

光参量放大相位匹配角度的计算

郭晓杨^{1,2} 冷雨欣¹ 许毅¹ 陆效明¹ 王乘¹ 李儒新¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 给出了单轴晶体 ooe, oeo, eoo, eeo, eoe, oee 6种相位匹配方式相位匹配角的解析公式。其中 ooe, oeo, eoo 3种可以计算共线及非共线情况, eeo, eoe, oee 3种只能计算共线情况, 非共线情况需数值求解, 给出了数值求解的方法步骤。研究了双轴晶体折射率在主平面时与单轴晶体折射率的对应关系, 利用该对应关系, 通过替换折射率的方式求解双轴晶体的相位匹配角度。给出了常见晶体的非共线相位匹配角度图, 以供科研人员参考。

关键词 激光光学; 超短超强激光; 光参量放大; 相位匹配

中图分类号 O437.4; TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802006

Calculation of Phase Matching Angle of Optical Parametric Amplification

Guo Xiaoyang^{1,2} Leng Yuxin¹ Xu Yi¹ Lu Xiaoming¹ Wang Cheng¹ Li Ruxin¹

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract ooe, oeo, eoo, eeo, eoe and oee types phase matching angle calculation formulas in uniaxial crystals are provided. The formulas used for ooe, oeo and eoo types can be applied to both collinear and non-collinear configurations. The formulas used for eeo, eoe, and oee only can be applied to collinear configuration. The numerical methods are provided for non-collinear configuration for eeo, eoe and oee types. The relationship of refractive index between uniaxial crystal and biaxial crystal in principal plane is given. Using this relationship, one can use the method for uniaxial crystal to calculate the phase matching angle in biaxial crystals through replacing the refractive index. The phase matching angles in some common nonlinear crystals are calculated for researchers' reference.

Key words laser optics; ultrashort ultraintense laser; optical parametric amplification; phase matching

OCIS codes 140.3460; 140.7090; 190.4970

1 引言

光参量放大^[1]在超短超强激光技术领域有着重要应用。一方面, 目前的激光材料获得的激光波长难以覆盖人们所感兴趣的所有区域, 对于无法覆盖的区域, 光参量放大是很好的频率转换方式^[2]; 另一方面, 人们希望获得高功率超短超强激光脉冲, 目前常用的啁啾脉冲放大技术存在晶体口径不足、光栅损伤阈值低等技术瓶颈, 光参量啁啾脉冲放大极具潜力突破这些瓶颈^[3-5]。因此近年来人们对光参量放大进行了大量研究。

相位匹配是光参量放大中重要的概念。相位匹配决定着增益带宽, 影响着转换效率、光束质量等。目前比较常用的相位匹配方法有双折射相位匹配、准相位匹配、温度相位匹配等。双折射相位匹配应用最为

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205208)

作者简介: 郭晓杨(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事非线性激光放大方面的研究。E-mail: guoxiaoyang@siom.ac.cn

导师简介: 李儒新(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事强场激光物理科学与技术等方面的研究。

E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

*通信联系人。E-mail: lengyuxin@siom.ac.cn

广泛,因此本文针对双折射相位匹配展开讨论。双折射相位匹配又可根据不同的标准划分为多种方式。按照光波的偏振态可以划分为I类匹配和II类匹配^[6],如果两束低频光的偏振态相同,则为I类匹配,如果两束低频光的偏振态正交,则为II类匹配。按照三束光波之间的方向,可以分为共线相位匹配和非共线相位匹配。描述非共线相位匹配的参数一般为信号光与抽运光波矢的夹角。非共线相位匹配又可分为两种,一种为信号光波矢在光轴和抽运光之间,在这里称之为近轴方式;另一种信号光波矢远离光轴与抽运光波矢,在这里称之为离轴方式。

