双轴晶体主平面上倍频的相位匹配*

杨胜利, 陈谋智
(厦门大学物理学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 从折射率椭球方程和折射率椭球面出发, 讨论光束在双轴晶体中传播及偏振的特性、主平面倍频共线相位匹配(PM)问题, 得到了双轴晶体主平面内激光所有可能PM倍频的8种偏振组合及其相应的PM角公式、有效非线性(NL)系数d_{eff}的一般表达式。结果表明: 得到的公式简单, 可大大简化PM参数计算及优化设计; 折射率椭球面是单层曲面, 比双层的折射率面简单; 基于折射率椭球面寻找所有可能PM的类型、偏振组合的方法物理图像简明, 易于理解, 大大降低了双轴晶体PM问题分析的难度。

关键词: 双轴晶体; 倍频; 相位匹配(PM); 有效非线性(NL)系数
中图分类号: O437 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2002)06-0622-04

Phase Matching for SHG in Principal Planes of Biaxial Crystals

YANG Sheng-li, CHEN Mou-zhi
(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract Characteristics of light propagation and polarization, collinear phase matching (PM) problems and methods in the principal planes are discussed based on indicatrix equation for SHG in biaxial crystals. 8 polarization combinations for all the possible collinear PM SHG in the principal planes, the PM angle formulas and the general expressions of the effective nonlinear (NL) coefficient d_{eff} are given. The results obtained are prety simple and greate to simplify calculatation and optimum design for the PM. In contrast to a Fresnel surface with double sheets, an indicatrix one is simple. The PM methods searching for all the possible PM polarization combinations of 3WM which have clearly physical picture, are much simple and easy to be understood based on the indicatrix surface.

Key words Biaxial crystal; Frequency doubling; Phase Matching (PM); Effective Nonlinear (NL); Coefficient

1 引 言

利用非线性光学(NLO)晶体倍频或二次谐波产生(SHG), 是扩展激光频率范围的常规方法。特性优良的双轴晶体KTP、LBO等, 具有较大的非线性(NL)系数及双折射、宽广的透明光谱范围、稳定的物理化学和较高的损伤阈值, 得到越来越广泛的应用。对双轴晶体倍频或其它三波混频(3WM)相位匹配(PM)方法的分析比单轴晶体复杂的多。关于双轴晶体PM的研究, 已有许多报道。文献[1~3]给出了PM极射投影图, 文献[3, 4]和[2, 5]分别给出任意方向PM角与主折射率的关系和有效NL系数, 给出的关系复杂, 直接应用于确定主平面PM或计算PM角和有效NL系数很麻烦。对于主平面SHG PM的点有很多应用研究[6,7], 但未见系统的报道。这些文献对PM分析的方法都基于Fresnel方程和折射率面。折射率面是双层曲面, 与光波的偏振没有直接的联系, 据此难于分析明白主平面上PM-3WM的偏振组合关系。

本文基于折射率椭球方程和折射率椭球面, 讨论光波在双轴晶体主平面内传播SHG的所有可能PM方法或偏振组合, 给出相应PM角简单的公式及各可能PM的有效NL系数普遍表达式, 并归纳在一表中。折射率椭球方程比Fresnel方程、折射率椭球面比折射率面都简单得多。折射率椭球面是除球面外最简单的单层封闭曲面, 同时它与光波传播方向、偏振

* 收稿日期: 2001-08-20 修订日期: 2001-11-14

有直接简单的关系。依据折射率椭球面分析 3WM－PM 光波偏振组合及传播方向之间的关系清楚, 容易理解。对已知光波主折射率的具体双轴晶体, 可以直接从表中 PM 公式判断可能实现 PM 的 3个光波偏振的可能组合及其与传播方向之间的关系或 PM 类型, 计算 PM 角, 查出相应可 PM 的有效 NL系数的表达式, 确定最佳 PM 方向与类型。

