

基于 BiB_3O_6 晶体的飞秒光参量变换特性^{*}

马晶[†] 刘迎 张丽君

(天津大学理学院物理系, 天津 300072)

(2009年12月12日收到; 2010年5月4日收到修改稿)

对基于新型非线性晶体 BiB_3O_6 (BIBO) 的飞秒光参量变换过程的参量特性进行了研究. 计算了 BIBO 晶体三个光学主平面内的相位匹配条件和有效非线性系数, 确定了克尔透镜锁模钛宝石激光器的基频光与倍频光抽运时最佳的光学主平面和相位匹配方式, 并分析了三波的时间走离和空间走离, 以及信号光的参量增益和带宽. 为利用基于 BIBO 晶体的飞秒光参量技术获得高能量、宽调谐、窄脉宽的光源提供理论依据和实验指导.

关键词: BiB_3O_6 , 光参量变换, 共线相位匹配, 光学主平面

PACS: 42.65.Ky, 42.65.Yj, 42.65.Re, 42.65.-k

1. 引言

非线性光学和时域光谱学的各种应用都需要有高能、宽调谐、窄脉宽的光源, 而飞秒光参量技术(光参量振荡(OPO), 光参量放大(OPA), 光参量产生(OPG))是获得此种光源的主要方法, 其中非线性光学晶体是实现参量变换的关键元件, 它的光学特性直接影响输出参量光的性质. 以往最常用的是 BBO, LBO, KTP 等晶体^[1-6], 但许多不利性质影响了它们各自的应用, 如 LBO, BBO 轻微潮解并难于生长, KTP 的光损伤阈值较低等, 这驱使着人们继续寻找综合性能优异的新型非线性光学晶体. 最近, 一种新型的性能非常优异的硼酸盐 BiB_3O_6 (BIBO) 在国际上引起了极大关注. 虽然早在 1962 年就发现了 BIBO 化合物的相图^[7], 但是直到 1999 年才首次生长出光学级的 BIBO 晶体^[8], 因此对该材料在非线性光学应用中的研究尚不完善. BIBO 晶体属于对称性较低的单斜晶系, 是光学双轴晶, 它兼备了 BBO, LBO, KTP 的优良特性, 既具有宽的透光范围(270—2700 nm), 又具有很高的光损伤阈值(可与高光学质量的 LBO 相媲美), 而且有效非线性系数很大(最大 3.7 pm/V), 比 BBO, LBO, 甚至 KTP(最大 2.7 pm/V) 都高, 这尤其适合于紫外到近红外光区高功率的频率转换^[9-12]. 另外, BIBO 晶体

物理化学性能稳定, 不潮解, 容易生长, 而且双折射率差较大, 有较大的接收角宽度和光谱宽度, 灵活的相位匹配方式等^[13,14]. 结合 BIBO 晶体这些优良的性质, 其不仅可用作高效的倍频、和频器件^[11-15], 而且在高效的光参量技术领域具有一定的应用前景^[16-19]. 以往的报道已对 BIBO 晶体光学主平面内的倍频特性进行了全面的计算和分析^[13,14], 但对 BIBO 晶体光学主平面内参量特性的计算和分析却鲜有报道, 这限制了该材料在非线性频率变换中更广泛的应用. 因此本文对基于 BIBO 晶体的飞秒光参量变换过程的参量特性进行了计算和分析, 从而为利用基于 BIBO 晶体的飞秒光参量技术获得高能量、宽调谐、窄脉宽的光源提供理论依据和实验指导.

2. 光学主平面内的相位匹配条件和有效非线性系数

在光学坐标系 xyz 下, 由 Sellmeier 方程可知 BIBO 晶体的三个主折射率为^[10,14]

$$n_x^2 = 3.07403 + 0.03231/(\lambda^2 - 0.03163) - 0.013376\lambda^2, \quad (1)$$

$$n_y^2 = 3.16853 + 0.03731/(\lambda^2 - 0.03463) - 0.017508\lambda^2, \quad (2)$$

$$n_z^2 = 3.65454 + 0.05112/(\lambda^2 - 0.03713) - 0.02261\lambda^2, \quad (3)$$

^{*} 天津大学青年教师基金(批准号:5110133)资助的课题.

[†] E-mail: majing@tju.edu.cn

对于共线相位匹配,三波相互作用满足能量守恒和动量守恒条件,整理得

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (4)$$

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i}, \quad (5)$$

式中 $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 和 n_p, n_s, n_i 分别为抽运光、信号光、闲频光的波长和在晶体中的折射率. 仿照单轴晶, 仍然设入射光偏振方向垂直于主平面的为 o 光, 而偏振方向平行于主平面的为 e 光. 并设 θ 为入射光波矢与 z 轴之间的夹角, ϕ 为该波矢在 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角. 由于单斜晶的低对称性, BIBO 在不同的光学主平面内能够提供不同的相位匹配类型.