文献[7-12]讨论了相位匹配角度的计算方法,文献[12]总结了不同相位匹配方式下的计算公式,但是这些公式在计算非共线相位匹配时,非共线夹角指信号光与闲置光的夹角,这种计算方式有一定的局限性。在一些情况下,抽运光和信号光以平面波入射至晶体,当两者之间有夹角时,由于信号光的宽带特性,产生的闲置光是发散的,即信号光与抽运光的夹角是固定的,而信号光与闲置光的夹角是变化的。因此文献[12]总结的非共线情况下的相位匹配角计算公式不适合信号光是宽带的情况。而且,该文献对双轴晶体的相位匹配重新表述了一套公式,使得计算相位匹配的公式繁多,不利工程设计。国外著名软件SNLO也提供了常用晶体相位匹配角度的计算,然而在计算非共线相位匹配时,该软件忽略了离轴非共线相位匹配的情况,因此是不完善的。为了更好地设计光参量放大系统,全面有效地计算不同类型的相位匹配是非常有必要的。本文给出了单轴晶体 ooe, oeo, eeo 等 6 种相位匹配方式相位匹配角的计算公式,并列成表已供查询。研究了双轴晶体折射率在主平面时与单轴晶体折射率的对应关系,利用该对应关系,可以通过替换折射率的方式求解双轴晶体的相位匹配角度。这样,可以在统一架构下对单轴晶体及双轴晶体主平面上进行相位匹配的计算。大大简化了研究相位匹配时的工作量,方便工程设计。

2 相位匹配的基本概念

光参量放大是典型的三波相互作用,该过程需要满足能量守恒和动量守恒,如下式所示:

$$\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = \hbar\omega_3, \quad (1)$$

$$\hbar k_1 + \hbar k_2 = \hbar k_3, \quad (2)$$

式中 \hbar 是普朗克常量, ω 是角频率, k 是波矢 \mathbf{k} 的大小, 在这里假设

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3, \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3, \quad (3)$$

其中, λ 是波长, k 的表达式为

$$k = n(\omega) \frac{\omega}{c} = n(\lambda) \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (4)$$

其中, n 是折射率, c 是光在真空中的光速。相位匹配就是使得(2)式成立。Midwinter 和 Warner 根据光波的偏振态把相位匹配分为 I 类和 II 类^[6]。对于单轴晶体, 相位匹配的类型如表 1 所示。

表 1 单轴晶体的相位匹配类型

Table 1 Phase-matching types for uniaxial crystals

	Positive uniaxial	Negative uniaxial
Type I	eeo	ooe
Type II	oeo	oee
	eoo	eeo

根据光波的偏振态, 可以把相位匹配分为 I 类和 II 类。根据光波的方向, 可以把相位匹配分为共线与非共线两种结构, 图 1(a) 为共线结构。图 1(b) 和图 1(c) 是非共线相位匹配结构, 图 1(b) 所示为近轴结构, 图 1(c) 所示为离轴结构。在计算相位匹配时, 可以把匹配方式分为双 o 类型和双 e 类型, 双 o 类型就是三波中有两束光波为 o 光, 双 e 类型是三波里面有两束光波为 e 光。如果是共线相位匹配, 则意味着三波与光轴的夹角一致, 该夹角即为相位匹配角。如果是非共线相位匹配, 则三波与光轴的夹角不一致。在这里假定如果是双 o 类型, 相位匹配角指的是 e 光与光轴的夹角, 如果是双 e 类型, 相位匹配角指的是 o 光与光轴的夹角。

下面针对不同晶体不同的相位匹配方式, 介绍如何计算相位匹配角。

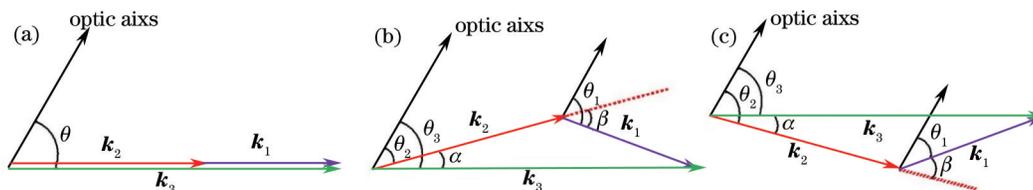


图 1 相位匹配结构。(a) 共线结构; (b) 非共线结构, 近轴方式; (c) 非共线结构, 离轴方式

Fig.1 Phase-matching geometries. (a) Collinear configuration; (b) non-collinear configuration, near-axis style; (c) non-collinear configuration, deviating-axis style

3 单轴晶体相位匹配

3.1 共线相位匹配

3.1.1 双 o 类型

双 o 类型相位匹配有严格解析解, 以负单轴晶体 ooe 为例进行说明, 根据晶体光学的知识, 可以写出晶体中 e 光的折射率为^[11]

$$n(\theta) = n_o \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{n_o}{n_e}\right)^2 \tan^2 \theta}}, \quad (5)$$