2　晶体中光波的传播与偏振特性

为便于寻找 PM 类型, 首先从折射率椭球方程简要阐明双轴晶体中光波传播与偏振的特性。在主轴坐标系, 双轴晶体的折射率椭球方程为

$$\frac{x^2}{n_x^2}+\frac{y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_z^2}=1 \tag{1}$$

由于 $n_x \leqslant n_y \equiv n_o \leqslant n_z$, 所以过折射率椭球心、垂直于光轴的 2个平面与折射率椭球面的交线都为圆, 称折射率圆。这两个圆的交线为 y 轴, 半径为 $n_y \equiv n_o$, n_o 为 o光折射率。显然, 过原点的任一平面与折射率椭球的交线为一椭圆。沿 k 方向传播的两个不同相速度的光波, 其偏振方向互相垂直, 且分别平行于与 k 正交的折射率椭圆的长轴和短轴。这样, 折射率椭圆两个半轴的方向和大小, 决定沿该椭圆法线 k 传播的两个不同相速度光波的两正交偏振方向及折射率。

3　SHG的共线 PM

忽略泵浦抽空及高效 SHG 情况的转换效率分别为

$$Z \propto d_{\mathrm{eff}}^2 I_1 \mathrm{sinc}^2(\Delta kL/2) \text{及} Z = v^2 sn^2(KL/v, v^4)$$

式中, sn 是雅可比椭圆函数; $1/v = \Delta s/4 + [1 + (\Delta s/4)^2]$, $\Delta s = \Delta k K$, $K = \kappa|E_{10}|$, $\kappa = k_1 d_{\mathrm{eff}}/n_1 c$。要得到高效率, 要求 PM 即 $\Delta k \approx 0$。

从上述光波在双轴晶体中的传播特性, PM 条件及折射率椭球方程, 可以寻找激光在双轴晶体的 3个主轴坐标平面上传播时倍频 PM 的方法, 并导出相应 PM 角的表达式。

从共线 SHG 的 PM 条件可到相应的折射率关系为

$$\begin{aligned} &n_a(k) + n_a(k) = n_b(2k) &&\text{I 型 PM} \\ &n_a(k) + n_b(k) = 2n_b(2k) &&\text{II 型 PM} \end{aligned} \tag{2}$$

式中脚标 a、b 表示两个互相垂直偏振分量。从折射率椭球方程可得 yz、xz 和 xy 的 3个平面上的折射率椭圆方程分别为

$$\frac{y^2}{n_y^2}+\frac{z^2}{n_z^2}=1,\ \frac{x^2}{n_x^2}+\frac{z^2}{n_z^2}=1,\ \frac{x^2}{n_x^2}+\frac{y^2}{n_y^2}=1 \tag{3}$$

1) 在 yz 平面上传播的光波倍频, 可以实现I 型和II 型两类 PM。由于光波传播方向 k 位于 yz ($h = \pi/2$)平面上, 可过原点 O 作 $OP \perp k$, 交椭圆于 P, OP 的方向是沿 k 方向传播的 e光的偏振方向, $OP = n(\theta, \pi/2)$, P 点的坐标为 $y = n(\theta, \pi/2)\cos\theta$, $z = n(\theta, \pi/2)\sin\theta$, 代入 (3)式得

$$\frac{\cos^2\theta}{n_y^2}+\frac{\sin^2\theta}{n_z^2}=\frac{1}{n^2(\theta, \pi/2)} \tag{4}$$

令 e光表示光速或折射率随偏振方向 (θ, h)变化的光波, 对于偏振平行于 x 或 z 轴的光波, 虽然也属于异常光, 但都称为 x 或 z 偏振光; 而偏振平行于 y 轴的光波是 o光。