当入射光波矢在 BIBO 晶体的 xz 主平面内时, 有 $\phi = 0$, o 光和 e 光的折射率分别为

$$n_o = n_y, \quad (6)$$

$$n_e = n_x n_z / \sqrt{n_x^2 \sin^2 \theta + n_z^2 \cos^2 \theta}, \quad (7)$$

此时可满足三种相位匹配类型.

1) BIBO 具有负晶性, 满足 I 类相位匹配方式 $o + o \rightarrow e$, 即信号光和闲频光为寻常光, 抽运光为非常光. 由 (6) 和 (7) 式可知与三波相应的折射率分别为

$$n_s = n_y(\lambda_s), \quad (8)$$

$$n_i = n_y(\lambda_i), \quad (9)$$

$$n_p = n_x(\lambda_p) n_z(\lambda_p) / \sqrt{n_x^2(\lambda_p) \sin^2 \theta + n_z^2(\lambda_p) \cos^2 \theta}, \quad (10)$$

由 (10) 式可得相位匹配角

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{n_z(\lambda_p)}{n_p} \frac{\sqrt{n_p^2 - n_x^2(\lambda_p)}}{\sqrt{n_z^2(\lambda_p) - n_x^2(\lambda_p)}} \right], \quad (11)$$

式中 n_p 由 (5), (8), (9) 式整理得 $n_p = \left[\frac{n_y(\lambda_s)}{\lambda_s} + \frac{n_y(\lambda_i)}{\lambda_i} \right] \lambda_p$. 相应的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = d'_{122} \cos \theta$, $d'_{122} = 2.93 \text{ pm/V}^{[14]}$. 由 (1) — (4) 式和 (11) 式可得 BIBO 晶体 xz 主平面内的 I 类相位匹配 ($o + o \rightarrow e$) 调谐曲线. 当 KLM 钛宝石激光器的基频光为抽运光时, 波长调谐范围为 750—950 nm^[14,16], 三波在 xz 主平面内均可实现 I 类相位匹配 ($o + o \rightarrow e$), 但 KLM 钛宝石激光器的倍频光为抽运光时, 不能满足该类型的相位匹配条件. 如图 1 中抽运光波长为典型的 800 nm, 实线和虚线分别表示信号光和闲频光的波长随相位匹配角的变化, 点

划线表示有效非线性系数的大小随相位匹配角的变化.

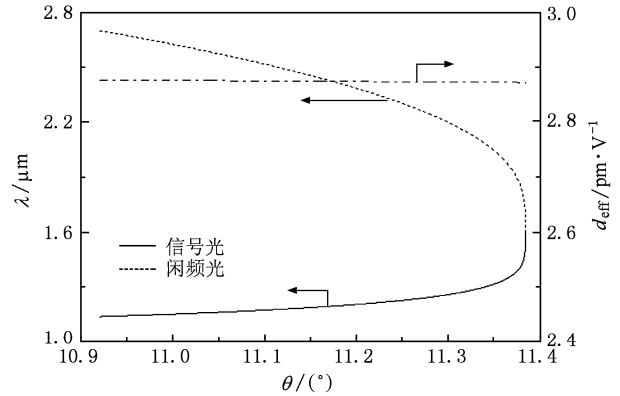


图 1 800 nm 红光抽运的 xz 面内 I 类相位匹配 ($o + o \rightarrow e$) 调谐曲线和 d_{eff} 的大小

由图 1 可知, 当相位匹配角 θ 为小角度范围 10.92° — 11.38° 时, 可以实现波长范围为 1137—2700 nm 的参量光输出. 而且在整个调谐范围内有效非线性系数都很大, 约为 2.88 pm/V . 当 θ 为 11.38° 时, 可实现 1400—1900 nm 近 500 nm 的宽带参量光输出. 在 BIBO 晶体的 xz 主平面内, 对于负晶性的 II 类相位匹配方式 $o + e \rightarrow e$ 或 $e + o \rightarrow e$ 不能实现.

2) BIBO 具有正晶性, 满足 I 类相位匹配方式 $e + e \rightarrow o$, 仿照前面的推导, 可得在该方式下相位匹配角的数值解. 相应的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = d'_{213} \sin 2\theta$, $d'_{213} = 1.67 \text{ pm/V}^{[14]}$. 图 2 为 BIBO 晶体 xz 主平面内的 I 类相位匹配 ($e + e \rightarrow o$) 调谐曲线和有效非线性系数的大小, 图 2(a) 和 (b) 中抽运光波长分别为 800 和 400 nm. 由图 2(a) 可知, 800 nm 红光抽运时, 在整个参量光调谐范围内相位匹配角 θ 变化不超过 0.1° , 可实现超宽带的参量光输出, 但是有效非线性系数比图 1 所示方式要小得多, 最大值约为 1.57 pm/V . 而图 2(b) 所示 400 nm 蓝光抽运时, 当相位匹配角 θ 为 41.6° — 51.4° 时, 可以实现波长范围为 470—2700 nm 的参量光输出, 有效非线性系数的大小介于 1.63 — 1.67 pm/V 之间.

