够通过调整非线性光子晶体的结构参数(单元晶胞的晶格常数 a ，光子晶体介质棒的半径 r 以及表征介质棒位置的参数 l_x ， l_y 等)，在新的拓扑光子晶体结构上，打开了拓扑带隙；从而增大拓扑绝缘体的工作带宽，提高与自发四波混频(Four Wave Mixing, FWM)过程相互作用的频率的概率。

[0038] 在本发明的一个优选实施例中，波导结构由拓扑光子晶体材料制备而成。具体的，拓扑光子晶体材料为 Si_3N_4 光子晶体。即非线性直波导由两侧不同结构的 Si_3N_4 光子晶体构成，通过优化设计两侧 Si_3N_4 光子晶体的周期性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，实现拓扑保护的信号光与闲置光光谱。

[0039] 一较佳实施例中，提供了一个具体的光子晶体的晶格结构。参见图1，是一种具有镜像对称性的二维 Si_3N_4 光子晶体(PC)。四个相同的 Si_3N_4 介电棒位于每个方形晶胞中，可以形成各向同性($l_x = l_y$)或各向异性($l_x \neq l_y$)PC。该结构配置的中心正好在晶胞的中心，也是坐标的原点。通过调整四个介质棒之间的距离(即调整结构参数)，使得两侧的单元晶胞内四个介质柱的排列结构不同，可以实现具有不同拓扑特性的光子能带结构。本实施例中的两种不同的晶胞结构如图1下方所示，PC1($l_x = l_y = a/8$)和PC2($l_x = l_y = 3a/8$)均是各向同性的。其中光子晶体晶格常数 $a = 700\text{nm}$ ， Si_3N_4 介质棒半径 $r = a/8$ ，折射率为1.97。相邻杆之间的耦合强度如图1中表示为 t_a 和 t_a 。右上角是单位晶胞的放大结构示意图。在室温下(20℃

至25℃),使用该非线性光子晶体 Si_3N_4 制备获得波导结构。

[0040] 在本发明的一个有优选实施例中,由PC1和PC2组成的波导的分界面处结构如图2所示。泵浦光正入射到直波导分界面处,由于 Si_3N_4 晶体的三阶非线性系数,在直波导结构内发生自发FWM过程,产生信号光光子和闲置光光子,该自发FWM过程如图3所示。该过程涉及能量匹配条件 $2\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$ 和动量守恒条件 $2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$ 。

[0041] 在本发明的一个有优选实施例中,通过优化设计波导分界面两侧 Si_3N_4 光子晶体的结构可以改变直波导的色散关系,打开拓扑带隙,增大拓扑绝缘体的工作带宽。当传输的频率在拓扑带隙的工作带宽内时,对急剧转弯和散射等具有鲁棒性,因此,利用自发FWM和拓扑工作带宽的重叠,选取合适的FWM相互作用频率 $\omega_p, \omega_s, \omega_i$,实现拓扑保护传输。具体的,非线性自发四波混频FWM过程的频率 ω_p, ω_s 和 ω_i 都在拓扑绝缘体的工作带宽的范围内;在工作带宽内选定 ω_p 后,选择 ω_s 和 ω_i 使得失配量 $\Delta k = 2k_p - k_s - k_i$ 最小。

[0042] 本实施例利用FWM相互作用的频率与拓扑绝缘体的工作带宽之间的重叠,可以实现关联光子对的拓扑保护传输;同时在较小的相位失配量 Δk 条件下,实现更高的FWM过程效率。

[0043] 基于相同的发明构思,本发明提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生方法,过程包括:

[0044] S100,调节非线性光子晶体的结构参数,打开拓扑带隙;

[0045] S200,入射泵浦光 ω_p 正入射至任一实施例的波导结构的非线性波导界面;

[0046] S300,入射泵浦光 ω_p 经过自发非线性自发四波混频FWM过程后,生成能量-时间纠缠双光子态的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 。

[0047] 本实施例中的方法,可以产生拓扑保护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,提高在量子通信中的应用。