对于I 型 PM, SHG 过程中涉及的光波的偏振有两种可能组合; 第 1种是 2个基频光电矢量 $\boldsymbol{D}(k)$ 偏振平行于 x 轴, 而倍频光 $\boldsymbol{D}(2k)$偏振位于 yz 平面, 垂直于 x 轴, 是随 θ 变化的 e光, 两个基频光与一个基频光偏振为 xx→ e; 另一种I 型 PM 是 ee→ x组合, 两个基频光 $\boldsymbol{D}(k)$偏振位于 yz 平面, 是随 θ 变化的 e光, 而倍频光平行于 x 轴, 虽然也属于 e光, 但不随 θ 变化。

第 1种情况, xx→ e, 倍频光折射率 $n(2k, \theta, \pi/2) \equiv n_2(\theta, \pi/2)$与 θ 有关。PM 的折射率关系为

$$n_2(\theta, \pi/2) = n_{1x} \tag{5}$$

这里 $n_{1x} \equiv n_x(k)$是基频光的主折射率。显然 (5)式不满足, 故不可能实现 PM。

第 2种情况 ee→ x, 两个基频光的折射率都随 θ 变化, 而倍频光偏振平行于 x 轴, 其折射率等于 x 轴的主折射率, 但不随 θ 角变化。这时,

$$n_1(\theta, \pi/2) = n_{2x} \tag{6}$$

式中, $n_1(\theta, \pi/2) \equiv n(\omega, \theta, \pi/2)$; $n_{2x} \equiv n_x(2k)$。对基频光, 有

$$\frac{\cos^2\theta}{n_{1y}^2}+\frac{\sin^2\theta}{n_{1z}^2}=\frac{1}{n_1^2(\theta, \pi/2)} \tag{7}$$

PM 角为

$$\theta_m = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1y}^{-2}-n_{2x}^{-2}}{n_{1y}^{-2}-n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2} \quad (n_{1z} \geqslant n_{2x} \geqslant n_{1y} \neq n_{1z}) \tag{8}$$

$n_{1z} = n_{2x}$时, $\theta = 90°$, 属于非临界 PM。从 Fresnel方程也可以求得 (7)式。

II 型 PM, 基频光一个偏振 $\boldsymbol{D}_x(k) /\!/ x$ 轴, 另一个 $\boldsymbol{D}_e(k, \theta) \perp x$ 轴 (即在 yz 面上)。产生的倍频光偏振方向有 2种可能: $\boldsymbol{D}_x(2k) /\!/ x$ 轴, ex→x; $\boldsymbol{D}_e(2k, \theta) \perp x$ 轴, xe→e。但实际仅第 1种 $\boldsymbol{D}_e(2k, \theta) /\!/ x$ 轴的可以实现 PM。这一情况下, PM 的折射率关系为

$$n_{2x} = [n_{1x} + n_1(\theta, \pi/2)]/2$$

则

$$n_1(\theta, \pi/2) = 2n_{2x} - n_{1x} = W \tag{9}$$

于是, PM 角 θ_m 为

$$\theta_m = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1y}^{-2} - W^2}{n_{1y}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2} \quad (n_{1y} \leqslant 2n_{2x} + n_{1x} \leqslant n_{1z}) \tag{10}$$

$\boldsymbol{D}_e(2k, \theta) \perp x$ 轴的情况, xe→e, 要求 PM 的折射率关系为

$$n_2(\theta, \pi/2) = [n_{1x} + n_1(\theta, \pi/2)]/2 \tag{11}$$

由于 $n_2(\theta, \pi/2) > n_1(\theta, \pi/2) > n_{1x}$, (11)式不可能满足, 因此 $\perp x$ 轴的倍频光分量 $\boldsymbol{D}_e(2k, \theta)$不可能产生。

2) 在 xz 平面, $\varphi = 0$, 有Ⅰ、Ⅱ型两类可能 PM。从 xz 平面的折射率椭圆方程得

$$\frac{\cos^2\theta}{n_x^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_z^2} = \frac{1}{n^2(\theta, 0)} \tag{12}$$