3) 满足正晶性的 II 类相位匹配方式 $o + e \rightarrow o$ 或 $e + o \rightarrow o$, 可得相位匹配角的解析解. 相应的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = d'_{212} \cos \theta$, $d'_{212} = 3.48 \text{ pm/V}^{[14]}$. 当抽运光为 KLM 钛宝石激光器的基频光和倍频光

时,在 xz 主平面内均可实现该类型的相位匹配. 以 $e + o \rightarrow o$ 为例,当抽运光波长分别为 800 和 400 nm

时,其相位匹配调谐曲线和有效非线性系数的大小如图 3 所示.

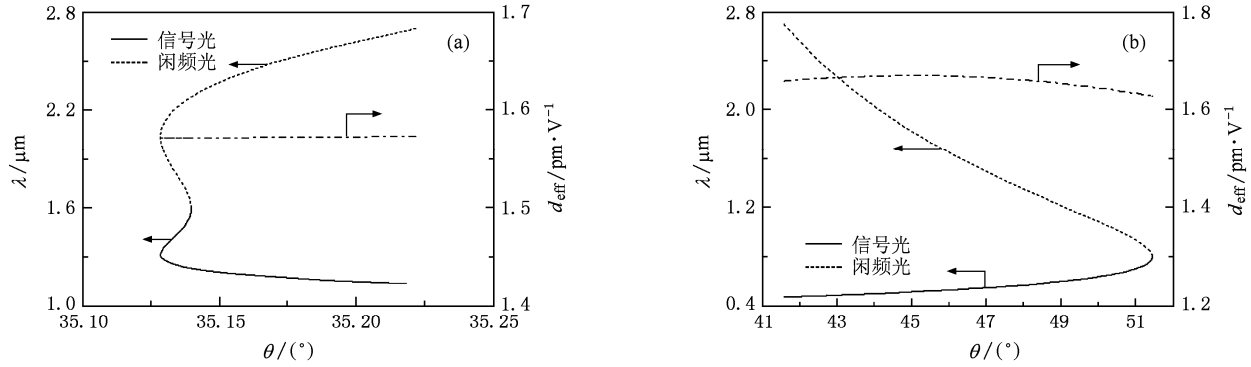


图2 xz 面内 I 类相位匹配 ($e + e \rightarrow o$) 调谐曲线和 d_{eff} 的大小 (a) 800 nm 红光抽运, (b) 400 nm 蓝光抽运

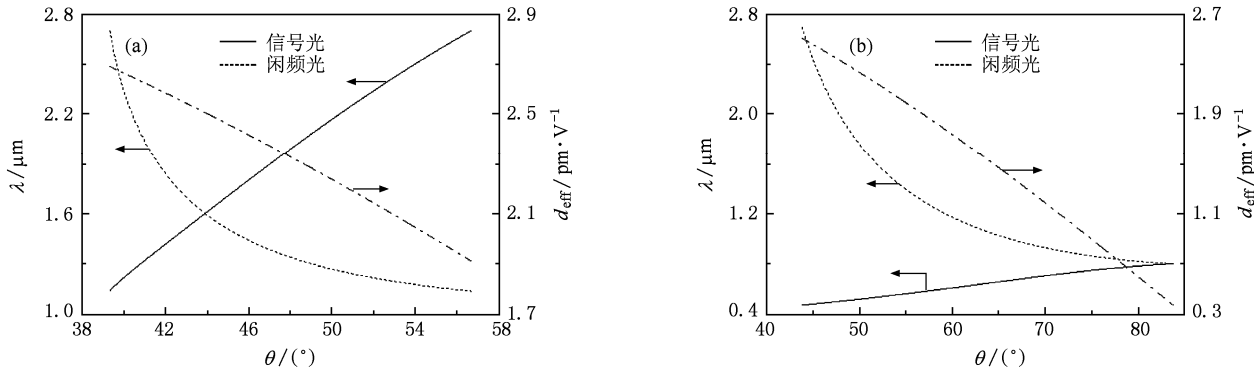


图3 xz 面内 II 类相位匹配 ($e + o \rightarrow o$) 调谐曲线和 d_{eff} 的大小 (a) 800 nm 红光抽运, (b) 400 nm 蓝光抽运

由图 3(a) 可知, 800 nm 红光抽运时, 在调谐范围内相位匹配角约为 39.4° — 56.7° 大角度范围, 不能实现宽带匹配, 而且有效非线性系数的大小为 1.9 — 2.7 pm/V, 仍然比图 1 所示的要小. 简并点处相位匹配角约为 44° , 39.4° — 44° 和 44° — 56.7° 调谐时所覆盖的波段相同, 只是同一波长的参量光偏振方向相互垂直, 而且前者调谐角度变化比后者要小, 要求精度较高, 同时前者有效非线性系数较大, 约 2.7 — 2.5 pm/V, 而后者仅为 2.5 — 1.9 pm/V. 由图 3(b) 可知, 400 nm 蓝光抽运时, 相位匹配角变化范围很大, 跨度约 40° , 参量光波长相对调谐角度变化不敏感, 而且有效非线性系数随相位匹配角变化较大, 约为 0.4 — 2.5 pm/V.

