

# 双轴晶体中二次谐波产生的最佳相位匹配条件<sup>\*</sup>

马仰华<sup>1)</sup> 赵建林<sup>1)†</sup> 王文礼<sup>2)</sup> 黄卫东<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 西安 710072)

<sup>2)</sup> 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

(2004 年 5 月 11 日收到, 2004 年 9 月 6 日收到修改稿)

从二次谐波产生的理论出发, 讨论了双轴晶体中二次谐波产生的相位匹配条件, 推导了有效非线性光学系数的精确计算公式, 以有机非线性光学晶体二苯甲酮为例, 给出了对两种基波(1.064 $\mu\text{m}$  和 0.808 $\mu\text{m}$ )二次谐波产生的相位匹配条件的数值模拟及相应的有效非线性光学系数的精确计算结果, 并确定出相应的最佳相位匹配条件.

关键词: 二次谐波产生, 最佳相位匹配, 有效非线性光学系数, 二苯甲酮晶体

PACC: 4265K, 4270J

## 1. 引言

1961 年 Franken 等<sup>[1]</sup>实现激光的二次谐波产生(second harmonic generation, SHG, 又称倍频), 从而开启了激光非线性倍频技术的大门. 作为一种典型的二阶非线性相互作用过程, SHG 在拓宽激光光谱、促进短波段激光技术发展中发挥着举足轻重的作用. 与此同时, 激光技术在各种领域中的应用, 诸如海量光存储、海底通信、海洋探测、彩色显示及印刷技术的飞速发展, 对激光倍频技术和材料提出了越来越高的要求. 非线性光学晶体中固有的双折射是实现激光倍频的必要条件, 但双轴晶体中光束传播的复杂性使其在倍频技术中的实际应用受到了很大的限制, 因此研究并获取双轴晶体中 SHG 的最佳相位匹配条件是一项十分有意义的工作.

Hobden<sup>[2]</sup>对双轴晶体中 SHG 的相位匹配条件进行了系统研究, 并根据基波与相应谐波在晶体中的六个主折射率之间的相对关系, 将相位匹配曲线分成 14 种类型. 对于相应的有效非线性光学系数的计算, 也已有相关文献报道<sup>[3,4]</sup>, 但均因引入以下两点近似或其中之一而未能给出其精确的算法.

1) 近似认为双轴晶体中的波矢  $k$  与其所对应的电场强度  $E$  垂直;

2) 近似认为谐波快光(慢光)的偏振方向与其基

波快光(慢光)的偏振方向相同.

以上的近似无疑将会对有效非线性光学系数的精确计算引起偏差. 本文通过以下处理, 给出双轴晶体中 SHG 的有效非线性光学系数的精确计算公式:

1) 准确求解双轴晶体中波矢  $k$  所对应的电场强度矢量  $E$ ;

2) 精确区分不同频率下相应传播模式(快光或慢光)偏振方向之间的差异.

## 2. 双轴晶体中 SHG 的相位匹配条件

SHG 的效率  $\eta$  与相位失配量  $\Delta k$  和有效非线性光学系数  $d_{\text{eff}}$  有如下关系:

$$\eta \propto \frac{\sin^2(\Delta kz/2)}{(\Delta kz/2)^2} |d_{\text{eff}}|^2, \quad (1)$$

(1) 式表明, 二次谐波只有在最佳相位匹配条件下才能获得最大效率. 所谓最佳相位匹配条件, 是指使有效非线性光学系数  $d_{\text{eff}}$  的平方取最大值的相位匹配条件, 因此要确定最佳相位匹配条件, 必须首先确定出相位匹配条件.

为描述的方便, 引入折射率曲面的概念. 在介电主轴坐标系中, 双轴晶体的折射率曲面有如下形式:

$$\frac{\sin^2\theta\cos^2\phi}{(n^{-2}-n_1^{-2})} + \frac{\sin^2\theta\sin^2\phi}{(n^{-2}-n_2^{-2})} + \frac{\cos^2\theta}{(n^{-2}-n_3^{-2})} = 0, \quad (2)$$

其中  $n_1, n_2, n_3$  分别表示光波在晶体中沿  $x, y, z$  方

<sup>\*</sup> 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题资助.

