

BBO I 类相位匹配非共线参量产生中的群速自匹配^{*}

马 晶 章若冰[†] 刘 博 朱 晨 张伟力 张志刚 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

(2004 年 9 月 8 日收到, 2005 年 3 月 24 日收到修改稿)

利用重复频率为 1kHz 的钛宝石激光的倍频蓝光抽运 I 类相位匹配的偏硼酸钡(BBO)晶体, 获得了可见光区的非共线参量超荧光. 给出了最强光强处参量超荧光的非共线角, 波长随相位匹配角的变化. 理论计算了在参量超荧光中三波的群速失配随非共线角和相位匹配角的变化规律. 结果表明, I 类非共线相位匹配的参量超荧光关于抽运光中心对称, 并且沿光强最强的参量超荧光方向三波的群速失配最小, 有效相互作用长度最大, 即参量超荧光的强度角分布是三波的相速和群速自匹配的结果. 该理论和实验研究为减小飞秒光参量放大中三波的群速失配提供了一个理想的几何模型, 为获得高增益、窄脉冲宽度的参量光输出提供了理论依据和实验验证.

关键词: 群速自匹配, 参量超荧光, 非共线相位匹配, 飞秒光参量放大

PACC: 4265K, 4280, 4280W

1. 引言

飞秒光参量相互作用是获得高增益、窄脉宽、宽调谐飞秒脉冲的一个重要方法, 它在许多领域都得到了广泛应用^[1-4]. 在飞秒光参量相互作用中, 如果没有信号光注入, 非线性晶体中的量子噪声将作为信号光, 与抽运光进行参量反应, 同时产生闲频光. 由于量子噪声的无规性, 所以在各个方向满足相位匹配条件的量子噪声均会得到参量放大, 放大的量子噪声通常被称为参量超荧光^[5-7]. 1995 年, Trapani 等人曾利用放大的染料激光器输出的重复频率为 30Hz, 中心波长为 600nm 的光脉冲抽运 II 类相位匹配的偏硼酸钡(BBO)晶体, 研究了其参量超荧光的特性^[8]. 但是, 由于 II 类相位匹配的 BBO 晶体有效非线性系数小于 I 类, 转换效率较低, 因此 I 类相位匹配较为常用. 而且很多非线性光学和超快时间分辨光谱研究需要有高重复率(提高信噪比), 窄脉冲宽度(提高时间分辨力), 可见光区的可调谐光源. 因此, 本文利用钛宝石啁啾脉冲放大器倍频输出的重复频率为 1kHz, 中心波长为 405nm, 脉冲宽度为

100fs, 单脉冲能量为 50 μ J 的蓝光抽运 I 类相位匹配的 BBO 晶体, 获得了可见光区的参量超荧光, 并对其产生的机制进行了理论计算和分析. 结果证明参量超荧光的强度角分布是三波的相速和群速自匹配的结果, 即沿光强最强的参量超荧光方向三波的群速失配最小. 而三波的群速失配恰恰是飞秒光参量放大(OPA)中降低参量增益、增宽脉冲宽度的最主要原因, 因此对参量超荧光强度角分布的研究为飞秒 OPA 中三波群速失配的补偿提供了一个理想的几何模型. 对于任意波长的信号光, 若按照参量超荧光光强最强的方向选择相应的非共线角和相位匹配角, 即可实现三波的群速失配最小, 从而得到高增益, 窄脉冲宽度的参量光输出.

2. 产生参量超荧光的实验装置和实验现象

图 1 为利用 I 类相位匹配的 BBO 晶体产生参量超荧光的实验装置. 入射光是由钛宝石九通啁啾脉冲放大器输出的重复频率为 1kHz, 中心波长为 810nm, 脉冲宽度为 90fs, 单脉冲能量为 200 μ J 的光

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号: G1999075201) 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20030056021) 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助的课题.

[†] 联系人, E-mail: zhangrb@tju.edu.cn.

脉冲.首先利用透镜 L_1 将光脉冲聚焦到厚 $100\mu\text{m}$ 的 BBO 晶体内,倍频产生中心波长为 405nm 脉冲宽度为 100fs 单脉冲能量为 $50\mu\text{J}$ 的蓝光.然后利用透镜 L_2 准直,并利用滤光片 F 滤掉 810nm 的基频光,透过 405nm 的倍频光.最后倍频蓝光由透镜 L_3 聚焦,垂直抽运到厚 1mm 的 BBO 晶体内,产生 I 类相位匹配的非共线参量超荧光.