当入射光波矢在 BIBO 晶体的 yz 主平面内时, 有 $\varphi = 90^\circ$, o 光和 e 光的折射率分别为 $n_o = n_x$ 和 $n_e = n_y n_z / \sqrt{n_y^2 \sin^2 \theta + n_z^2 \cos^2 \theta}$. 只满足正晶性的 I 类相

位匹配方式 $e + e \rightarrow o$, 可得相位匹配角的数值解. 相应的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = -d'_{122} \cos^2 \theta - d'_{133} \sin^2 \theta + d'_{123} \sin 2\theta$, $d'_{122} = 2.93$ pm/V, $d'_{133} = -1.93$ pm/V, $d'_{123} = 1.63$ pm/V^[14]. 图 4 为 400 nm 蓝光抽运的 I 类相位匹配 ($e + e \rightarrow o$) 调谐曲线和有效非线性系数的大小. 800 nm 红光抽运时不能产生参量输出.

由图 4(a), (b) 可知, 400 nm 蓝光抽运时, 对于 θ 和 $180^\circ - \theta$ 两种情况相位匹配条件均满足, 只是有效非线性系数大小不同. 为了区分这些相位匹配方向, 加工晶体的具体方法参见文献[20]. 当相位匹配角为钝角时, 在整个调谐范围内有效非线性系数都很大, 约 3.18 — 3.43 pm/V, 而相位匹配角为锐角时仅为 0.4 — 2.5 pm/V. 因此该平面下钝角调谐对非线性频率变换的应用非常重要. 在 yz 面内由于 II 类相位匹配方式下有效非线性系数为零, 所以不能产生参量输出.

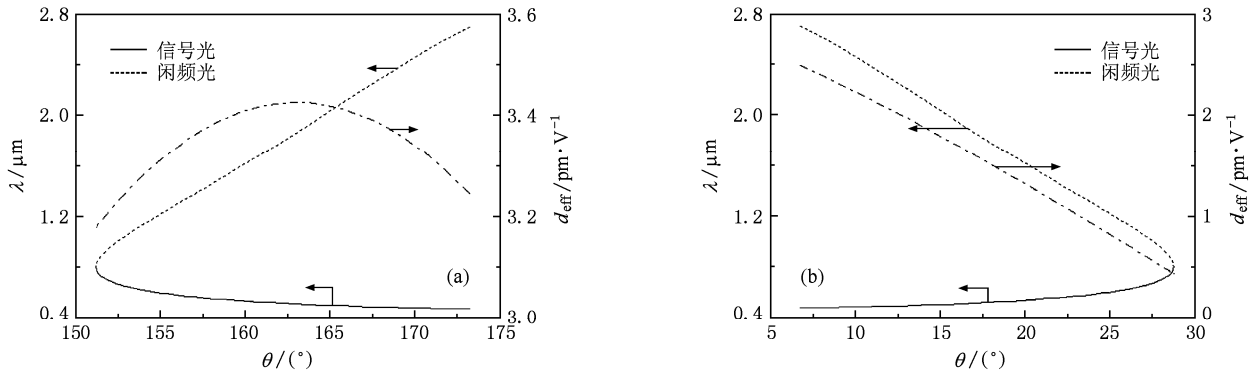


图4 400 nm 蓝光抽运的 yz 面内 I 类相位匹配 ($e + e \rightarrow o$) 调谐曲线和 d_{eff} 的大小 (a) 调谐角为钝角, (b) 调谐角为锐角

当入射光波矢在 BIBO 晶体的 xy 主平面内时, 有 $\theta = 90^\circ$, o 光和 e 光的折射率分别为 $n_o = n_z$ 和 $n_e = n_x n_y / \sqrt{n_x^2 \cos^2 \varphi + n_y^2 \sin^2 \varphi}$. 若设信号光波长小于闲频光波长, 则满足负晶性的 II 类相位匹配方式 $e + o \rightarrow e$, 可得相位匹配角的数值解. 相应的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = d'_{123} \sin 2\varphi$, $d'_{123} = 1.63 \text{ pm/V}^{[14]}$. 当 KLM 钛宝石激光器的基频光抽运时无法实现参量变换, 而倍频光 (375—435 nm)^[14,17] 抽运时可实现参量变换, 但抽运光波长大于 397 nm 时, 调谐曲线没有简并点, 如图 5 所示, 抽运光波长为 400 nm, 仅能实现信号光波长约 591.4—788.3 nm, 闲频光波长约 812—1236 nm 的参量光输出. 有效非线性系数的大小为 0.06—1.63 pm/V. 在 BIBO 晶体的 xy 主平面内无法实现其他类型的相位匹配.