<sup>†</sup> E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn

向的主折射率(下标 1 2 3 分别表示  $x, y, z$ , 下同).  $\theta$  表示波矢  $k$  与晶体介电主轴坐标系中  $z$  轴的夹角  $\phi$  表示波矢  $k$  在  $xoy$  平面上的投影与  $x$  轴的夹角.

由(2)式可以看出,双轴晶体中的一个波矢  $k$ , 即任意一组  $(\theta, \phi)$  对应着两个折射率,即两个独立的传播模式(快光  $e_1$  和慢光  $e_2$ ).

由折射率曲面的性质和 SHG 的相关理论可知,双轴晶体中第 I 类和第 II 类相位匹配条件,即基波和谐波折射率面的空间交线  $f(\theta, \phi) = 0$  分别为

$$n'_1 = n''_2, \quad (3)$$

$$(n'_1 + n''_1)/2 = n''_2, \quad (4)$$

式中  $n'_1, n''_1$  分别是方程(2)对基波的两个正实根( $n' > n''$ ),  $n''_2$  是方程(2)对相应谐波的两个正实根中的较小根.

由此可见,第 I 类和第 II 类相位匹配的匹配曲线仅取决于该晶体对基波及相应谐波的主折射率.因此,只要知道晶体折射率的塞尔迈取(Sellmeier)公式,就可以通过数值计算来确定出该晶体对任意基波 SHG 的相位匹配条件.

若设第一卦限上点  $(\theta_1 = 0-90^\circ, \phi_1 = 0-90^\circ)$  为双轴晶体中 SHG 相位匹配曲线  $f(\theta, \phi) = 0$  上的一点,则有  $f(\theta_1, \phi_1) = 0$  且  $(\theta_2 = \theta_1 = 0-90^\circ, \phi_2 = 180^\circ - \phi_1 = 90^\circ-180^\circ)$  为第二卦限上的点.由  $f(\theta_1, \phi_1) = 0$  和(2)式易得  $f(\theta_2, \phi_2) = 0$ , 则  $(\theta_2, \phi_2)$  为相位匹配曲线  $f(\theta, \phi) = 0$  在第二卦限空间分布上的一点,即  $f(\theta, \phi) = 0$  在第二卦限上的空间分布可以由其在第一卦限上的分布表示出来.同理可以证明,  $f(\theta, \phi) = 0$  在其他卦限上的空间分布也可以由其第一卦限上的分布表示出来.为简便起见,可以只讨论  $f(\theta, \phi) = 0$  在第一卦限上的分布.

### 3. 双轴晶体中 SHG 有效非线性光学系数的精确计算

SHG 的有效非线性光学系数由下式给出<sup>[4]</sup>

$$d_{\text{eff}} = \sum_{ijk} \alpha_i d_{ijk} \beta_j \gamma_k, \quad (5)$$

式中  $\beta, \gamma$  为两基波的单位偏振矢量,  $\alpha$  为谐波的单位偏振矢量,  $d_{ijk}$  为晶体的二阶非线性光学系数张量元素.考虑晶体的本征对易对称性和空间对称性,二阶非线性光学系数张量将退化为一个只有个别非零元素的矩阵  $d_{ij} 1_{\times 6}$ .由(5)式可以看出,要精确计算有效非线性光学系数  $d_{\text{eff}}$ , 必须首先确定出单位矢

量  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  的精确表达式.

双轴晶体中,同一模式的电场强度矢量  $E$  和相应的电位移矢量  $D$  的方向一般并不相同,在介电主轴坐标系中,二者之间的关系为

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\epsilon_0} \begin{pmatrix} 1/n_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_3^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

(6)式表明,只要确定出某一模式下光束的电位移矢量  $D$  沿三个介电主轴方向上的分量,就可以求出相应电场强度矢量  $E$ ,从而确定出该光束的偏振方向.