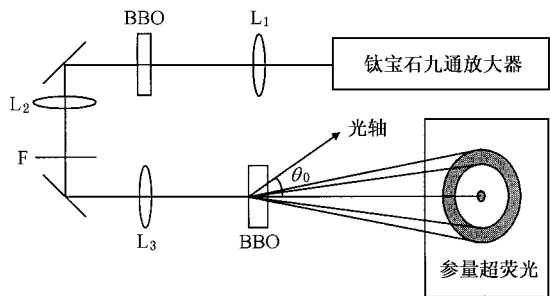


图 1 产生参量超荧光的实验装置

参量超荧光在空间上呈圆锥体分布.观测屏垂直抽运光的传播方向放置,因此在屏上看到的是关于抽运光中心对称的圆环,即参量超荧光光环,如图 2 照片所示.图中位于中心的亮斑为抽运光,关于它中心对称的光环即为观测到的信号光参量超荧光光环.



图 2 实验中获得参量超荧光光环

转动 BBO 晶体,即改变相位匹配角的大小,参量超荧光光环的直径就会随之变化,环中光强最强的参量超荧光波长也在变化,且参量超荧光的非共线角和波长均随着相位匹配角的增加而增加.当相位匹配角在 26.5° 到 40.5° 范围内变化时,参量超荧光非共线角的变化范围为 3.5° 到 14.8° (对应 BBO 晶体非共线角的变化范围为 2.2° 到 8.9°),而参量超荧光波长的变化范围为 471.2nm 到 733.3nm .参量超荧光的强度角分布和相应的光谱携带着各种信号光和闲频光波矢的参量放大信息.

3. 参量超荧光的强度角分布和相速、群速自匹配

图 3 为顺时针转动 BBO 晶体时产生参量超荧光的相位匹配矢量图.图中 θ 为抽运光波矢 k_p 与 BBO 晶体光轴之间的夹角,即相位匹配角. α 、 β 分别为信号光波矢 k_s ,闲频光波矢 k_i 与抽运光波矢 k_p 的夹角,即在 BBO 晶体内的非共线角.

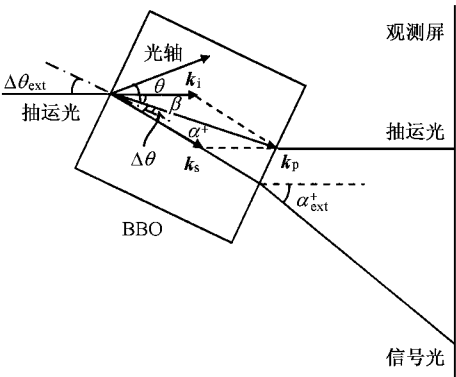


图 3 产生参量超荧光的相位匹配矢量图

三波满足能量守恒和动量守恒的条件,即

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \tag{1}$$

$$k_p = k_s \cos \alpha + k_i \cos \beta, \tag{2}$$

$$k_s \sin \alpha = k_i \sin \beta. \tag{3}$$

由群速失配 Δv_x^{-1} 和时间走离长度 L_x 的定义,有

$$\Delta v_x^{-1} = \nu_{xp}^{-1} - \nu_p^{-1}, \tag{4}$$

$$L_x = \tau \Delta v_x. \tag{5}$$

式中 $x = s, i$, 分别表示信号光和闲频光. ν_p 为抽运光的群速度. ν_{xp} 为信号光或闲频光在抽运光波矢方向的群速度分量. τ 为抽运光的脉冲宽度.为了使三波在传播过程中不完全分开,参量过程仍能继续,应取时间走离长度 L 为信号光和闲频光与抽运光之间的时间走离长度 L_s 和 L_i 之中最小的一个,即

$$L = \min\{|L_s|, |L_i|\}, \tag{6}$$

如果已知相位匹配角 θ ,由 (1) 式至 (6) 式即可算出三波群速失配最小时所对应的非共线角 α ,信号光波长 λ_s 以及时间走离长度 L 的大小.