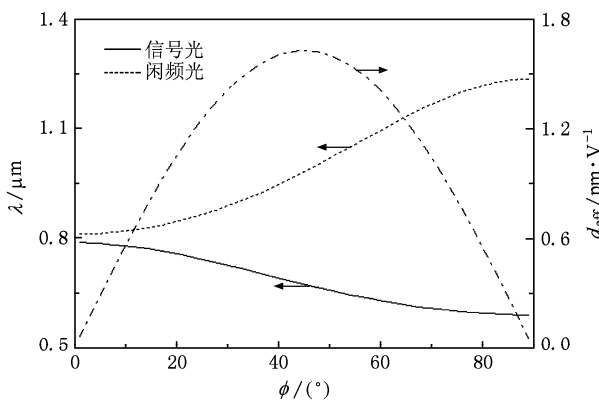


图5 400 nm 蓝光抽运的 xy 面内 II 类相位匹配 ($e + o \rightarrow e$) 调谐曲线和 d_{eff} 的大小

综上所述, 对基于 BIBO 晶体的参量变换过程, 有多种相位匹配方式, 抽运光波长不同, 最佳的光学主平面及相位匹配方式就不同. 由图 1, 图 2(a),

图 3(a) 比较可知, 当 KLM 钛宝石激光器的基频光抽运时, 应该选用 xz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $o + o \rightarrow e$, 如图 1 所示, 不仅能实现宽带调谐, 而且在整个调谐范围内有效非线性系数都很大, 约为 2.9 pm/V. 如文献[16]报道, 利用 KLM 钛宝石激光器 840 nm 的基频光同步抽运上述相位匹配类型的 BIBO OPO, 晶体长 1.5 mm, 切割角为 11.4° , 得到 1200—1600 nm 参量光连续调谐输出, 平均输出功率为 90 mW. 由图 2(b)、图 3(b)、图 4 和图 5 比较可知, 当 KLM 钛宝石激光器的倍频光抽运时, 应该选用 yz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $e + e \rightarrow o$, 且相位匹配角为钝角, 如图 4(a) 所示, 在整个调谐范围内有效非线性系数都很大, 约为 3.2—3.4 pm/V. 如文献[17]报道, 利用 KLM 钛宝石激光器的倍频蓝光 415 nm 同步抽运上述相位匹配类型的 BIBO OPO, 晶体厚 500 μm , 切割角约 159° , 当 θ 在 175° — 154° 之间变化时, 得到 480—710 nm 绿黄橙红参量光连续调谐输出, 最大平均输出功率达 270 mW, 填补了利用其他 OPO 难以获得的 500—700 nm 波段的空白. 因此, 对于 BIBO 晶体来说, xz 和 yz 这两个主平面很重要, 在这两个主平面内利用 I 类相位匹配方式可实现高效的参量变换. 下面仅对 BIBO 晶体的 xz 和 yz 主平面内 I 类相位匹配方式下的其他特性进行计算和分析.

3. 时间走离和空间走离

对于飞秒光参量变换来说, 相互作用脉冲宽度均为飞秒量级 (10^{-15} s), 又由于不同波长的脉冲群速度不同, 因此三波脉冲在时域上很容易分离, 即存

在时间走离,它是影响飞秒 OPO 参量增益和带宽的重要因素,通常用群速失配(GVM)来描述. 抽运光与信号光之间的群速失配为 $GVM_{ps} = u_p^{-1} - u_s^{-1}$, 信号光与闲频光之间的群速失配为 $GVM_{si} = u_s^{-1} - u_i^{-1}$, 式中 u_p, u_s, u_i 分别为抽运光、信号光、闲频光在晶体中的群速度. GVM_{ps} 和 GVM_{si} 直接影响参量光的增益和带宽.

此外,空间走离效应也是影响参量增益的重要因素. 对于 xz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $o + o \rightarrow e$, 参量光的空间走离角为 0° , 而抽运光的空间走离角为

$$\rho = \tan^{-1} \left\{ \frac{[n_z^2(\lambda_p) - n_x^2(\lambda_p)] \sin 2\theta}{2[n_x^2(\lambda_p) \sin^2 \theta + n_z^2(\lambda_p) \cos^2 \theta]} \right\}, \quad (12)$$

由于空间走离角的存在,在传播过程中抽运光波印廷矢量与参量光波印廷矢量之间逐渐分离,从而使三波相互作用长度减小,导致参量增益下降.