[0048] 在本发明的一个优选实施例中,所述自发非线性自发四波混频FWM过程满足能量匹配条件 $2\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$ 和动量守恒条件 $2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$,其中 $\vec{k}_p, \vec{k}_s$ 和 $\vec{k}_i$ 分别是泵浦光、信号光和闲置光的波矢量; ω_p, ω_s 和 ω_i 分别为泵浦光、信号光和闲置光的频率。

[0049] 在本发明的一个优选实施例中,记泵浦光、信号光和闲置光的波矢分别为 k_p, k_s 和 k_i ,则失配量 $\Delta k = 2k_p - k_s - k_i$;在拓扑绝缘体的工作带宽与所述非线性自发四波混频FWM过程的相互作用频率重叠的带宽范围内,选择最小化所述失配量 Δk 的信号光 ω_s 和闲置光 ω_i 的频率,提高能量转化效率,同时实现纠缠光子对的拓扑保护传输。

[0050] 在本发明的一个优选实施例中,非线性自发四波混频FWM过程的频率 ω_p, ω_s 和 ω_i 都在拓扑绝缘体的工作带宽的范围内;在工作带宽内选定 ω_p 后,选择 ω_s 和 ω_i 使得失配量 Δk 最小。

[0051] 基于相同的发明构思,本发明的其他实施例中,提供一种拓扑保护的双光子能量-时间纠缠双光子态的产生装置,包括任意实施例中的波导结构,或者,采用任一实施例中的方法。

[0052] 在本发明的其他实施例中,验证鲁棒性相关的技术效果。如图4所示,为产生能量-时间双光子纠缠的非线性 Si_3N_4 光子晶体直波导准周期晶格结构的设计方案示意图以及电场模拟分布结果图。可以看到电场分布主要集中于交界面处,即存在拓扑边界态。在本实施

例中考虑PC1和PC2之间的直角弯曲界面,如图5所示,本实施例实施了场激励来模拟传输特性。仿真结果表明,电磁波平滑地流过弯曲处,没有可见的反向散射,这证明了拓扑边界状态由于拓扑保护特性而对直角弯曲具有鲁棒性。而且拓扑边缘态的电场仅限于两个不同光子晶体(PC)之间的界面。

[0053] 在本发明的其他实施例中,验证拓扑保护的FWM效应中生成的光子对的具有纠缠量子特性。如图6所示,其中图(a)为波矢失配量 Δk 仿真结果图, ν_p 、 ν_s 和 ν_i 分别表示泵浦光、信号光和闲置光的频率,为了获得较小的波矢量失配 Δk 值,在本实施例中,选择非线性过程的频率分别为 $\nu_p=185.0\text{THz}$ 、 $\nu_s=185.5\text{THz}$ 和 $\nu_i=189.0\text{THz}$ 。该FWM过程的非线性波矢量失配计算结果为 $\Delta k=4.62\times 10^{-6}$;图(b)中联合谱幅度JSA描述了拓扑光子晶体中FWM过程产生的光子对之间的光谱相关性。使用施密特分解方法来证明JSA的可分离性。归一化施密特系数 λ_n 表示获得双光子状态的概率,如图(c)所示,非零施密特系数 λ_n 的数量大于1,这是双光子纠缠的明显证据。图(d)为该具体实施例中 Si_3N_4 拓扑光子晶体FWM过程产生的光子对的联合时间幅度图(Joint Temporal Amplitude, JTA),JTA表征了拓扑光子晶体中FWM过程产生的光子对之间的时间相关性,JTA在联合时间强度方面显示出强烈的正相关性。以上图6结果证明了本发明该具体实施例中产生的双光子对的量子纠缠特性。

[0054] 以上对本发明的具体实施例进行了详细的描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述的特定实施方式,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。

