

证书号第5344733号



# 发明专利证书

发明名称：多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔及制备方法

发明人：唐晓帆；息朝祥；何广强

专利号：ZL 2020 1 1574974.2

专利申请日：2020年12月28日

专利权人：上海交通大学

地址：200240 上海市闵行区东川路800号

授权公告日：2022年07月29日

授权公告号：CN 112748621 B

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，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



证书号第5344733号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年12月28日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

上海交通大学

发明人：

唐晓帆；息朝祥；何广强



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112748621 A

(43) 申请公布日 2021.05.04

(21) 申请号 202011574974.2

(22) 申请日 2020.12.28

(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 唐晓帆 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

代理人 徐红银

(51) Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

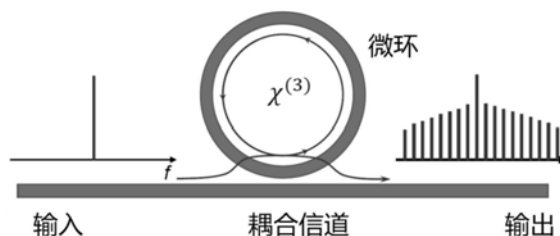
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

### (54) 发明名称

多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔及制备方法

### (57) 摘要

本发明提供了一种多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔及制备方法,所述微环谐振腔由耦合信道和微环构成,所述微环为三阶非线性效应的微环;用连续光泵浦所述微环谐振腔,泵浦光从所述耦合信道提供的输入端口进入所述耦合信道,所述耦合信道中的部分泵浦光被耦合进所述微环内,经过相互作用后生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系。本发明微环谐振腔可以由具有较高非线性系数、集成度高、性能稳定的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 材料制成。对本发明提供的多对双组份量子纠缠态制备方法进行仿真,验证本发明可以产生高质量的多对双组份量子纠缠态。



1. 一种多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,所述微环谐振腔由耦合信道和微环构成,所述微环为三阶非线性效应的微环;

用连续光泵浦所述微环谐振腔,泵浦光从所述耦合信道提供的输入端口进入所述耦合信道,所述耦合信道中的部分泵浦光被耦合进所述微环内,经过相互作用后生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系。

2. 根据权利要求1所述的多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,所述微环内存在的泵浦光以及多对信号光和闲置光会围绕所述微环做圆周运动,每绕一圈都会有部分光被耦合回所述耦合信道,从所述耦合信道提供的输出端口输出。

3. 根据权利要求1所述的多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,所述用连续光泵浦所述微环谐振腔,其中采用1550nm的连续光。

4. 根据权利要求1所述的多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,所述微环谐振腔采用氮化硅制备。

5. 根据权利要求4所述的多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,所述微环谐振腔内具有色散关系的腔结构为:氮化硅的厚度615nm,微环的半径23 $\mu$ m,该氮化硅微环是截面为矩形的圆环波导;

上述腔结构能够满足同时发生多个四波混频过程的相位匹配条件,能够同时产生具有纠缠关系的多对信号光和闲置光。

6. 根据权利要求4所述的多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,微环谐振腔的表面附有二氧化硅SiO<sub>2</sub>包层。

7. 根据权利要求6所述的多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,其特征在于,所述微环谐振腔的品质因数为10<sup>6</sup>。

8. 一种多对双组份量子纠缠态的制备方法,其特征在于,包括:

采用权利要求1-7任一项所述的微环谐振腔生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系,得到多对双组份量子纠缠态。

9. 根据权利要求8所述的多对双组份量子纠缠态的制备方法,其特征在于,采用权利要求1-7任一项所述的微环谐振腔生成多对信号光和闲置光,其中:

采用所述微环谐振腔制备出多对量子态的频谱图,给各个模式标号 $\mu = -n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 为量子态的对数,每一种模式的谐振频率 $\omega_\mu$ 用泰勒展开表示为:

$$\omega_\mu = \omega_0 + d_1\mu + \frac{1}{2}d_2\mu^2 + \frac{1}{6}d_3\mu^3, \quad \mu = -n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n$$