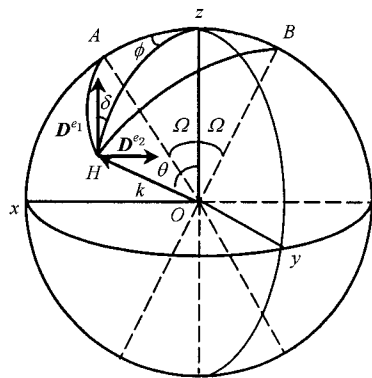


图1 光波在双轴晶体中的波矢量与相应电位移矢量的方位关系

图1中,  $OH$  表示波矢量  $k$  的长度,  $OA, OB$  为晶体的光轴,  $\Omega$  为光轴与  $z$  轴的夹角,  $\delta$  为慢光  $e_1$  的电位移矢量  $D^{e_1}$  与平面  $HOz$  之间的夹角.由 Biot-Fresnel 定理<sup>[5]</sup>知,与波矢量  $k$  垂直的是对应模式的电位移矢量  $D$ ,而不是相应的电场强度矢量  $E$ ,且  $D^{e_1}$  平分  $OH$  同光轴  $OA, OB$  组成的两个平面.由球面三角形的边角关系可得

$$\cot 2\delta = \frac{\cot^2 \Omega \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \phi}{\cos \theta \sin 2\phi}, \quad (7)$$

$$\tan \Omega = \pm \frac{n_3}{n_1} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_3^2 - n_2^2}}. \quad (8)$$

$D^{e_1}$  和  $D^{e_2}$  在介电主轴坐标系可表示为

$$\begin{aligned} D^{e_1} &= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi \cos \delta - \sin \phi \sin \delta \\ \cos \theta \sin \phi \cos \delta + \cos \phi \sin \delta \\ -\sin \theta \cos \delta \end{pmatrix} D^{e_1} \\ &= \begin{pmatrix} b_1^{e_1} \\ b_2^{e_1} \\ b_3^{e_1} \end{pmatrix} D^{e_1} = \mathbf{b}^{e_1} D^{e_1}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 D^{\epsilon_2} &= \begin{pmatrix} -\cos\theta\cos\phi\sin\delta - \sin\phi\cos\delta \\ -\cos\theta\sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta \\ \sin\theta\cos\delta \end{pmatrix} D^{\epsilon_2} \\
 &= \begin{pmatrix} b_1^{\epsilon_2} \\ b_2^{\epsilon_2} \\ b_3^{\epsilon_2} \end{pmatrix} D^{\epsilon_2} = \mathbf{b}^{\epsilon_2} D^{\epsilon_2}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中  $\mathbf{b}^{\epsilon_1}$  和  $\mathbf{b}^{\epsilon_2}$  分别为  $D^{\epsilon_1}$  和  $D^{\epsilon_2}$  的单位矢量,  $D^{\epsilon_1}$  和  $D^{\epsilon_2}$  分别为  $\mathbf{D}^{\epsilon_1}$  和  $\mathbf{D}^{\epsilon_2}$  的模值. 根据(6)(9)和(10)式来确定  $\mathbf{E}^{\epsilon_1}$ ,  $\mathbf{E}^{\epsilon_2}$  在介电主轴坐标系中的表达式:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}^{\epsilon_1} &= \begin{pmatrix} E_1^{\epsilon_1} \\ E_2^{\epsilon_1} \\ E_3^{\epsilon_1} \end{pmatrix} \\
 &= \frac{1}{\epsilon_0} \begin{pmatrix} 1/n_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_3^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1^{\epsilon_1} \\ b_2^{\epsilon_1} \\ b_3^{\epsilon_1} \end{pmatrix} D^{\epsilon_1} \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}^{\epsilon_2} &= \begin{pmatrix} E_1^{\epsilon_2} \\ E_2^{\epsilon_2} \\ E_3^{\epsilon_2} \end{pmatrix} \\
 &= \frac{1}{\epsilon_0} \begin{pmatrix} 1/n_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_3^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1^{\epsilon_2} \\ b_2^{\epsilon_2} \\ b_3^{\epsilon_2} \end{pmatrix} D^{\epsilon_2}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