$/\!/ y$ 偏振的光波为 O 光, 因此 PM 可能的偏振组合, Ⅰ 型, yy→e和 ee→y; Ⅱ 型, ye→y和 ye→e。类似上述的分析, 容易得到这几种偏振组合的 PM 角分别为

$$\text{yy→e} \quad \theta_m = \sin^{-1}\left[\frac{n_{2x}^{-2} - n_{1y}^{-2}}{n_{2x}^{-2} - n_{2z}^{-2}}\right]^{1/2} \quad (n_{2z} \geqslant n_{1y} \geqslant n_{2x}) \tag{13}$$

$$\text{ee→y} \quad \theta_m = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1x}^{-2} - n_{2y}^{-2}}{n_{1x}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2} \quad (n_{1z} \geqslant n_{2y} \geqslant n_{1x}) \tag{14}$$

$$\text{ye→y} \quad \theta_m = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1x}^{-2} - W^2}{n_{1x}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2} \quad (W = 2n_{2y} - n_{1y},\ 2n_{2y} \geqslant n_{1y} + n_{1z}) \tag{15}$$

对 ye→e, 从(12)式得到对应于基频光和倍频光的两个方程代入 $2n_2(\theta, 0) = n_{10} + n_1(\theta, 0)$得

$$2[n_{2x}^{-2} - (n_{2x}^{-2} - n_{2z}^{-2})\sin^2\theta]^{-1/2} = n_{1y} + [n_{1x}^{-2} - (n_{1x}^{-2} - n_{1z}^{-2})\sin^2\theta]^{-1/2} \tag{16}$$

化成 $\sin^2\theta$的 4次方程为

$$AS^4 - 2BS^3 + CS^2 - 2DS + E = 0 \quad S \equiv \sin^2\theta$$

显式解很繁。但把主折射率值代入(16)式, 可用试解的方法, 求 θ 值。

3) 在 xy 平面上, $\theta = \pi/2$。这种情况下, 折射率椭圆方程为

$$\frac{\sin^2\varphi}{n_x^2} + \frac{\cos^2\varphi}{n_y^2} = \frac{1}{n_e^2(\pi/2, \varphi)} \tag{17}$$

Ⅰ 型, Ⅱ型 PM 各有 2种可能组合: Ⅰ 型 zz→e和 ee→z, Ⅱ型 ze→z和 ze→e。但 ee→z, ze→z配置, 都不可能 PM。另外 2种组合满足下面条件时, 可实现 PM。这情况的 PM 角为

$$\text{zz→e} \quad \varphi_m = \sin^{-1}\left[\frac{n_{2y}^{-2} - n_{1z}^{-2}}{n_{2x}^{-2} - n_{2y}^{-2}}\right]^{1/2} \quad (n_{1z} \geqslant n_{2y} \geqslant n_{2x}) \tag{18}$$

而偏振为 ze→e组合的 PM, 折射率关系为 $2n_2(\pi/2, \varphi) = n_{1z} + n_1(\pi/2, \varphi)$, 仍可得到类似于(16)式的关系。上述结果归纳在表 1中。

表 1　双轴晶 SHG相位匹配角及有效 NL系数

Tab 1　PM angles for SHG and effective NL coefficients for 3WM in biaxial crystals