式中 n_o 是 o 光折射率, n_e 是 e 光折射率, θ 是 e 光与光轴的夹角。

$$n_1 = n_{o1}, n_2 = n_{o2}, n_3 = n_{o3} \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{n_{o3}}{n_{e3}}\right)^2 \tan^2 \theta}}. \quad (6)$$

根据(2)式, 可以得到

$$\frac{n_1}{\lambda_1} + \frac{n_2}{\lambda_2} = \frac{n_3}{\lambda_3}. \quad (7)$$

令

$$A = \frac{n_{o1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{o2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{o3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{e1}}{\lambda_1}, E = \frac{n_{e2}}{\lambda_2}, F = \frac{n_{e3}}{\lambda_3}, \quad (8)$$

可得

$$A + B = C \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{E}{F}\right)^2 \tan^2 \theta}}. \quad (9)$$

求解(9)式, 取有意义的值, 得

$$\tan^2 \theta = W \left(\frac{1 - U}{V - 1} \right), \quad (10)$$

式中

$$U = \left(\frac{A + B}{C} \right)^2, V = \left(\frac{A + B}{F} \right)^2, W = 1. \quad (11)$$

ooo, oeo 的计算过程与此类似, 不再赘述。

3.1.2 双 e 类型

双 e 类型共线结构, 无严格解析解, 需要一定程度的近似才能得到解析解。以负单轴晶体 oee 相位匹配为例, 由晶体的折射率方程可以得到

$$n_1 = n_{e1}, n_2 = n_{e2} \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{n_{o2}}{n_{e2}}\right)^2 \tan^2 \theta}}, n_3 = n_{o3} \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{n_{o3}}{n_{e3}}\right)^2 \tan^2 \theta}}. \quad (12)$$

根据相位匹配条件可得

$$A + B \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{B}{E}\right)^2 \tan^2 \theta}} = C \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{C}{F}\right)^2 \tan^2 \theta}} \quad (13)$$

因为对于大多数单轴非线性晶体而言,其折射率椭圆的离心率比较小,因此可以将(13)式近似为^[11]

$$(A + B) \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{A+B}{A+E}\right)^2 \tan^2 \theta}} = C \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{C}{F}\right)^2 \tan^2 \theta}}, \quad (14)$$

求解该方程,取有意义的值,得到的相位匹配角表达式与(10)式相同,表达式中的参数变为

$$U = \left(\frac{C}{A+B}\right)^2, V = \left(\frac{F}{A+E}\right)^2, W = \left(\frac{F}{C}\right)^2. \quad (15)$$

近似解的计算精度是人们关心的问题,下面以偏硼酸钡(BBO)晶体 ooe 类型相位匹配为例,讨论其精度。

单轴晶体折射率曲线在光学主轴坐标系中是一个椭圆。为了方便计算相位匹配,在这里可以把折射率椭圆除以波长称为等效折射率椭圆。图 2(a)是 BBO 晶体不同波长及偏振条件下的等效折射率椭圆。匹配波长为 1588.1 nm(o)+800 nm(e)→532 nm(e)。红线是 1588.1 nm 的等效折射率椭圆,由于其是寻常光,所以是个圆,半径为 A ,离心率为 0。绿线是 800 nm 的等效折射率椭圆,长半轴为 B ,短半轴为 E ,离心率约为 0.37。蓝线是 532 nm 的等效折射率椭圆,长半轴为 C ,短半轴为 F ,离心率亦约为 0.37。结合(7)式可得,1588.1 nm 的等效折射率椭圆加上 800 nm 的等效折射率椭圆与 532 nm 的等效折射率椭圆有交点,交点位置即为相位匹配点。如图 2(a)所示,交点位置与光轴夹角为 40° ,此即为相位匹配角。近似解的近似条件是认为 1588.1 nm 的等效折射率椭圆加上 800 nm 的等效折射率椭圆所形成的图形与长半轴为 $(A+B)$ 短半轴为 $(A+E)$ 的椭圆[图 2(a)中红圈]相同。图 2(a)可以看出,两者的图形是几乎重合的。定量的计算结果指出,近似解与数值解的精确解相差 0.9° 。近似解的误差主要跟晶体的折射率有关,一般情况是晶体的折射率椭圆离心率越大,误差越大。图 2(b)显示了 BBO 晶体近似解得到的相位匹配角误差与折射率椭圆离心率的关系。可以通过逐步修改 BBO 晶体折射率椭圆的长半轴大小获得这一条曲线。从图 2(b)可以看出,如果折射率椭圆的离心率小于 0.4,则近似解得到匹配角度误差在 1° 以内。