式中, $d_1 = 6.1562 \times 10^{12}$  rad/s,  $d_2 = 1.3604 \times 10^8$  rad/s,  $d_3 = -3.7672 \times 10^5$  rad/s;  $\omega_0$ 是泵浦光的谐振频率,  $\omega_1$ 和 $\omega_{-1}$ 表示由第一个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,  $\omega_2$ 和 $\omega_{-2}$ 表示由第二个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,以此类推,  $\omega_n$ 和 $\omega_{-n}$ 表示由第 $n$ 个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率; $\mu^2$ 、 $\mu^3$ 是泰勒展开中,标号变量 $\mu$ 的平方项和立方项。

10. 根据权利要求9所述的多对双组份量子纠缠态的制备方法,其特征在于,色散的存在导致所述微环谐振腔内的相邻谐振频率的间隔不相等,用 $D_3$ 来表示每一个SFWM过程的失谐量:

$$D_3 = -d_2 \times |\mu|^2$$

$|\mu|=1$ , 计算出第一个SFWM过程的失谐量,  $|\mu|=2$ , 计算出第二个SFWM过程的失谐量, 以此类推,  $|\mu|=n$ , 计算出第n个SFWM过程的失谐量。

## 多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔及制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及量子光学、非线性光学和微纳光学技术领域,具体的,涉及一种多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,以及采用该微环谐振腔制备多对量子纠缠态的设计方案。

### 背景技术

[0002] 量子纠缠是量子力学中最重要的特征之一,它描述了粒子之间不受距离限制的关联性,具有纠缠关系的两个或者更多粒子,无论这些粒子在空间中相距多远,如果其中一个粒子的状态发生变化,那么其他粒子的状态也会发生变化。量子纠缠对于量子信息处理中的许多应用都是必不可少的量子资源,被广泛地应用于量子精密计量、量子密钥分发、量子隐形传态、量子密集编码等方面。

[0003] 随着量子技术的发展,量子通信系统的集成度越来越高,通信系统中进行通信的用户也越来越多,对作为通信系统中信号源的量子纠缠源的要求也越来越高,需要集成化的、并且能够同时制备出多对纠缠态的量子纠缠源。一个能够制备出二维纠缠态甚至是高维纠缠态的纠缠源,在某一时刻只能产生一个纠缠态,不能同时产生多个纠缠态,无法实现多用户同时分别进行通信。但是一个能够同时产生多对量子纠缠态的纠缠源,在一个系统中可以很容易实现多个用户同时分别通信。除此之外,能够同时产生多对量子纠缠态的纠缠源还可以提高其他量子应用的性能,比如可实现更复杂的量子信息处理算法、实现更安全的量子加密协议等。

[0004] 2007年,S.E.Harris通过非线性晶体铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )制备的光子对在很宽的频带上满足时间-能量纠缠,但是这种纠缠源相对微环谐振腔,体积较大,难以集成。2017年,Michael Kues等人,通过微环谐振腔制备出了高维量子纠缠态,但是该纠缠源在同一时刻,只能产生一对纠缠态,不能同时产生多对纠缠态。2019年,V.D.Vaidya和B.Morrison等人,设计出的氮化硅微环谐振腔结构能够在很宽的频带范围内产生压缩光,但没有制备出纠缠态。