[0055] 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。

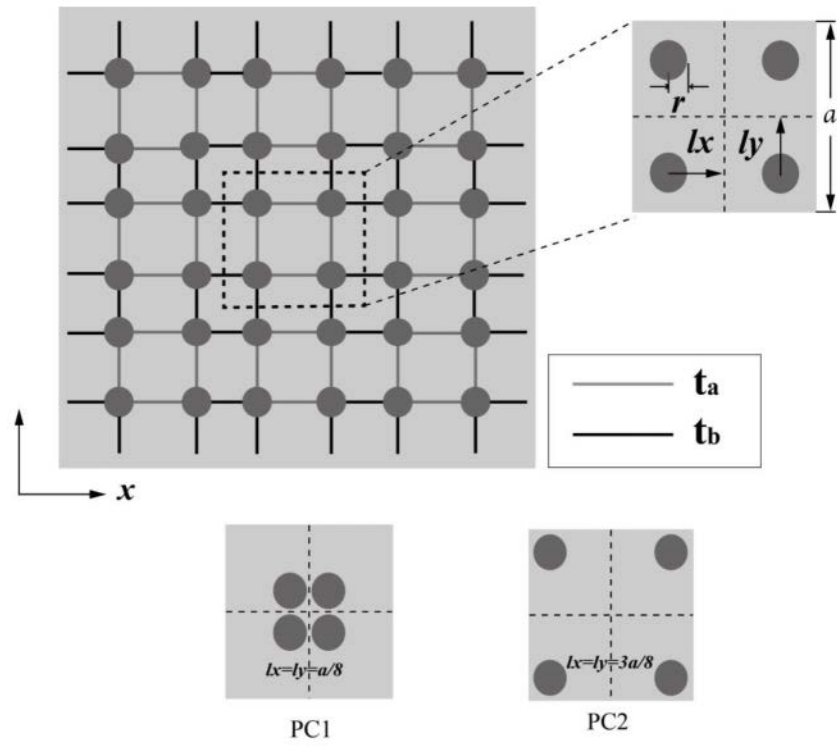


图1