k-D	Type & PD	PM angle for SHG	Effective NL coefficients d_{eff}
In yz plane $\varphi = \pi/2$	Ⅰ: ee→x xx→e	$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1y}^{-2} - n_{2x}^{-2}}{n_{1y}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2}$, $n_{1z} \geqslant n_{2x} \geqslant n_{1y}$ Impossible PM	$d_{12}\cos^2\theta + d_{13}\sin^2\theta - d_{14}\sin 2\theta$ ——
	Ⅱ: xe→x xe→e	$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1y}^{-2} - (2n_{2x} - n_{1x})^{-2}}{n_{1y}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2}$, $n_{1z} \geqslant 2n_{2x} - n_{1x} \geqslant n_{1y}$ Impossible PM	$d_{15}\sin\theta - d_{16}\cos\theta$ ——
In xz plane $\varphi = 0$	Ⅰ: yy→e ee→y	$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{n_{2x}^{-2} - n_{1y}^{-2}}{n_{2x}^{-2} - n_{2z}^{-2}}\right]^{1/2}$, $n_{1y} \geqslant n_{2x}$ $\theta = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1x}^{-2} - n_{2y}^{-2}}{n_{1x}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2}$, $n_{1z} \geqslant n_{2y}$	$-d_{12}\cos\theta + d_{32}\sin\theta$ $d_{21}\cos^2\theta + d_{23}\sin^2\theta - d_{25}\sin 2\theta$
	Ⅱ: ye→y ye→e	$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1x}^{-2} - (2n_{2y} - n_{1y})^{-2}}{n_{1x}^{-2} - n_{1z}^{-2}}\right]^{1/2}$, $n_{1z} \geqslant 2n_{2y} - n_{1y}$ $2[n_{2x}^{-2} - (n_{2x}^{-2} - n_{2z}^{-2})\sin^2\theta]^{-1/2}$ $= n_{1y} + [n_{1x}^{-2} - (n_{1x}^{-2} - n_{1z}^{-2})\sin^2\theta]^{-1/2}$	$d_{24}\sin\theta - d_{26}\cos\theta$ $-0.5(d_{14} + d_{36})\sin 2\theta + d_{16}\cos^2\theta + d_{34}\sin^2\theta$
In xy plane $\theta = \pi/2$	Ⅰ: zz→e ee→z	$\varphi = \sin^{-1}\left[\frac{n_{1z}^{-2} - n_{2y}^{-2}}{n_{2x}^{-2} - n_{2y}^{-2}}\right]^{1/2}$, $n_{2y} \geqslant n_{1z} \geqslant n_{2x}$ Impossible PM	$-d_{13}\sin\varphi + d_{23}\cos\varphi$
	Ⅱ: ze→z ze→e	Impossible PM. $2[n_{2y}^{-2} + (n_{2x}^{-2} - n_{2y}^{-2})\sin^2\varphi]^{-1/2}$ $= n_{1z} + [n_{1y}^{-2} + (n_{1x}^{-2} - n_{1y}^{-2})\sin^2\varphi]^{-1/2}$	$-0.5(d_{14} + d_{25})\sin 2\varphi + d_{15}\sin^2\varphi + d_{24}\cos^2\varphi$

* k-D: Wave vector k direction; Type & P. D.: PM type & polarisation direction

对于具体晶体, 只要已知基频和倍频光的主折射率从 PM 角公式就可判断每一种偏振组合的 PM 能否实现。对可 PM 的, 可以求出 PM 角, 由表中查出有效 NL系数的普遍表达式, 式中 NL系数矩阵元是光学主轴坐标系中的元素。例如, KTP与 LBO同属于 mm2点群双轴晶体, 在压电主轴坐标系上具有相同的非 0矩阵元: d^e_{15}, d^e_{25}, d^e_{31}, d^e_{32}, d^e_{33}; 但 KTP晶体属于标准取向, 光学主轴与压电主轴取向相同, 在两个坐标系上 d 矩阵全等, 在光学主轴坐标系的非 0元; d_{15}, d_{25}, d_{31}, d_{32}, d_{33}。LBO属非标准取向, 两坐标系坐标轴取向不同, 在光学主轴坐标系上非 0元为: d_{16}, d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{34}, 2个坐标系上元素关系为 $d^e_{15}= d_{34}$, $d^e_{24}= d_{16}$, $d^e_{31}= d_{21}$, $d^e_{32}= d_{23}$, $d^e_{33}= d_{22}$。