由(11)和(12)式确定  $\mathbf{E}^{\epsilon_1}$ ,  $\mathbf{E}^{\epsilon_2}$  的单位矢量, 即光束的单位偏振矢量  $\mathbf{a}^{\epsilon_1}$ ,  $\mathbf{a}^{\epsilon_2}$ :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}^{\epsilon_1} &= \frac{\mathbf{E}^{\epsilon_1}}{E^{\epsilon_1}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{(b_1^{\epsilon_1}/n_1^2)^2 + (b_2^{\epsilon_1}/n_2^2)^2 + (b_3^{\epsilon_1}/n_3^2)^2}} \begin{pmatrix} b_1^{\epsilon_1}/n_1^2 \\ b_2^{\epsilon_1}/n_2^2 \\ b_3^{\epsilon_1}/n_3^2 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} a_1^{\epsilon_1} \\ a_2^{\epsilon_1} \\ a_3^{\epsilon_1} \end{pmatrix}, \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}^{\epsilon_2} &= \frac{\mathbf{E}^{\epsilon_2}}{E^{\epsilon_2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{(b_1^{\epsilon_2}/n_1^2)^2 + (b_2^{\epsilon_2}/n_2^2)^2 + (b_3^{\epsilon_2}/n_3^2)^2}} \begin{pmatrix} b_1^{\epsilon_2}/n_1^2 \\ b_2^{\epsilon_2}/n_2^2 \\ b_3^{\epsilon_2}/n_3^2 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} a_1^{\epsilon_2} \\ a_2^{\epsilon_2} \\ a_3^{\epsilon_2} \end{pmatrix}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

(13)和(14)两式表明,只要知道某频率的光波在晶体中的主折射率,便可确定出该频率下任意波矢  $\mathbf{k}$  所对应的两个传播模式( $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$ )的偏振方向.

不同频率的光波在晶体中的主折射率一般不同,由(7)–(14)式可知,某基频光波与其二次谐波光波在晶体中所对应的  $\Omega$  及  $\delta$  不同,进而导致相同模式( $\mathbf{e}_1$  或  $\mathbf{e}_2$ )下基波与其谐波偏振方向不同,即  $\mathbf{a}(\omega)$  与  $\mathbf{a}(2\omega)$  不同,这一点是以往绝大多数讨论双轴晶体中有效非线性光学系数的文献中所没有考虑到的.

对于第 I 类相位匹配( $\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1 \rightarrow \mathbf{e}_2$ ),即偏振方向相互平行的两基波光束(二者均为慢光)相互作用产生二次谐波(快光),此时  $\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\alpha}^{\epsilon_2}(2\omega)$ ,  $\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\alpha}^{\epsilon_1}(\omega)$  和  $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\alpha}^{\epsilon_1}(\omega)$  则

$$\begin{aligned}
 d_{\text{eff}}^I(\theta, \phi) &= (a_i^{\epsilon_2}(2\omega)) [d_{ij}] \\
 &\times (a_j^{\epsilon_1}(\omega) a_k^{\epsilon_1}(\omega)), \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (a_j^{\epsilon_1}(\omega) a_k^{\epsilon_1}(\omega)) &= \begin{pmatrix} a_1^{\epsilon_1}(\omega) a_1^{\epsilon_1}(\omega) \\ a_2^{\epsilon_1}(\omega) a_2^{\epsilon_1}(\omega) \\ a_3^{\epsilon_1}(\omega) a_3^{\epsilon_1}(\omega) \\ 2a_2^{\epsilon_1}(\omega) a_3^{\epsilon_1}(\omega) \\ 2a_1^{\epsilon_1}(\omega) a_3^{\epsilon_1}(\omega) \\ 2a_1^{\epsilon_1}(\omega) a_2^{\epsilon_1}(\omega) \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{14} \\ A_{15} \\ A_{16} \end{pmatrix}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