[0005] 三阶非线性光学效应是光学四波耦合过程,常见的三阶非线性光学效应包括三次谐波,四波混频,相位共轭等。有效产生纠缠的技术是在非线性材料的三阶非线性极化系数的作用下发生自发四波混频(Spontaneous Four-Wave Mixing, SFWM)过程。由于SFWM过程性能稳定并且产生的光信号强度高,所以SFWM是制备纠缠光子对的有效方法。自发四波混频是指两个泵浦光子(频率是 $\Omega_p$ )和非线性材料相互作用后,生成一个信号光子(频率是 $\Omega_s$ )和一个闲置光子(频率是 $\Omega_i$ )的非线性过程。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 材料具有较高的非线性系数,体积小,损耗低,并且与CMOS工艺相兼容等优势,这为通过氮化硅微环谐振腔来制备纠缠光子对的实现提供了可能。泵浦光以一定的概率被耦合进微环谐振腔内,经相互作用后,两个泵浦光子湮灭,产生新的信号光子和闲置光子,其中信号光子和闲置光子的能量都来自湮灭的两个泵浦光子。SFWM过程的实现要满足能量守恒条件( $2\Omega_p = \Omega_s + \Omega_i$ ),和相位匹配条件( $2k_p = k_s + k_i$ )。

[0006] 但是,现有技术设计的氮化硅微环谐振腔无法同时满足多个SFWM发生的相位匹配

条件,更未曾直接利用氮化硅微环谐振腔同时制备出多对量子纠缠态。

## 发明内容

[0007] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔及制备方法。

[0008] 本发明的第一方面,提供一种多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,所述微环谐振腔由耦合信道和微环构成,所述微环为三阶非线性效应的微环;

[0009] 用连续光泵浦所述微环谐振腔,泵浦光从所述耦合信道提供的输入端口进入所述耦合信道,所述耦合信道中的部分泵浦光被耦合进所述微环内,经过相互作用后生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系。

[0010] 可选地,所述微环内存在的泵浦光以及多对信号光和闲置光会围绕所述微环做圆周运动,每绕一圈都会有部分光被耦合回所述耦合信道,从所述耦合信道提供的输出端口输出。

[0011] 可选地,所述微环谐振腔采用氮化硅制备。

[0012] 可选地,所述微环谐振腔内具有色散关系的腔结构为:氮化硅的厚度615nm,微环的半径23 $\mu$ m,该氮化硅微环是截面为矩形的圆环波导,上述腔结构能够满足同时发生多个四波混频过程的相位匹配条件,能够同时产生具有纠缠关系的多对信号光和闲置光。进一步的,所述微环谐振腔表面附有二氧化硅SiO<sub>2</sub>包层。

[0013] 本发明的第二方面,提供一种多对双组份量子纠缠态的制备方法,包括:

[0014] 采用上述的微环谐振腔生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系,得到多对双组份量子纠缠态。

[0015] 可选地,采用所述微环谐振腔制备出多对量子态的频谱图,给各个模式标号 $\mu = -n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 为量子态的对数,大于等于3的自然数,每一种模式的谐振频率 $\omega_\mu$ 用泰勒展开表示为:

$$[0016] \quad \omega_\mu = \omega_0 + d_1\mu + \frac{1}{2}d_2\mu^2 + \frac{1}{6}d_3\mu^3, \mu = -n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, 7, n$$

[0017] 式中, $d_1 = 6.1562 \times 10^{12}$  rad/s,  $d_2 = 1.3604 \times 10^8$  rad/s,  $d_3 = -3.7672 \times 10^5$  rad/s;  $\omega_0$ 是泵浦光的谐振频率,  $\omega_1$ 和 $\omega_{-1}$ 表示由第一个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,  $\omega_2$ 和 $\omega_{-2}$ 表示由第二个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,以此类推,  $\omega_n$ 和 $\omega_{-n}$ 表示由第 $n$ 个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率; $\mu^2$ 、 $\mu^3$ ,是泰勒展开中,标号变量 $\mu$ 的平方项和立方项。

[0018] 可选地,色散的存在导致所述微环谐振腔内的相邻谐振频率的间隔不相等,用 $D_3$ 来表示每一个SFWM过程的失谐量:

$$[0019] \quad D_3 = -d_2 \times |\mu|^2$$

[0020]  $|\mu| = 1$ ,计算出第一个SFWM过程的失谐量,  $|\mu| = 2$ ,计算出第二个SFWM过程的失谐量,以此类推,  $|\mu| = n$ ,计算出第 $n$ 个SFWM过程的失谐量。