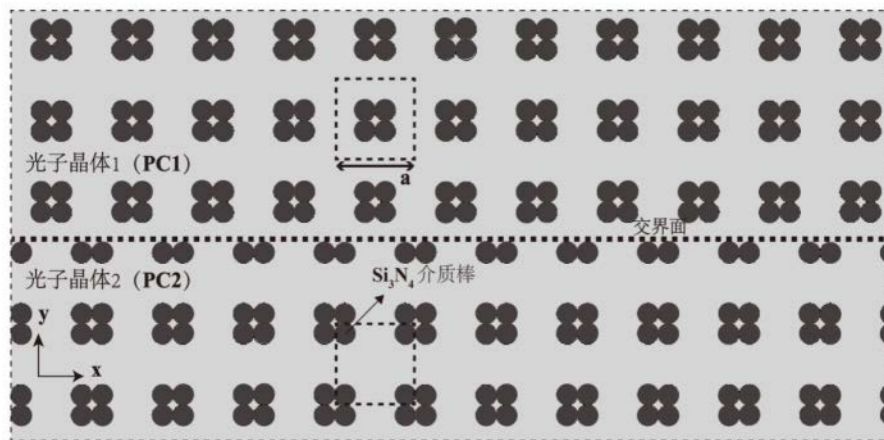


图2

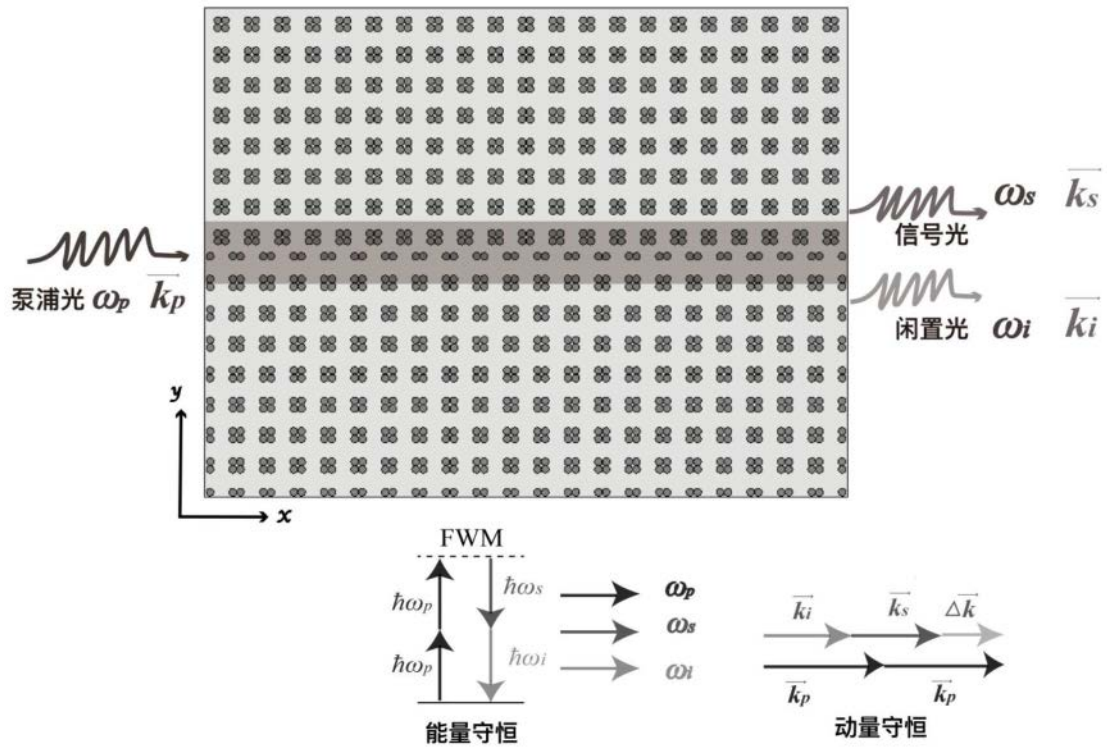


图3

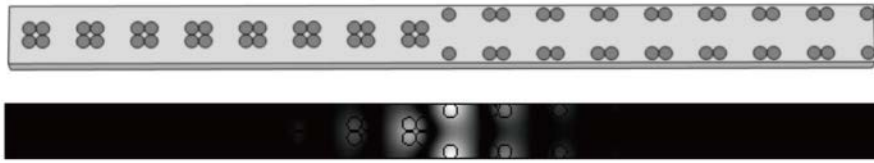