对于第 II 类相位匹配( $\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \rightarrow \mathbf{e}_2$ ),即偏振方向相互垂直的两基波光束(慢光 + 快光)相互作用产生二次谐波(快光),此时  $\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\alpha}^{\epsilon_2}(2\omega)$ ,  $\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\alpha}^{\epsilon_1}(\omega)$  和  $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\alpha}^{\epsilon_2}(\omega)$  则

$$\begin{aligned}
 d_{\text{eff}}^{II}(\theta, \phi) &= (a_i^{\epsilon_2}(2\omega)) [d_{ij}] (a_j^{\epsilon_1}(\omega) a_k^{\epsilon_2}(\omega)), \quad (17)
 \end{aligned}$$

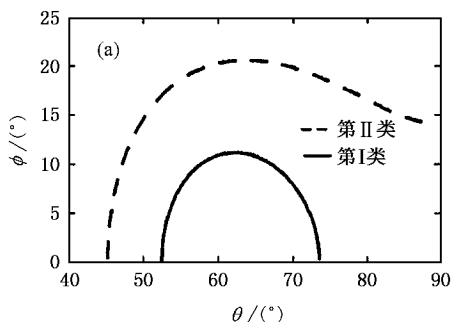
$$\begin{aligned}
 (a_j^{\epsilon_1}(\omega) a_k^{\epsilon_2}(\omega)) &= \begin{pmatrix} a_1^{\epsilon_1}(\omega) a_1^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_2^{\epsilon_1}(\omega) a_2^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_3^{\epsilon_1}(\omega) a_3^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_2^{\epsilon_1}(\omega) a_3^{\epsilon_2}(\omega) + a_3^{\epsilon_1}(\omega) a_2^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_1^{\epsilon_1}(\omega) a_3^{\epsilon_2}(\omega) + a_3^{\epsilon_1}(\omega) a_1^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_1^{\epsilon_1}(\omega) a_2^{\epsilon_2}(\omega) + a_2^{\epsilon_1}(\omega) a_1^{\epsilon_2}(\omega) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} A_{21} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ A_{24} \\ A_{25} \\ A_{26} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

根据(7)~(18)式,可以精确地计算出双轴晶体中任意相位匹配条件下的有效非线性光学系数,进而可以确定出相应的最佳相位匹配方向.

### 4. 二苯甲酮晶体中 SHG 的相位匹配条件及相应的有效非线性光学系数

有机双轴晶体二苯甲酮属于正交晶系  $22\bar{X}(D2)$



点群.理论和实验研究表明<sup>[6,7]</sup>,二苯甲酮晶体具有很强的二阶非线性极化效应,而且在 390—1700nm 波段内有很高的透过率,可将其用于对基波在波段 800—1700nm 内的激光倍频.

取基波  $1.064\mu\text{m}$  和  $0.800\mu\text{m}$ ,则相应的二次谐波分别为  $0.532\mu\text{m}$  和  $0.404\mu\text{m}$ .根据文献[7]所提供的二苯甲酮晶体在上述波长处的主折射率,对该晶体中在上述两种基波处 SHG 的相位匹配条件( $\theta = 0\text{--}90^\circ, \phi = 0\text{--}90^\circ$ )进行数值模拟,结果分别如图 2(a)和(b)所示.按照主折射率之间的相对关系,二苯甲酮晶体对上述两种基波的 SHG 过程分别属于 Hobden 分类中的第 3 和第 9 类,而图 2(a)和(b)中所示的相位匹配曲线也分别与 Hobden 分类中的第 3 和第 9 类相符.