在 BIBO 晶体的 xz 和 yz 两个主平面内,当分别满足 I 类相位匹配方式 $o + o \rightarrow e$ 和 $e + e \rightarrow o$ 时,

GVM_{ps} 和 GVM_{si} 随信号光波长的变化如图 6 中的实线和虚线所示. 由图 6(a) 可知当抽运光为 800 nm 红光时, GVM_{ps} 很小,在 $-12 \sim -11$ fs/mm 之间,若抽运光脉宽 τ 为 150 fs^[16], 时间走离长度为 τ/GVM_{ps} , 则晶体长度要小于时间走离长度,最大可取 12.5 mm. GVM_{si} 也不大,负值最大约 -32 fs/mm,在简并点处为 0. 而图 6(b) 所示,当抽运光为 400 nm 蓝光时, GVM_{ps} 和 GVM_{si} 都很大,分别为 92—428 fs/mm 和小于 485 fs/mm,如果抽运光脉宽为 220 fs^[17], 晶体长度一般不超过 500 μm .

图 6(a) 和 (b) 中的点划线分别为抽运光和信号光的空间走离角. 800 nm 抽运光的走离角很小,约为 1.8° , 空间走离效应不显著,若抽运光光斑半径为 500 μm , 则空间走离长度约为 32 mm, 400 nm 蓝光抽运时,信号光的空间走离角约为 $1^\circ \sim 3.4^\circ$, 空间走离长度约为 57—17 mm^[21]. 一般在飞秒光参量变换中空间走离长度远大于时间走离长度,因此晶体的长度通常都由时间走离长度决定.

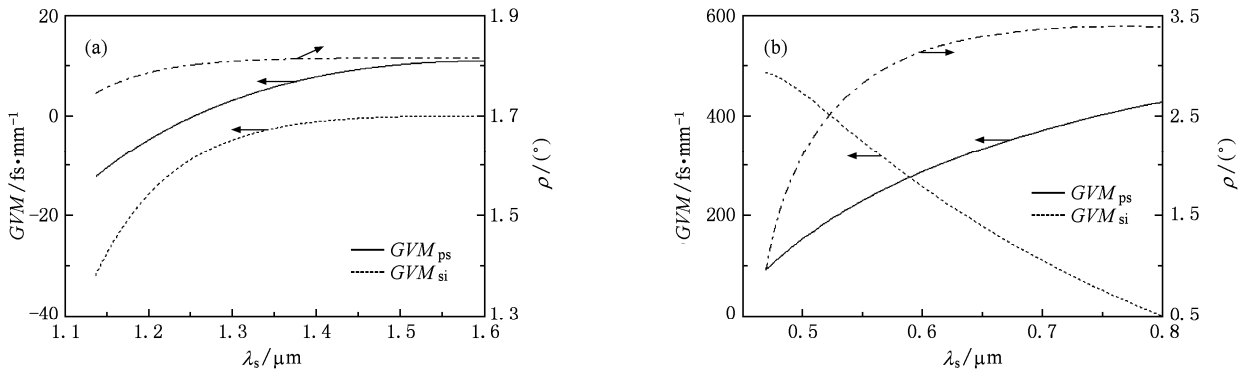


图 6 三波的 GVM 和空间走离角 ρ 的大小 (a) xz 面内, (b) yz 面内

4. 参量增益和带宽

在慢变振幅近似下,由三波非线性耦合方程可得参量光的增益为^[22,23]

$$G = 1 + (g_0 L)^2 (\sinh B / B)^2, \quad (13)$$

式中 $g_0 = 4\pi d_{\text{eff}} (I_p / 2\epsilon_0 n_p n_s n_i c \lambda_s \lambda_i)^{1/2}$, $B = [(g_0 L)^2 - (\Delta k L / 2)^2]^{1/2}$, $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 为相位失配, I_p 为抽运光强度, ϵ_0 为真空介电常数, L 为晶体长度,其余参数同上文所示. 参量带宽是有可能实现的最大增益带宽,在共线相位匹配条件下,由允许的相位失配给出的信号光参量带宽的显式为^[24]

$$\Delta\lambda_s = \begin{cases} \frac{\lambda_s^2}{cL |GVM_{si}|} & GVM_{si} \neq 0 \\ \frac{0.8\lambda_s^2}{c |L| g_s + g_i|} & GVM_{si} = 0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中 g_s 和 g_i 为信号光和闲频光在晶体中的群速度色散.

在 BIBO 晶体的 xz 和 yz 两个主平面内,当分别满足 I 类相位匹配 $o + o \rightarrow e$ 和 $e + e \rightarrow o$ 时,信号光的参量增益和带宽如图 7 所示.