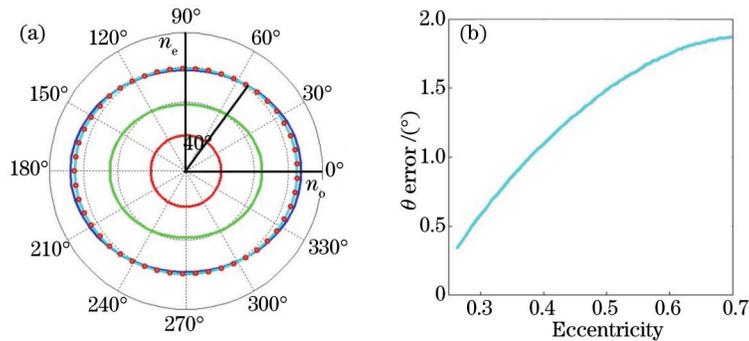


图 2 (a) BBO 晶体不同波长的等效折射率椭圆; (b) 近似解得到的相位匹配角误差与折射率椭圆离心率的关系

Fig.2 (a) Wavelength dependent effective refractive index ellipse in BBO crystal; (b) relationship between approximate analytical calculated phase match angle errors and crystal's refractive index ellipse eccentricity

共线结构相位匹配角计算公式如表 2 所示,相位匹配角的表达式统一写为(10)式的形式,不同类型的相位匹配,表达式里面的参数有所不同。各参数的表达式可在表 2 中查询。

3.2 非共线相位匹配

3.2.1 双 o 类型

对于双 o 类型的非共线相位匹配,仍然可以得到相位匹配角的严格解,计算方式与 3.1 节类似,求解过程不再列出,结果如表 3 所示。

表2 计算相位匹配角的公式

Table 2 Formulas for calculation of phase-matching angles

Crystal		U	V	W
	ooe	$\left(\frac{A+B}{C}\right)^2$	$\left(\frac{A+B}{F}\right)^2$	1
Negative uniaxial crystal	oeo	$\left(\frac{C}{A+B}\right)^2$	$\left(\frac{F}{B+D}\right)^2$	$\left(\frac{F}{C}\right)^2$
	oeo	$\left(\frac{C}{A+B}\right)^2$	$\left(\frac{F}{A+E}\right)^2$	$\left(\frac{F}{C}\right)^2$
	eeo	$\left(\frac{C}{A+B}\right)^2$	$\left(\frac{C}{D+E}\right)^2$	1
Positive uniaxial crystal	oeo	$\left(\frac{A-C}{B}\right)^2$	$\left(\frac{A-B}{E}\right)^2$	1
	eoo	$\left(\frac{B-C}{A}\right)^2$	$\left(\frac{B-C}{D}\right)^2$	1

$$\tan^2 \theta = W \left(\frac{1-U}{V-1} \right), A = \frac{n_{o1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{o2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{o3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{e1}}{\lambda_1}, E = \frac{n_{e2}}{\lambda_2}, F = \frac{n_{e3}}{\lambda_3}$$

表3 非共线条件下的相位匹配角计算公式

Table 3 Formulas for calculation of phase-matching angles in non-collinear configuration