图4

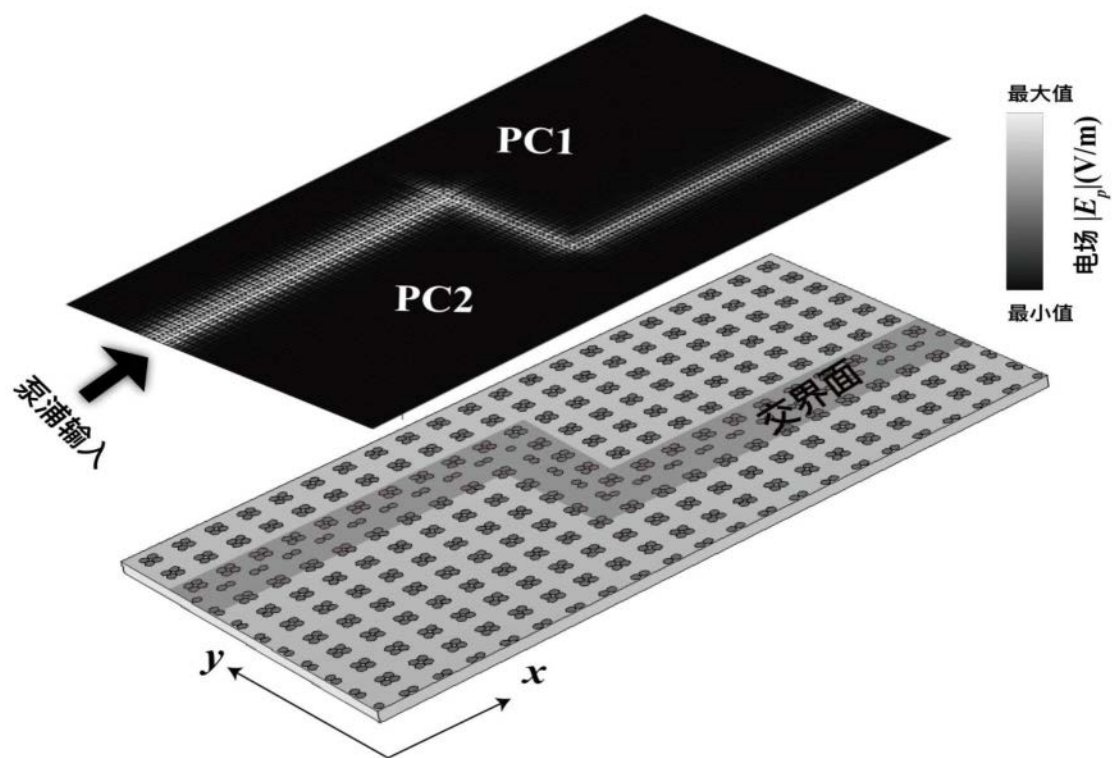


图5

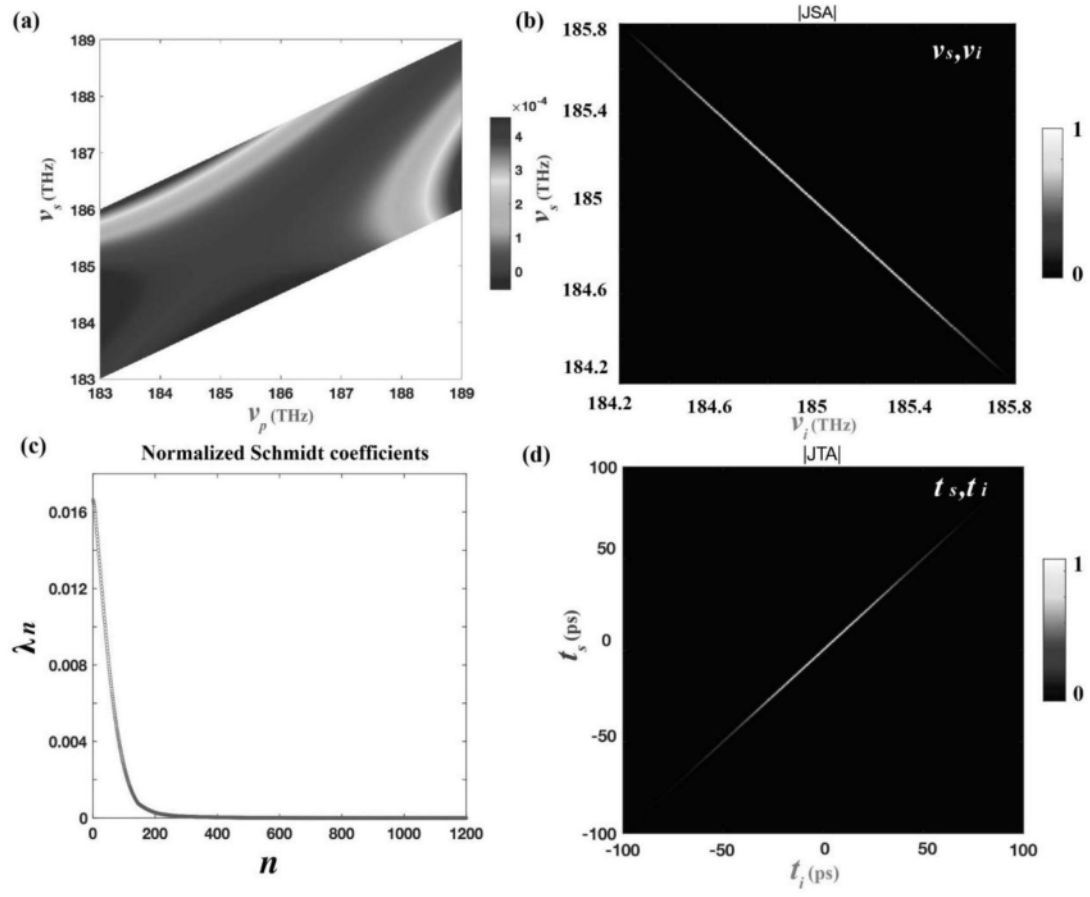


图6