为了验证参量超荧光的产生是三波的相速和群速自匹配的结果,我们将实验测得的信号光非共线角与理论计算的值相比较.在实验中,令抽运光右侧的晶体内外非共线角分别为 α^+ , α_{ext}^+ ,左侧分别为

α^- , α_{ext}^- , 并且 α^+ 为正, α^- 为负(图 3 仅以右侧为例). 由图 3 可知, 当转动 BBO 晶体时, 满足以下关系

$$\alpha^+ = \arcsin[\sin(\alpha_{\text{ext}}^+ - \Delta\theta_{\text{ext}})n_s] + \Delta\theta, \quad (7)$$

$$\alpha^- = -\arcsin[\sin(\alpha_{\text{ext}}^- + \Delta\theta_{\text{ext}})n_s] + \Delta\theta, \quad (8)$$

$$\Delta\theta = \arcsin(\sin\Delta\theta_{\text{ext}}/n_p), \quad (9)$$

式中 n_s, n_p 分别为信号光和抽运光在 BBO 晶体中的折射率. $\Delta\theta_{\text{ext}}$ 为 BBO 晶体转动的角度, 且顺时针转动 BBO 晶体时 $\Delta\theta_{\text{ext}}$ 为正, 逆时针转动 BBO 晶体时 $\Delta\theta_{\text{ext}}$ 为负. $\Delta\theta$ 为转动 BBO 晶体时相位匹配角 θ 相对于晶体切割角 θ_0 (见图 1) 转动的角度. 各角如图 3 所示. 因此, 无论顺时针、逆时针转动 BBO 晶体, 利用 (7) 式至 (9) 式及实验测得的 $\alpha_{\text{ext}}^+, \alpha_{\text{ext}}^-$ 即可确定相应的 α^+, α^- , 从而和理论计算的非共线角 α 相比较.

4. 结果分析

图 4 为参量超荧光环对应的非共线角 α 随相位匹配角 θ 的变化曲线. 图中实点为实验值, 实线为利用上一节所述的理论模型计算的理论值. 由图可知, 实验值和理论值对应得很好, 二者差值在 $\pm 0.3^\circ$ 以内. 这说明了参量超荧光的产生确实是相速和群速自匹配的结果. 当转动 BBO 晶体时, 参量超荧光的非共线角随着相位匹配角的增加而增加, 而且关于抽运光中心对称. 但是由于空间走离效应的影响, 一般选取信号光的方向为远离 BBO 晶体光轴的方向, 如图 3 所示.

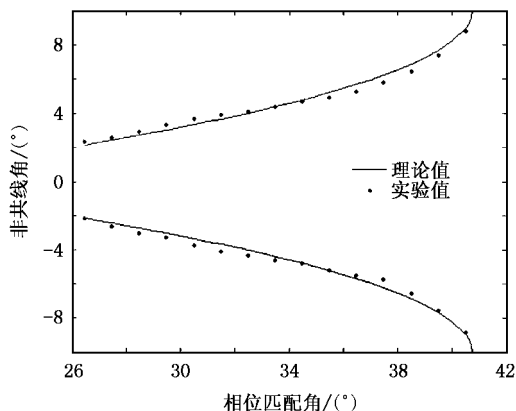


图 4 参量超荧光的非共线角随相位匹配角的变化

另外, 由图 4 可知, I 类相位匹配的非共线角并没有象 II 类相位匹配的非共线角随着相位匹配角的

减小而退化为一[8]. 正如实验所观察到的那样, I 类相位匹配参量超荧光光环的直径随相位匹配角的减小逐渐减小, 当减小到一定时, 光环消失, 而并没有缩小到一点(对应共线结构). 因此, 在 BBO I 类相位匹配条件下, 为减小群速失配, 应采用非共线结构.

图 5 为参量超荧光在正的非共线角的情况下, 对应的信号光波长 λ_s 以及时间走离长度 L 随相位匹配角 θ 变化的曲线. 图中实点为实验值, 实线为利用上一节所述的理论模型计算的理论值, 理论值和实验值符合得很好.

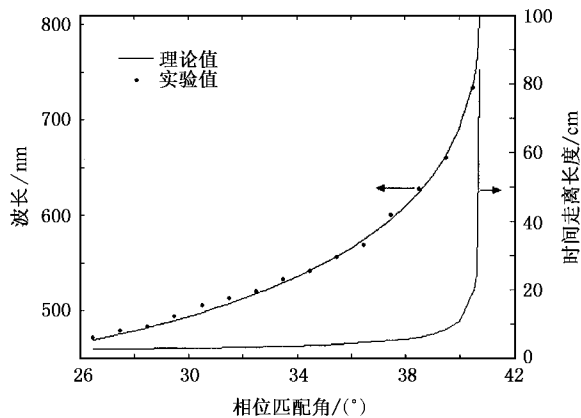


图 5 参量超荧光的波长及时间走离长度随相位匹配角的变化

由图 5 可知, 参量超荧光的信号光波长随着相位匹配角的增加而增加, 理论计算的调谐范围为 470nm 到 810nm. 但是由于在简并点附近的参量光具有非常宽的带宽和非常低的增益, 导致简并点附近的输出能量严重低于其它波长处的输出能量, 因此实验测量的调谐范围为 471.2nm 到 733.3nm. 时间走离长度也随着相位匹配角的增加而增加, 当相位匹配角大于 40° 时, 走离长度迅速增加, 在简并点处达到最大值. 在整个波长范围内, 时间走离长度最小为 2.72cm, 而在相同情况下, 共线相位匹配的时间走离长度均小于 0.5mm. 可见, 利用非共线相位匹配大大增加了三波的有效相互作用长度. 因此, 适当增加 BBO 晶体的长度可以提高参量增益.