Crystal		U	V	W
Negative uniaxial crystal	ooe	$\left(\frac{B \cos \alpha + \sqrt{A^2 - B^2 \sin^2 \alpha}}{C}\right)^2$	$\left(\frac{B \cos \alpha + \sqrt{A^2 - B^2 \sin^2 \alpha}}{F}\right)^2$	1
	oeo	-	-	-
	oeo	-	-	-
Positive uniaxial crystal	eeo	-	-	-
	oeo	$\left(\frac{C \cos \alpha + \sqrt{A^2 - C^2 \sin^2 \alpha}}{B}\right)^2$	$\left(\frac{B \cos \alpha - \sqrt{A^2 - B^2 \sin^2 \alpha}}{E}\right)^2$	1
	eoo	$\frac{B^2 + C^2 - 2BC \cos \alpha}{A^2}$	$\frac{B^2 + C^2 - 2BC \cos \alpha}{D^2}$	1

$$\tan^2 \theta = W \left(\frac{1-U}{V-1} \right), A = \frac{n_{o1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{o2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{o3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{e1}}{\lambda_1}, E = \frac{n_{e2}}{\lambda_2}, F = \frac{n_{e3}}{\lambda_3}$$

3.2.2 双e类型

对于双e类型的非共线相位匹配,没有解析解,近似解析解也失效。只能通过数值求解。在这里结合图1,给出一般的数值求解步骤:

1) 假设已知某个非共线夹角 α ,令

$$\eta_1 = \frac{n_1}{\lambda_1}, \quad \eta_2 = \frac{n_2}{\lambda_2}, \quad \eta_3 = \frac{n_3}{\lambda_3}. \quad (16)$$

根据三角形关系式 $\frac{\sin \beta}{\eta_3} = \frac{\sin \alpha}{\eta_1}$ 得到 β 与 α 的关系,由于此时并不知道确切的 η_1 或 η_3 ,需做一定的近似。

选取某个光波(一般选o光)与光轴的夹角 θ 作为变量,再通过下面的关系式得到另外两束光波与光轴的夹角。

对于离轴方式,

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_2 + \beta, \\ \theta_3 &= \theta_2 + \alpha. \end{aligned} \quad (17)$$

对于近轴方式,

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_2 - \beta, \\ \theta_3 &= \theta_2 - \alpha. \end{aligned} \quad (18)$$

2) 将所有已知量代入折射率方程, 得到 η_1, η_2, η_3 。结合图 1, 如果选取的 θ 满足相位匹配, 则根据余弦定理有 $\eta_1^2 = \eta_2^2 + \eta_3^2 - 2\eta_2\eta_3 \cos \alpha$, 构造

$$f = |\eta_1^2 - \eta_2^2 - \eta_3^2 + 2\eta_2\eta_3 \cos \alpha|, \quad (19)$$

使得 f 值最小的 θ 即为相位匹配角。

下面以负单轴晶体的 eeo 匹配为例介绍这一过程。

给定 α ,

$$\eta_1 = A \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta_1}{1 + \left(\frac{A}{D}\right)^2 \tan^2 \theta_1}}, \quad \eta_2 = B \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta_2}{1 + \left(\frac{B}{E}\right)^2 \tan^2 \theta_2}}, \quad \eta_3 = C, \quad (20)$$

$\frac{\sin \beta}{\eta_3} = \frac{\sin \alpha}{\eta_1}$, 近似认为

$$\sin \beta = \frac{\eta_3}{\eta_1} \sin \alpha \approx \frac{2C}{A+B} \sin \alpha, \quad (21)$$

然后根据是离轴方式还是近轴方式, 代入相应方程得到剩下的两个光波与光轴的夹角, 得出三波折射率, 构造函数 f , 使得 f 最小, 即可得到相应的相位匹配角。

4 双轴晶体相位匹配

双轴晶体的折射率计算起来相当复杂, 因此其相位匹配计算起来亦是相对较难。然而大部分情况下应用的是其主平面上的相位匹配, 此时的折射率计算起来与单轴晶体类似。但是即使在主平面, 每个晶体有三个主平面, 每个平面有 6 种可能的匹配方式, 这样每个双轴晶体有 18 种可能的匹配方式。在以前的文献中, 计算双轴晶体主平面的相位匹配时, 仍然提出一套相应的计算公式, 计算量是比较大的。双轴晶体主平面的相位匹配与单轴晶体类似, 因此本文利用折射率替换的方法, 直接利用单轴晶体的相位匹配计算双轴晶体主平面的相位匹配。下面给出这一分析过程。

对于双轴晶体而言, 一般称不同偏振态的光波为“快光”或者“慢光”。然而在主平面上, 为了与单轴晶体的相位匹配对应起来, 仍可称偏振态与主平面垂直的光为 o 光, 与主平面平行的光为 e 光。