[0021] 与现有技术相比,本发明实施例具有以下至少一种有益效果:

[0022] 本发明上述的微环谐振腔,通过根据谐振腔内色散关系设计的腔结构,用连续光泵浦该微环谐振腔,腔的结构能够满足同时发生多个四波混频过程的相位匹配条件,能够

同时产生具有纠缠关系的多对信号光和闲置光,解决了现有同时制备出多对双组份量子纠缠态的氮化硅微环谐振腔设计的问题。

[0023] 对本发明提供的基于环谐振腔的多对双组份量子纠缠态制备方法进行仿真,验证本发明可以产生高质量的多对双组份量子纠缠态。

## 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为本发明一实施例中的微环谐振腔的示意图;

[0026] 图2为本发明一实施例中的氮化硅微环谐振腔截面示意图;

[0027] 图3为本发明一实施例中的微环谐振腔制备出的八对双组份量子纠缠态的频谱图;

[0028] 图4为为本发明一实施例中的微环谐振腔制备出的八对双组份量子纠缠态的纠缠度仿真结果示意图。

## 具体实施方式

[0029] 下面结合具体实施例和附图,对本发明进行详细说明。以下实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。

[0030] 图1为本发明一实施例中的微环谐振腔的示意图。参照图1所示,微环谐振腔由耦合信道和微环构成,微环为三阶非线性效应的微环;用连续光泵浦所述微环谐振腔,泵浦光从所述耦合信道提供的输入端口进入所述耦合信道,所述耦合信道中的部分泵浦光被耦合进所述微环内,经过相互作用后生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系。

[0031] 具体的,在一较优实施例中,本实施例中的微环谐振腔选用具有较高非线性系数、集成度高、性能稳定的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 材料制成。参照图1所示,微环谐振腔的最下方的是耦合信道,耦合信道上面的是具有三阶非线性效应的微环。通过色散关系设计微环的结构,在微环内发生的三阶非线性效应。如,用1550nm的连续光泵浦该微环谐振腔,泵浦光从耦合信道提供的输入端口进入耦合信道,耦合信道中的部分泵浦光被耦合进微环内,经过相互作用后生成多对信号光和闲置光,生成的多对信号光和闲置光满足纠缠关系。微环内存在的泵浦光以及多对信号光和闲置光会围绕环做圆周运动,每绕一圈都会有部分光被耦合回耦合信道,从耦合信道提供的输出端口输出。

[0032] 图2为本发明一实施例中的氮化硅微环谐振腔截面示意图。在该优选实施例中,为了使输出的多对信号光和闲置光更好地都有纠缠关系,设计的微环谐振腔的截面图如图2所示,本实施例中,具体设计参数为:氮化硅的厚度 $H=h=615\text{nm}$ ,角度 $\theta=90^\circ$ ,氮化硅窗口的宽度 $w=1755\text{nm}$ 。在微环谐振腔内只存在特定频率的波,这些波的频率与微环的长度有关,选用微环的半径为 $23\mu\text{m}$ 。微腔的品质因数是衡量腔内损耗的关键因素,品质因数越大,损耗越小。 $\text{SiO}_2$ 材料可以使微腔具有较高的品质因数,所以为了提高微腔的品质因数,减小

损耗,在微腔的表面覆了一层SiO<sub>2</sub>薄膜,微腔的品质因数为10<sup>6</sup>。角度 $\theta=90^\circ$ 是指氮化硅微环的截面是矩形结构,该氮化硅微环是截面为矩形的圆环波导。经仿真验证,本实施例参数能够达到最佳纠缠效果。当然,在其他实施例中,也可以采用其他的设计参数。