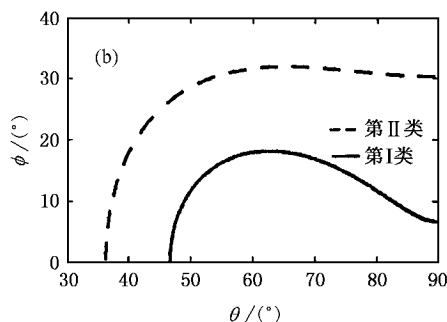
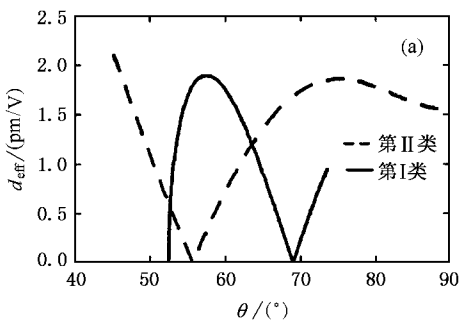


图 2 二苯甲酮晶体 SHG 的相位匹配条件.(a)基波为  $1.064\mu\text{m}$  (b)基波为  $0.808\mu\text{m}$

对于二苯甲酮晶体,其二阶非线性光学系数张量  $[d_{ij}]$  为

$$[d_{ij}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

由此得二苯甲酮晶体中 SHG 的有效非线性光学系数的计算公式为.



#### 第 I 类相位匹配

$$d_{\text{eff}}^{\text{I}} = d_{14} a_1^2(2\omega)A_{14} + d_{25} a_2^2(2\omega)A_{15} + d_{36} a_3^2(2\omega)A_{16}. \quad (20)$$

#### 第 II 类相位匹配

$$d_{\text{eff}}^{\text{II}} = d_{14} a_1^2(2\omega)A_{24} + d_{25} a_2^2(2\omega)A_{25} + d_{36} a_3^2(2\omega)A_{26}. \quad (21)$$

根据文献[7]的测量结果,取  $d_{14} = 4\text{pm/V}, d_{25} =$

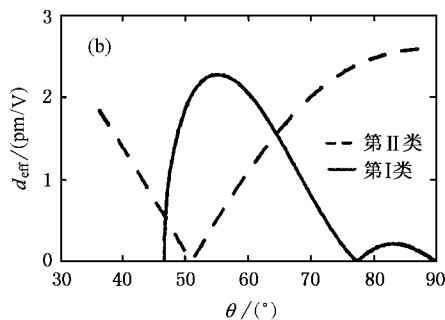


图 3 二苯甲酮晶体在满足 SHG 相位匹配条件下的有效非线性光学系数.(a)基波为  $1.064\mu\text{m}$  (b)基波为  $0.808\mu\text{m}$

1.4pm/V,  $d_{36} = 0.3\text{pm/V}$ . 将数值模拟出的第 I 类和第 II 类的相位匹配条件分别代入(21)和(22)式, 计算出相应的有效非线性光学系数, 结果由图 3(a)和(b)给出. 由图 3(a)和(b)可以看出, 二苯甲酮晶体在基波  $1.064\mu\text{m}$  和  $0.808\mu\text{m}$  处的最佳相位匹配条件分别为

$$1.064\mu\text{m} \text{ 第 I 类 } (\theta_{\text{opt}}, \phi_{\text{opt}}) = (57.52^\circ, 9.88^\circ);$$

$$\text{第 II 类 } (\theta_{\text{opt}}, \phi_{\text{opt}}) = (45.26^\circ, 0.55^\circ).$$

$$0.808\mu\text{m} \text{ 第 I 类 } (\theta_{\text{opt}}, \phi_{\text{opt}}) = (55.18^\circ, 16.34^\circ);$$

$$\text{第 II 类 } (\theta_{\text{opt}}, \phi_{\text{opt}}) = (89.30^\circ, 30.24^\circ).$$