图 3 显示了光波矢量与光学主轴的夹角, 图 3(a) 是在任意平面的情况, 图 3(b) 是在 xy 平面的情况。

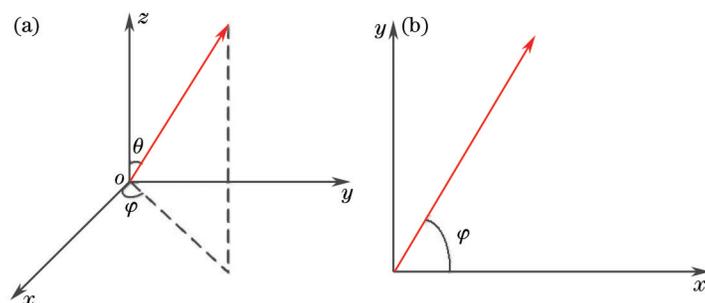


图 3 波矢量与光学主轴的夹角。(a) 在任意平面; (b) 在 xy 平面

Fig.3 Angle between wave vector and optic principal axis. (a) In arbitrary plane; (b) in xy plane

波矢量在 xy 平面, 如图 3(b) 所示, 根据晶体光学相关知识, 可得

$$n(\varphi) = n_y \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \varphi}{1 + \left(\frac{n_y}{n_x}\right)^2 \tan^2 \varphi}}. \quad (22)$$

对比单轴晶体的折射率方程, 发现只要进行如下替换:

$$n_e \rightarrow n_x, \quad n_o \rightarrow n_y, \quad (23)$$

则在双轴晶体 xy 平面内的折射率计算方式与单轴晶体相同。表 4 列出了双轴晶体主平面与单轴晶体的折射率替换方式。利用表 4, 就完全可以使使用单轴晶体计算相位匹配的那套公式及计算方法计算双轴晶体主平

面的相位匹配。

表4 双轴晶体主平面折射率与单轴晶体折射率的对应关系

Table 4 Relationship of refractive index between uniaxial crystal and biaxial crystal in principal plane

	n_o	n_o	n_e
$xy(\theta=0^\circ, \varphi)$	n_z	n_y	n_x
$xz(\theta, \varphi=0^\circ)$	n_y	n_x	n_z
$yz(\theta, \varphi=0^\circ)$	n_x	n_y	n_z

5 数值举例

图4~7是利用第3.4节的公式及方法计算的几个实例。抽运光波长为532 nm($\lambda_3=532$ nm),非共线夹角 α 为 $0^\circ\sim 3^\circ$,对应的线条颜色分别是红色、绿色、蓝色和青色。图4显示了BBO晶体 ooe, eoe, oee 三种匹配方式的相位匹配角度随非共线角的变化。图5显示了三硼酸锂(LBO)晶体 xy 平面 ooe,eoe,oeo 三种匹配方式的相位匹配角度随非共线角的变化。图6显示了三硼酸铋(BIBO)晶体 xz 平面 eeo,eoo,oeo 三种匹配方式的相位匹

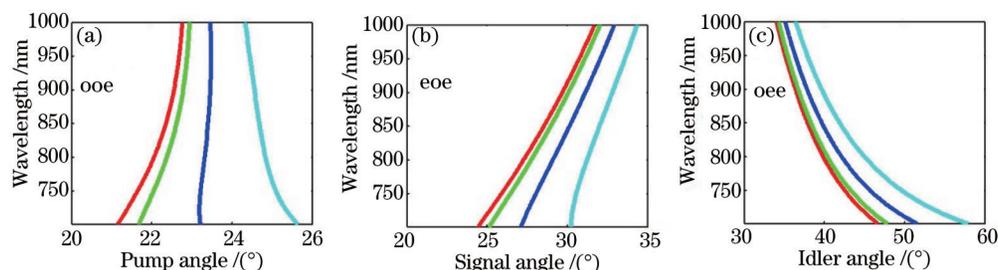


图4 BBO晶体在532 nm抽运时相位匹配角度随非共线夹角 α 的变化(非共线夹角 α 从 0° 变化到 3° ,对应的线条颜色分别是红色、绿色、蓝色和青色)

Fig.4 Dependence of phase matching angle of BBO on non-collinear angle α with phase matching process pumped by 532 nm light (non-collinear angle α varies from 0° to 3° , corresponding to red, green, blue and cyan lines)