[0033] 在微环谐振腔的设计过程中,色散是无法避免的,这使得有效折射率是一个与频率有关的参数,为了更容易产生多对量子纠缠态,在本发明一优选实施例中设计了具有反常色散的微腔。如图3所示,图3是设计的微腔制备出的八对量子态的频谱图,给各个模式标号 $\mu=-8,-7,\dots,-2,-1,0,1,2,\dots,7,8$ ,每一种模式的谐振频率 $\omega_\mu$ 可用泰勒展开表示为:

[0034] 
$$\omega_\mu = \omega_0 + d_1\mu + \frac{1}{2}d_2\mu^2 + \frac{1}{6}d_3\mu^3, \mu=-8,-7,\dots,-2,-1,0,1,2,\dots,7,8$$
 式中, $d_1=6.1562 \times 10^{12}$  rad/s,  $d_2=1.3604 \times 10^8$  rad/s,  $d_3=-3.7672 \times 10^5$  rad/s;  $\omega_0$ 是泵浦光的谐振频率,  $\omega_1$ 和 $\omega_{-1}$ 表示由第一个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,  $\omega_2$ 和 $\omega_{-2}$ 表示由第二个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,  $\omega_3$ 和 $\omega_{-3}$ 表示由第三个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率,  $\dots$ ,  $\omega_8$ 和 $\omega_{-8}$ 表示由第八个SFWM过程产生的信号光和闲置光的谐振频率。

[0035] 如果没有色散,微环谐振腔内谐振频率是等间隔分布的,但是由于色散的存在,导致了微环谐振腔内的相邻谐振频率的间隔不相等,为此,本实施例中用 $D_3$ 来表示每一个SFWM过程的失谐量:

[0036]  $D_3 = -d_2 \times |\mu|^2$

[0037]  $|\mu|=1$ 可计算出第一个SFWM过程的失谐量,  $|\mu|=2$ 可计算出第二个SFWM过程的失谐量,  $\dots$ ,  $|\mu|=8$ 可计算出第八个SFWM过程的失谐量。

[0038] 所以制备八对量子态( $\omega_1$ 与 $\omega_{-1}$ 、 $\omega_2$ 与 $\omega_{-2}$ 、 $\dots$ 、 $\omega_8$ 与 $\omega_{-8}$ )的八个SFWM过程对应的失谐量为:

|        |       |       |       |       |        |     |        |        |        |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-----|--------|--------|--------|
| [0039] | SFWM  | 1     | 2     | 3     | 4      | 5   | 6      | 7      | 8      |
| [0040] | 过程    |       |       |       |        |     |        |        |        |
|        | $D_3$ | -0.68 | -2.72 | -6.12 | -10.88 | -17 | -24.48 | -33.33 | -43.53 |

[0041] 图4为本实施例对八对量子态, $\omega_1$ 与 $\omega_{-1}$ 、 $\omega_2$ 与 $\omega_{-2}$ 、 $\dots$ 、 $\omega_8$ 与 $\omega_{-8}$ ,纠缠度的仿真结果,自变量是归一化的输入泵浦光的功率,因变量为每一组信号光和闲置光的纠缠度。采用的纠缠判据为:

[0042]  $E = (\Delta x_{-}^{rot})^2 + (\Delta y_{+}^{rot})^2 - |C|$

[0043] 纠缠度小于0,代表纠缠,从图4的八个图可以看出这八对量子态都是纠缠态。

[0044] 当然,以上制备八对量子纠缠态的实施例只是本发明的一优选实施例,本发明在其他实施例中也可以是其他数量对量子纠缠态的制备。

[0045] 由上述实施例可以看出,本发明实施例能够直接同时产生多对双组份量子纠缠态的微环谐振腔,用可调谐激光器泵浦该微环谐振腔,经过相互作用后,产生多对信号光和闲置光。根据谐振腔内色散关系调整谐振腔的结构,最终能够制备出多对双组份量子纠缠态。通过仿真,验证了本发明实施例可以产生高质量的多对双组份量子纠缠态。