4 有效 NL系数

根据各种 PM 偏振方向, 可以导出相应的二阶有效 NL系数的表达式, 如表 1所示。

1) k 在 yz 平面内 PM 时, $\phi=\pi/2$, x 轴和 e光的单位矢量分别为

$$\boldsymbol{x}=(1,0,0),\ \boldsymbol{e}=(0,-\cos\theta,\sin\theta) \tag{19}$$

而

$$(\boldsymbol{ex})^*=(0,0,0,0,\sin\theta,-\cos\theta)$$
$$(\boldsymbol{ee})^*=(0,\cos^2\theta,\sin^2\theta,-\sin2\theta,0,0) \tag{20}$$

Ⅰ 型, xx→ e, 不可能 PM, 对于 ee→ x, 二阶有效 NL系数 d_{eff}为

$$d_{eff}=(1,0,0)\cdot \boldsymbol{d}:\boldsymbol{ee}= d_{12}\cos^2\theta+d_{13}\sin^2\theta-d_{14}\sin2\theta \tag{21}$$

式中 $\boldsymbol{d}$ 为光学主轴坐标系中的二阶 NL系数张量, 有 3×6=18个元素。对标准取向的晶体, $\boldsymbol{d}$ 也可以是压电主轴坐标系中的矩阵。

Ⅱ 型, ex→ e, 不可能 PM。对于 ex→ x, d_{eff}为

$$d_{eff}=\boldsymbol{x}\cdot\boldsymbol{d}:\boldsymbol{ex}=d_{15}\sin\theta+d_{16}\cos\theta \tag{22}$$

2) k在平面内的 PM。$\phi=0$, y 轴和 e光的单位矢量分别为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{o}=(0,1,0),\ \boldsymbol{e}=(-\cos\theta,0,\sin\theta) \tag{23}$$

$$(\boldsymbol{oo})^*=(0,1,0,0,0,0),\ (\boldsymbol{oe})^*=(0,0,0,\sin\theta,0,-\cos\theta),\ (\boldsymbol{ee})^*=(\cos^2\theta,0,\sin^2\theta,0,-\sin2\theta,0) \tag{24}$$

上面定义 0≤ φ≤π。如果定义 0≤ φ≤ 2π, 则上式的±号可以去掉, 或改为+ 号。

Ⅰ 型

$$oo\to e\quad d_{eff}=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{d}:\boldsymbol{oo}=-d_{12}\cos\theta+d_{32}\sin\theta \tag{25}$$

$$ee\to e\quad d_{eff}=\boldsymbol{o}\cdot\boldsymbol{d}:\boldsymbol{ee}=d_{21}\cos^2\theta+d_{23}\sin^2\theta-d_{25}\sin2\theta \tag{26}$$

Ⅱ 型

$$oe\to o\quad d_{eff}=\boldsymbol{o}\cdot\boldsymbol{d}:\boldsymbol{oe}=d_{24}\sin\theta-d_{26}\cos\theta \tag{27}$$

$$oe\to e\quad d_{eff}=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{d}:\boldsymbol{oe}=-0.5(d_{14}+d_{36})\sin2\theta+d_{16}\cos^2\theta+d_{34}\sin^2\theta \tag{28}$$

3) k 在 xy 平面内的 PM。$\theta=\pi/2$, z 轴和 e光波矢的单位矢量分别为

$$\boldsymbol{z}=(0,0,1)\quad \boldsymbol{e}=-(\sin\phi,\cos\phi,0) \tag{29}$$

$$(\boldsymbol{zz})^*=(0,0,1,0,0,0),\ (\boldsymbol{ez})^*=(0,0,0,\cos\phi,-\sin\phi,0) \tag{30}$$

Ⅰ 型 ee→ z和Ⅱ 型 ez→ z组合, 都不可能 PM; 仅Ⅰ 型 zz→ e和Ⅱ 型 ez→ e组合可能 PM。

Ⅰ 型

$$zz\to e\quad d_{eff}=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{d};\boldsymbol{zz}=-d_{13}\sin\phi+d_{23}\cos\phi \tag{31}$$