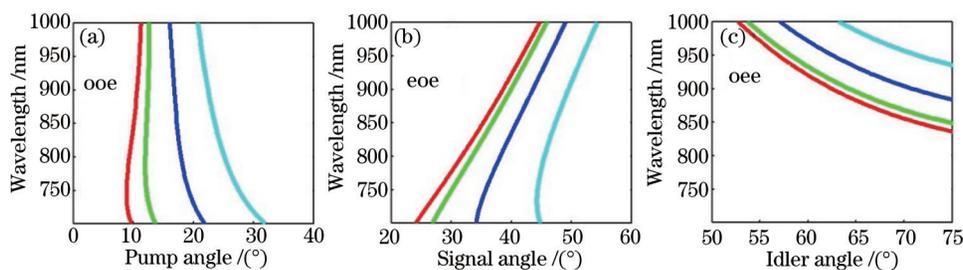


图5 LBO晶体 xy 平面在532 nm抽运时相位匹配角度随非共线夹角的变化(非共线夹角 α 从 0° 变化到 3° ,对应的线条颜色分别是红色、绿色、蓝色和青色)

Fig.5 Dependence of phase matching angle of LBO xy plane on non-collinear angle α with phase matching process pumped by 532 nm light (non-collinear angle α varies from 0° to 3° , corresponding to red, green, blue and cyan lines)

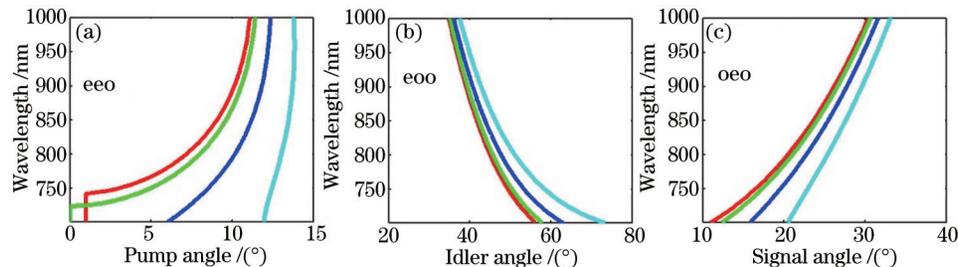


图6 BIBO晶体 xz 平面在532 nm抽运时相位匹配角度随非共线夹角的变化(非共线夹角 α 从 0° 变化到 3° ,对应的线条颜色分别是红色、绿色、蓝色和青色)

Fig.6 Dependence of phase matching angle of BIBO xz plane on non-collinear angle α with phase matching process pumped by 532 nm light (non-collinear angle α varies from 0° to 3° , corresponding to red, green, blue and cyan lines)

配角度随非共线角的变化。图7显示了BIBO晶体 yz 平面 eeo, eoo, oeo 三种匹配方式的相位匹配角度随非共线角的变化。

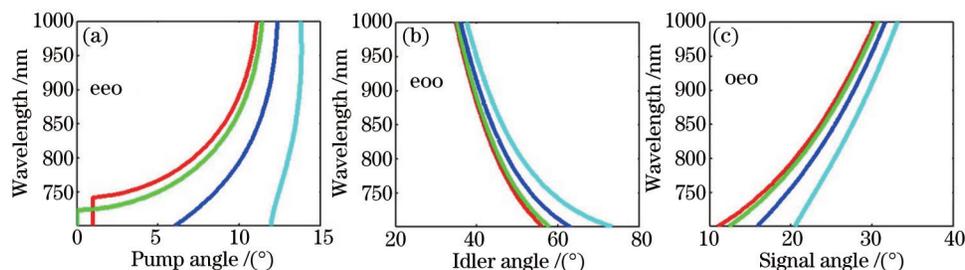


图7 BIBO晶体 yz 平面在532 nm抽运时相位匹配角度随非共线夹角的变化(非共线夹角 α 从 0° 变化到 3° ,对应的线条颜色分别是红色、绿色、蓝色和青色)

Fig.7 Dependence of phase matching angle of BIBO yz plane on non-collinear angle α with phase matching process pumped by 532 nm light (non-collinear angle α varies from 0° to 3° , corresponding to red, green, blue and cyan lines)