## 5. 讨 论

只有在相位匹配条件下才能够获得最大效率的 SHG, 因此相位匹配条件的确定是获得高效倍频的关键. 另外, 最佳相位匹配条件的确定, 还可为用于特定波长处倍频效应的晶体的定向约束生长提供理论指导. 以二苯甲酮晶体对基波  $\lambda = 1.064\mu\text{m}$  的 SHG 的第 I 类相位匹配为例, 由上述计算可知, 其最佳相位匹配条件为  $(\theta_{\text{opt}}, \phi_{\text{opt}}) = (57.52^\circ, 9.88^\circ)$ , 经计算知该方向与介电主轴  $x, y, z$  的夹角分别为  $33.79^\circ, 81.68^\circ, 57.52^\circ$ . 由正交晶系晶体的介电主轴

与晶轴的空间关系( $x//c, y//b, z//a$ )可知, 该方向与晶轴  $a, b, c$  的夹角分别为  $57.52^\circ, 81.68^\circ, 33.79^\circ$ . 据此提出以下定向生长方法: 在生长晶体时, 将晶体限制在两个平行度和表面平整度都非常高的平行平板中间(两平板的法线取向与所确定出的最佳入射方向相平行), 以严格控制晶体用于二次谐波产生时的入射面和出射面, 而其他方向可自由生长. 则用与平板平面相垂直的基波光束照射按照上述方法生长出的晶片时, 便满足了二苯甲酮晶体对基波  $1.064\mu\text{m}$  SHG 的第 I 类相位匹配的最佳相位匹配条件. 这样既省略了晶体生长后的加工工艺, 又简化了 SHG 实验中为满足最佳相位匹配而进行的角度调节过程.

## 6. 结 论

本文简要讨论了双轴晶体中 SHG 的相位匹配条件, 具体推导了有效非线性光学系数的精确计算公式, 给出了二苯甲酮晶体对两种基波( $1.064\mu\text{m}$  和  $0.808\mu\text{m}$ ) SHG 相位匹配条件的数值模拟及相应有效非线性光学系数的计算结果, 并确定出相应的最佳相位匹配条件.

- [1] Franken P A *et al* 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 118  
 [2] Hobden M V 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 4365  
 [3] Hiromasa Ito *et al* 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 3992  
 [4] Yao J Q *et al* 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 891

- [5] Born M and Wolf E 1999 *Principles of Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) pp795—802  
 [6] Pan F *et al* 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 4649  
 [7] Lammers D *et al* 2000 *Phys. Stat. Sol. (a)* **180** R5

# Optimum phase matching for SHG in biaxial crystals<sup>\*</sup>

Ma Yang-Hua<sup>1)</sup> Zhao Jian-Lin<sup>1)†</sup> Wang Wen-Li<sup>2)</sup> Huang Wei-Dong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Institute of Optical Information Science & Technology, School of Science,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

<sup>2)</sup>*State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

( Received 11 May 2004 ; revised manuscript received 6 September 2004 )

## Abstract

The phase matching for second harmonic generation ( SHG ) in biaxial nonlinear-optical crystals is discussed and the accurate calculation of the corresponding effective nonlinear coefficients is presented , based on which the optimum phase matching can be determined. As an example , numerical treatment of phase matching and the corresponding effective nonlinear coefficients for SHG at fundamental wavelengths of 1.064 $\mu\text{m}$  and 0.808 $\mu\text{m}$  in the organic nonlinear-optical crystal benzophenone is performed , and accordingly the optimum phase matchings are found.

**Keywords** : second harmonic generation ( SHG ) , optimum phase matching , effective nonlinear coefficient , benzophenone

**PACC** : 4265K , 4270J

---

<sup>\*</sup> Project supported by the fund from the State Key Laboratory of Solidification Processing in NPU.

<sup>†</sup> E-mail : jljzhao@nwpu.edu.cn