Ⅱ 型

$$ez\to e\quad d_{eff}=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{d}$$
$$\boldsymbol{ez}=-0.5(d_{14}+d_{25})\sin2\phi+d_{15}\sin^2\phi+d_{24}\cos^2\phi \tag{32}$$

5 结　论

从折射率椭球方程和折射率椭球面出发, 分析双轴晶体中光波在主平面内 SHG, 共有 8种可能 PM 的偏振组合, 给出所有可能 PM 的 PM 角公式及有效 NL系数的一般关系。PM 角公式除了 2种Ⅱ 型 PM 的之外, 公式简单易于直接引用。得到的结果大大简化主平面上 PM -SHG 及 3WM 的优化设计与计算。利用折射率椭球方程和折射率椭球面是理解双轴晶体 PM 问题的一条捷径。如果利用文献 [3, 4]得到的 PM 角的复杂方程来计算主平面 PM 角显然很麻烦。yz 平面上 3个波可能 PM 的偏振组合有 4种, 这从文献 [3, 4]就难于直接看出。关于利用折射率椭球方程和折射率椭球面分析光波沿任意方向 SHG的 PM 问题, 已在文献 [8]中讨论。文献 [8]中, 令$\theta=\pi/2$, $\phi=0$, $\pi/2$, 分别得到 3个主平面上传播时 SHG的结果, 与上面一致。

参　考　文　献:

[1] M V Hobden. Phase-matched SHG in biaxial crystals [J]. J. Appl. Phys., 1967, **38**(11): 4365-4372

[2] H Ito, H Natito, H Inaba. Generalized study on angular dependence of induced second order NLO polarizations and PM in biaxial crystals [J]. J. Appl. Phys., 1975, **46**(9): 3992-3998

[3] J Q Yao, T S Fahlen. Caculation of optimum PM parameters for biaxial crystals KTiOPO$_4$ [J]. J. Appl. Phys., 1984, **55**(1): 65-68

(下转第 631页)

互作用时的熵特性和薛定谔猫态 [J]. 物理学报, 2000, 49(9): 1707-1713

[12] ZHANG Deng-yu. The Two-level Atom's Dynamics in Degenerate Multi-Photon Processes [J]. *J. of Optoelectronics · Laser* (光电子 · 激光), 2001, **12**(5): 533-535. (in Chinese)

[13] TIAN Yong-hong, PENG Jin-sheng, XU Da-hai. Squeezing of Measured Phase Operators in Kerr Even and Odd Coherent States [J]. *J. of Optoelectronics · Lasers* (光电子 · 激光), 2001, **12**(6): 635-640. (in Chinese)

作者简介:
万 琳 (1972-), 1994年毕业江西师范大学物理系, 1999年考入江西师范大学物理与通信电子学院攻读硕士学位, 现在主要从事量子光学方向的研究, 已发表论文数篇.

(上接第 625页)

[4] R A Morgan. PM consideration for generalized three wave mixing in NL anisotropic crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(9): 1259-1264

[5] J Q Yao, *et al.* Accurate calculation of optimum PM parameters in 3-wave interactions with biaxial NLO crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1992, **B9**(6): 891-902

[6] WU Feng-tie, ZHANG Wen-zhen. Internal SHG of Mode-locked Nd: YAG Laser with Convex-ARR Unstable Resonator in LBO and BBO Crystals [J]. *J. of Optoelectronics · Laser* (光电子 · 激光), 1999, **10**(3): 207-210. (in Chinese)

[7] Xie B Wu, G You, C Chen. Characterization of LiB_3O_5 crystal for SHG [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16): 1237-1238

[8] YANG Sheng-li, CHEN Mou-zhi. Collinear phase matching of SHG in arbitrary directions of biaxial crystals [J]. *Chinese J. Laser*, 2002, **B11**(1): 23-26. (to-be published).

作者简介:
杨胜利 男, 副教授, 现从事激光、光电子学教学与研究, 主要研究方向为 NLO、激光光谱、光电探测与激光技术等.