5. 结 论

本文利用重复频率为 1kHz 的钛宝石激光的倍频蓝光作抽运光, 其中心波长为 405nm, 脉冲宽度为 100fs, 单脉冲能量为 50μJ, 抽运 I 类相位匹配的

BBO 晶体 ,获得了非共线参量超荧光 ,其信号光波长范围为 471.2nm 到 733.3nm. 给出了参量超荧光中最强光强处的非共线角、信号光波长以及时间走离长度随相位匹配角的变化. 结果表明 ,参量超荧光的强度角分布是三波相速和群速自匹配的结果. I 类相位匹配的参量超荧光光环关于抽运光中心对称 ,光环的直径随着相位匹配角的减小逐渐减小 ,但没有缩小到一个点光环就消失了. 因此非共线参量

超荧光的时间走离长度比共线时要大得多. 在 BBO I 类相位匹配条件下 ,为减小三波的群速失配 ,应采用非共线结构. 对于任意波长的信号光 ,只要按照参量超荧光产生的几何模型 ,选择相应的非共线角和相位匹配角 ,即可实现三波的群速失配最小. 该理论和实验研究为利用 I 类相位匹配的飞秒 BBO OPA 获得高增益、窄脉冲宽度的参量光输出提供了理论依据和实验验证.

[1] Cerullo G , Nisoli M , Stagira S and Silvestri S D 1998 *Opt. Lett.* **23** 1283

[2] Shirakawa A , Sakane I , Takasaka M and Kobayash T 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2268

[3] Baltuska A , Fuji T and Kobayashi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 306

[4] Sun T , Huang J S , Zhang W L and Wang Q Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2281 (in Chinese)[孙 涛、黄锦圣、张伟力、王清月 2002 物理学报 **51** 2281]

[5] Giallorenzi T G and Tang C L 1968 *Phys. Rev.* **166** 225

[6] Kleinman D A 1968 *Phys. Rev.* **174** 1027

[7] Tang C L 1975 in *Quantum Electronics : a Treatise* , edited by Rabin H and Tang C L (New York : Academic) 1A

[8] Trapani P Di , Andreoni A , Banfi G P , Solcia C , Danielius R , Piskarskas A , Foggi P , Monguzzi M and Sozzi C 1995 *Phys. Rev.* **51** 3164

Group velocity self-matching in noncollinear optical parametric generation with a type-I phase-matched BBO crystal^{*}

Ma Jing Zhang Ruo-Bing[†] Liu Bo Zhu Chen Zhang Wei-Li Zhang Zhi-Gang Wang Qing-Yue

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Key Laboratory of Opto-electronics

Information Technical Science of Ministry of Education , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 8 September 2004 ; revised manuscript received 24 March 2005)

Abstract

Noncollinear parametric superfluorescence (NPS) is obtained in the visible region by pumping a type-I phase-matched BBO crystal with the second harmonic of an amplified Ti :sapphire laser at 1kHz repetition rate . The variation of the noncollinear angle and the wavelength at the peak intensity of the NPS with the phase-matched angle is studied , and the variations of the group velocity mismatch (GVM) with the noncollinear angle and the phase-matched angle in the three-wave interaction is calculated theoretically . The results indicate that the type-I phase-matched NPS ring is centrosymmetric with respect to the pump beam on the observation screen . Along the NPS direction at the peak intensity , the GVM is minimal and the effective interaction length is maximal for the three waves . The angular distribution of the NPS intensity is ascribed to phase velocity and group velocity self-matching among interacting pulses . The theory and the experiment provide an ideal geometrical model for reducing the GVM between three waves , and provide a theoretical guidance and experimental verification for obtaining parametric pulses with higher gain and shorter duration in femtosecond optical parametric amplification .

Keywords : group velocity self-matching , parametric superfluorescence , noncollinear phase-matching , femtosecond optical parametric amplification

PACC : 4265K , 4280 , 4280W

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 1999075201) , Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20030056021) and the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE , China .

[†] Corresponding author. E-mail : zhangrb@tju.edu.cn