图 7(a) 中晶体长度为 10 mm, 细实线表示抽运光强度为 1 GW/cm^2 时,信号光的增益随中心波长的变化范围为 $10^{2.7} \sim 10^3$, 简并点处增益最大. 点划

线、长虚线和短虚线表示信号光中心波长为 1.2 μm , 抽运光强度分别为 0.3, 1 和 2 GW/cm^2 时信号光的增益谱, 可见信号光的增益随 I_p 的增大而迅速增大, 而且增益越大, 增益带宽越宽, 脉宽可以压缩得越窄, 没有增益窄化的问题. 图 7(b) 中晶体长度

为 500 μm , 与图 7(a) 类似, 细实线表示抽运光强度为 10 GW/cm^2 时, 信号光的增益随中心波长的变化范围为 2.5—4.6, 点划线、长虚线和短虚线表示信号光中心波长为 600 nm, 抽运光强度分别为 3, 10 和 20 GW/cm^2 时信号光的增益谱.

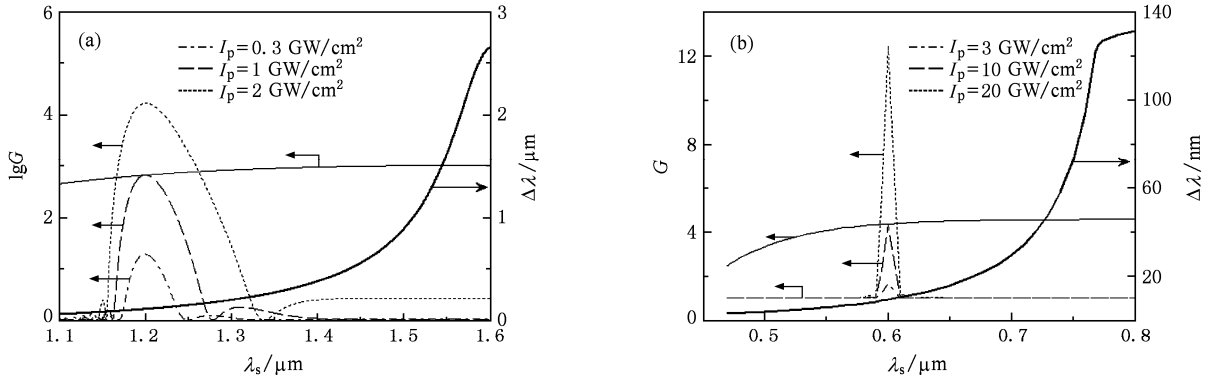


图 7 信号光的参量增益和带宽 (a) xz 面内, (b) yz 面内

图 7 中粗实线为信号光的参量带宽随中心波长的变化, 均在简并点处最宽, 但是 (a) 中最大值为 2.65 μm , (b) 中最大值仅为 133 nm. 导致图 7 (b) 参量增益和带宽都比 (a) 小的主要原因是由于在可见光区三波的 GVM 很大, 如图 6(b) 所示, 这将严重影响参量光的增益和带宽, 因此, 在该情况下需要进行 GVM 的补偿才能获得高增益、宽调谐、窄脉宽的参量光输出^[25].

5. 结 论

本文对基于新型晶体 BIBO 的飞秒光参量变换过程的参量特性进行了研究. 计算了 BIBO 晶体三个光学主平面内的相位匹配条件和有效非线性系

数, 确定了抽运光为 KLM 钛宝石激光器的基频光和倍频光时最佳的光学主平面及相位匹配方式, 分别为 xz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $o + o \rightarrow e$ 和 yz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $e + e \rightarrow o$, 并给出了这两个主平面内三波的 GVM 和空间走离角, 以及信号光的参量增益和带宽随信号光中心波长的变化. 对于 800 nm 红光抽运的 xz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $o + o \rightarrow e$, 不仅能实现宽带调谐, 而且参量增益和带宽都很大. 而对于 400 nm 蓝光抽运的 yz 主平面内的 I 类相位匹配方式 $e + e \rightarrow o$, 取调谐角为钝角时有效非线性系数很大, 虽然三波的 GVM 较严重, 但如果进行适当的补偿将减小或消除 GVM 的不利影响, 而且该方式下可以弥补利用其他 OPO 难以获得的 500—700 nm 波段的空白.

- [1] Ma J, Zhang R B, Liu B, Zhu C, Chai L, Zhang W L, Zhang Z G, Wang Q Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3675 (in Chinese) [马晶、章若冰、刘博、朱晨、柴路、张伟力、张志刚、王清月 2005 物理学报 **54** 3675]
- [2] Ma J, Zhang R B, Liu B, Zhu C, Zhang W L, Zhang Z G, Wang Q Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4765 (in Chinese) [马晶、章若冰、刘博、朱晨、张伟力、张志刚、王清月 2005 物理学报 **54** 4765]
- [3] Hou M N, Liu H J, Zhao W, Wang Y S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5872 (in Chinese) [侯米娜、刘红军、赵卫、王屹山 2007 物理学报 **56** 5872]