[0046] 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。

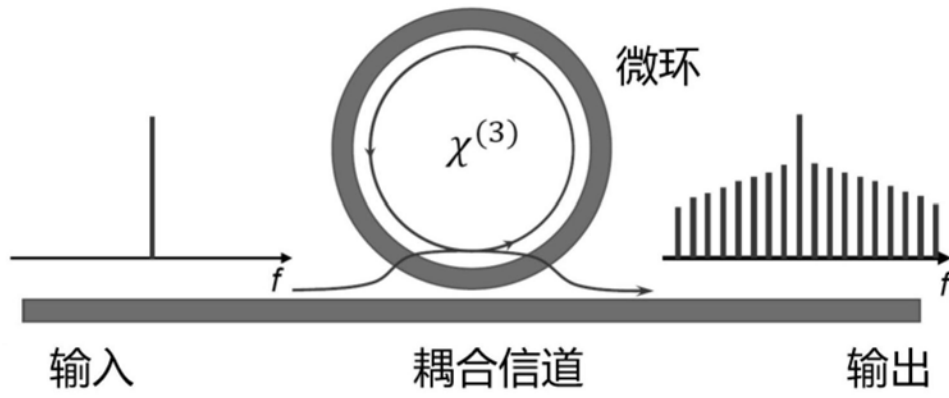


图1