从图4~7可以看出,非共线夹角不同,相位匹配角度亦不同。相位匹配曲线越接近竖直,则意味着相位匹配范围越宽,所获得的增益带宽越宽。当匹配方式为I类时,在某个非共线角条件下,相位匹配曲线较为竖直,相位匹配范围较宽,而当匹配方式为II类时,一般不存在宽带的相位匹配。这是由于I类匹配的信号光和闲置光的偏振态相同,在合适的非共线夹角下,可以使得其一阶甚至更高阶的色散匹配,从而实现宽带匹配。但是对于II类匹配,信号光和闲置光偏振态不同,一般不存在这个条件。更深入的讨论,可参见文献[13],这里不再详述。

6 结 论

相位匹配是光参量放大中的重要概念。给出了单轴晶体 ooe, oeo, eeo 等6种相位匹配方式相位匹配角的计算公式,并列成表以供查询。其中 ooe, oeo, eeo 三种可以直接计算非共线情况, eeo, eoe, oee 三种只能计算共线情况,计算非共线情况时需数值求解,为此给出了数值求解的方法步骤。给出了双轴晶体折射率在主平面时与单轴晶体折射率的对应关系,利用该对应关系,可以通过替换折射率的方式求解双轴晶体的相位匹配角度。可以在统一架构下对单轴晶体及双轴晶体主平面上进行相位匹配的计算。大大简化了求解相位匹配问题的工作量。给出了常见晶体相位匹配角随非共线角度的变化,以供科研人员参考。

参 考 文 献

- 1 Baumgartner Richard A, Byer R. Optical parametric amplification[J]. IEEE J Quantum Elect, 1979, 15(6): 432-444.
- 2 Cerullo G, De Silvestri S. Ultrafast optical parametric amplifiers[J]. Rev Sci Instrum, 2003, 74(1): 1-18.
- 3 Lu Xu, Lianghong Yu, Xiaoyan Liang, *et al.*. High-energy non-collinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4837-4840.
- 4 O V Chekhlov, J L Collier, I N Ross, *et al.*. 35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system[J]. Opt Lett, 2006, 31(24): 3665-3667.
- 5 V V Lozhkarev, G I Freidman, V N Ginzburg, *et al.*. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals[J]. Laser Phys Lett, 2007, 4(6): 421-427.
- 6 R W Boyd. Nonlinear Optics, Third Edition[M]. New York: Academic Press, 2008: 79-84.
- 7 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al.*. Study of phase matching of three wave noncollinear interactions optical parametric process[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(2): 129-133.
刘红军,陈国夫,赵卫,等.三波非共线作用参变过程的相位匹配研究[J].光学学报,2002,22(2):129-133.
- 8 Sun Meizhi, Bi Qunyu, Zhang Fuling, *et al.*. Study on noncollinear phase matching in YCOB crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0119001.
孙美智,毕群玉,张福领,等.YCOB晶体非共线相位匹配技术研究[J].光学学报,2011,31(1):0119001.
- 9 Shao Min, Xue Shaolin, Zhu Pengfei, *et al.*. Theoretical analysis of type-II phase matching optical parametric amplification in BBO crystal[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(9): 1055-1060.

- 邵 敏, 薛绍林, 朱鹏飞, 等. BBO 晶体 II 类相位匹配光参量放大理论分析[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1055-1060.
- 10 Wang Yanhai, Zhang Fuling, Liu Guocai, *et al.*. Analysis and optimization of phase-matching configuration in ultrabroadband optical parametric amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802010.
- 王艳海, 张福领, 刘国才, 等. 超宽带光参量放大器中相位匹配结构的分析和优化[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802010.
- 11 D N Nikogosyan, G G Gurzadyan. New formulas for the calculation of phase-matching angles[J]. Sov J Quantum Electron, 1986, 16 (12): 1663-1664.
- 12 V G Dmitriev, G G Gurzadyan, D N Nikogosyan. Handbook of Nonlinear Optical Crystals, Third Revised Edition[M]. Berlin: Springer Verlag, 1999: 6-49.
- 13 Xiaoyang Guo, Cheng Wang, Yuxin Leng, *et al.*. Bandwidth analysis of type-I optical parametric chirped pulse amplification systems [J]. J Opt Soc Am B, 2014, 31(11): 2615-2620.

栏目编辑: 史 敏