- [4] Liu H, Gong M L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5443 (in Chinese) [刘欢、巩马理 2009 物理学报 **58** 5443]
- [5] Lu Y F, Xie S Y, Bo Y, Cui Q J, Zong N, Gao H W, Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 970 (in Chinese) [鲁远甫、谢仕永、薄勇、崔前进、宗楠、高宏伟、彭钦军、崔大复、许祖彦 2009 物理学报 **58** 970]
- [6] Cui Q J, Xu Y T, Zong N, Lu Y F, Cheng X K, Peng Q J, Bo Y, Cui D F, Xu Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1715 (in Chinese) [崔前进、徐一汀、宗楠、鲁远甫、程贤坤、彭钦军、薄勇、崔大复、许祖彦 2009 物理学报 **58** 1715]
- [7] Levin E M, McDaniel C L 1962 *J. Am. Ceram. Soc.* **45** 355

- [8] Becker P, Liebertz J, Bohaty L 1999 *J. Cryst. Growth* **203** 149
- [9] Hellwig H, Liebertz J, Bohaty L 1999 *Solid State Commun.* **109** 249
- [10] Hellwig H, Liebertz J, Bohaty L 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 240
- [11] Czeranowsky C, Heumann E, Huber G 2003 *Opt. Lett.* **28** 432
- [12] Ghotbi M, Ebrahim-Zadeh M 2005 *Opt. Lett.* **30** 3395
- [13] Wang Z P, Teng B, Du C L, Xu X G, Fu K, Xu G B, Wang J Y, Shao Z S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2176 (in Chinese) [王正平、滕冰、杜晨林、许心光、傅琨、许贵宝、王继扬、邵宗书 2003 物理学报 **52** 2176]
- [14] Ghotbi M, Ebrahim-Zadeh M 2004 *Opt. Express* **12** 6002
- [15] Liu T H, Tan H M, Gao L L, Wang B S, Miao J G 2007 *Acta Photonica Sinica* **36** 1195 (in Chinese) [刘天红、檀慧明、高兰兰、王宝山、苗杰光 2007 光子学报 **36** 1195]
- [16] Ghotbi M, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M 2007 In: *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest Series (CD)*, Optical Society of America, 2007 JWA31
- [17] Ghotbi M, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3128
- [18] Gaydardzhiev A, Nikolov I, Buchvarov I, Petrov V, Noack F 2008 *Opt. Express* **16** 2363
- [19] Ghotbi M, Beutler M, Petrov V, Gaydardzhiev A, Noack F 2009 *Opt. Lett.* **34** 689
- [20] Wang Z P, Teng B, Xu X G, Song R B, Fu K, Du C L, Wang J Y, Liu Y G, Shao Z S 2001 *Journal of Functional Materials special issue* 1920 (in Chinese) [王正平、滕冰、许心光、宋仁波、傅琨、杜晨林、王继扬、刘耀岗、邵宗书 2001 功能材料 增刊 1920]
- [21] Ma J, Zhang R B, Zhang W L, Wang Q Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2745 (in Chinese) [马晶、章若冰、张伟力、王清月 2005 物理学报 **54** 2745]
- [22] Ross I N, Matousek P, Towrie M, Langley A J, Collier J L 1997 *Opt. Commun.* **144** 125
- [23] Xia J F, Wei Z Y, Zhang J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 256 (in Chinese) [夏江帆、魏志义、张杰 2000 物理学报 **49** 256]
- [24] Liu H J, Chen G F, Zhao W, Wang Y S 2000 *Chin. J. Lasers* **8** 680 (in Chinese) [刘红军、陈国夫、赵卫、王屹山 2002 中国激光 **8** 680]
- [25] Ma J, Zhang R B, Zhang W L, Wang Q Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 755 (in Chinese) [马晶、章若冰、张伟力、王清月 2005 物理学报 **54** 755]

Femtosecond optical parametric conversion properties based on the BiB_3O_6^*

Ma Jing[†] Liu Ying Zhang Li-Jun

(Department of Physics, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 12 December 2009; revised manuscript received 4 May 2010)

Abstract

Parametric properties in femtosecond optical parametric conversion process based on the new nonlinear crystal BiB_3O_6 (BIBO) are studied. The phase-matching conditions and effective nonlinear coefficients in the three principal optical planes of the BIBO crystal are calculated, optimum principal optical planes and phase-matching types are determined when using the fundamental frequency and the frequency doubling of the KLM Ti:sapphire laser as pump respectively, and temporal walk-off and spatial walk-off of three waves, and signal parametric gain and bandwidth are analyzed. We thereby provided a theoretical basis and experimental guide for obtaining the light source with high energy, wide tuning range, and short duration with femtosecond optical parametric technology based on the BIBO.

Keywords: BiB_3O_6 , optical parametric conversion, collinear phase-matching, principal optical plane

PACS: 42.65.Ky, 42.65.Yj, 42.65.Re, 42.65.-k

* Project supported by the Foundation for Young Teachers of Tianjin University, China (Grant No. 5110133).

[†] E-mail: majing@tju.edu.cn