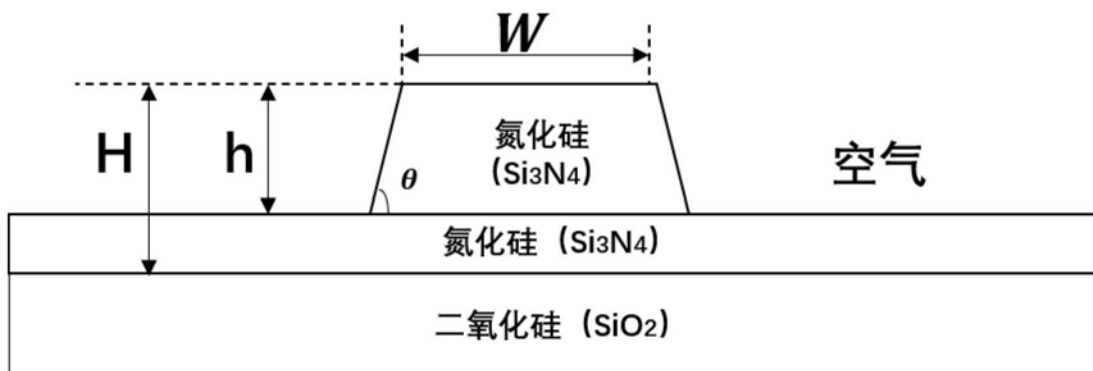


图2

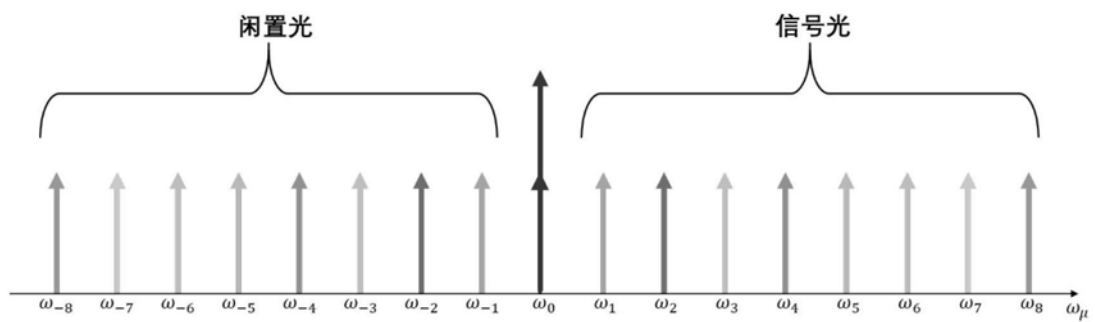


图3

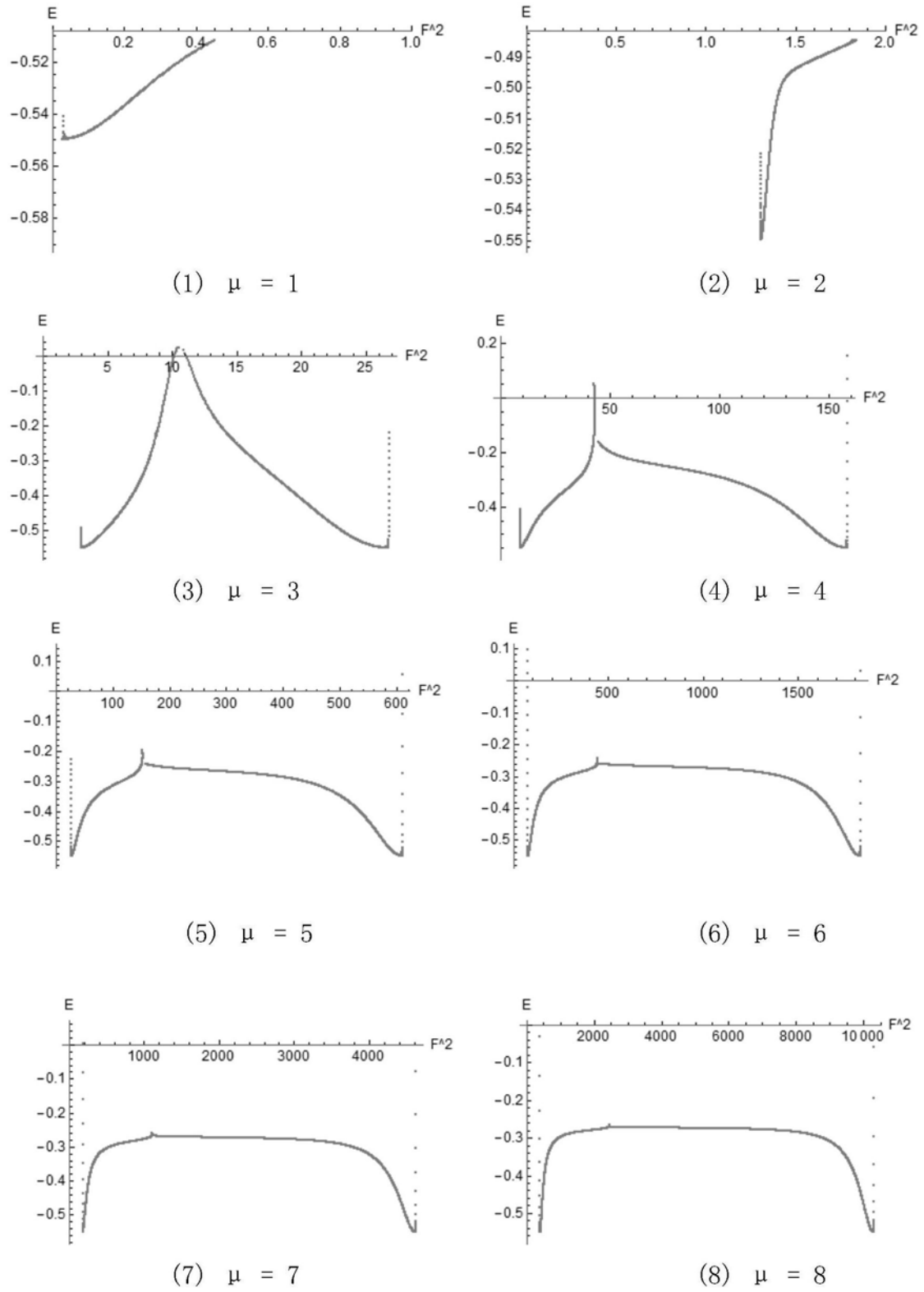


图4