

# 光参量过程中的逆转换问题

刘建辉 柳强<sup>†</sup> 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系, 激光与光子技术研究室, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2010年3月30日收到; 2010年4月28日收到修改稿)

逆转换是影响光参量变换转换效率、参量光光束质量以及参量光输出稳定性的关键因素, 随光斑分布和时间变化, 逆转换现象很难消除. 文中分析了光参量变换过程中的逆转换问题, 研究了影响逆转换的关键因素. 分析得出, 适当的晶体长度、优化的抽运光斑截面类型、合适的谐振腔参数(对于振荡器)有利于降低逆转换, 提高参量转换效率, 改善参量光光束质量. 根据理论分析结果, 设计了脉冲磷酸钛氧钾(KTA)光参量振荡器, 实验获得了270 mJ信号光和150 mJ闲频光输出, 有效地抑制了逆转换的影响, 参量转化效率达到了43%.

**关键词:** 逆转换, 光参量放大, 光参量振荡

**PACS:** 42.65.Yj, 42.65.Lm

## 1. 引言

不同频率段的激光在各种领域中有着重要的应用, 参量变换的方法<sup>[1,2]</sup>是目前得到各种波长激光的有效方法, 因其结构简单、产热量小、波长可调谐等优点, 在医疗、激光雷达、激光测距、物质检测、光电对抗等领域中显示出广泛的应用前景<sup>[3,4]</sup>. 光参量技术目前虽已较成熟, 但是仍然存在很多问题, 主要体现在抽运光转换效率距离理论极限值很远、参量光光束质量差于抽运光、以及参量光光谱被展宽等方面. 这些问题严重限制了参量光的转换效率、光束质量、以及稳定性<sup>[5-7]</sup>, 尤其对于大信号增益过程影响更加明显<sup>[8-16]</sup>. Anstett等<sup>[17]</sup>设计了对脉冲光参量过程时域特性的测量, 在脉冲过程后期, 逆转换过程严重影响了参量光的光束质量和参量转换效率.

在光参量过程中, 信号光和闲频光得到增益并被不断放大, 当它们的振幅密度与抽运光相差不多时, 抽运光能量开始明显衰减, 能量从抽运光流向参量光. 如果信号光和闲频光的能量过大, 它们非但不能得到增益, 反而使抽运光被放大, 能量从参量光流向抽运光, 这时逆转换发生. 逆转换过程与时间、空间、以及三种光的功率密度有关, 可以通过控制这些因素来调节逆转换过程. 实际应用中可以

通过很多方法克服或者降低逆转换的影响. Alford和Smith<sup>[18]</sup>提出了几种谐振腔型, 尽量减少谐振腔中的闲频光, 降低逆转换作用的影响. 另外通过非共线相位匹配或者非共线谐振<sup>[19]</sup>, 也可以降低逆转换过程的影响.

虽然已经有很多人给出了克服逆转换的方法, 但是还没有人对逆转换过程进行专门的分析. 本文研究了光参量过程中的逆转换过程, 分析了影响逆转换过程的主要因素. 根据理论分析结果设计了脉冲抽运磷酸钛氧钾(KTA)单谐振光参量振荡器(OPO), 并进行了实验, 在抽运能量约为1 J时, 获得了270 mJ的信号光和150 mJ的闲频光输出, 参量转化效率达到了43%.

## 2. 影响逆转换的几个因素

平面波参量过程可以用平面波稳态三波耦合方程描述, 将其实部和虚部进行分解, 通过变量替换可以得到如下归一化耦合方程<sup>[2]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -u_2 u_3 \sin \theta, \\ \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -u_1 u_3 \sin \theta, \\ \frac{\partial u_3}{\partial \xi} &= u_1 u_2 \sin \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: qiangliu@mail.tsinghua.edu.cn

$u_j^2 = I_j / (\omega_j W)$  表示归一化的光子流密度,  $\theta$  为三个光波的相位差  $\theta = \Delta k z + \phi_1 + \phi_2 - \phi_3$ .

求解耦合方程得到三波能量表达式为

$$\begin{aligned} u_3^2(\xi) &= m_2 \cdot sn^2[m_1^{-1}(\xi + \xi_0), \gamma], \\ u_2^2(\xi) &= m_2 - u_3^2(\xi), \\ u_1^2(\xi) &= m_1 - u_3^2(\xi), \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma^2 &= u_3^2(0) / (u_2^2(0) + u_3^2(0)), \\ \gamma^2 &= (u_2^2(0) + u_3^2(0)) / (u_1^2(0) + u_3^2(0)). \end{aligned}$$

椭圆函数  $f = sn^2(\xi + \xi_0, \gamma)$  是周期为  $2K$  的函数, 其中

$$K = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{(1-x^2)(1-\gamma^2 x^2)}} dx. \quad (3)$$

如果初始闲频光功率密度为零, 即  $u_2(0) = 0$ , 则最佳晶体长度为

$$\xi = \xi_0 = m_1^{-0.5} K. \quad (4)$$

三波相互耦合过程中存在一个最佳晶体长度, 相互作用长度大于最佳晶体长度时逆转换作用发生, 抽运光转换效率不断降低. 抑制逆转换作用是提高光参量转换效率、改善参量光光束质量的有效途径. 实际光参量过程中的逆转换受到抽运功率密度、抽运光类型、脉冲过程以及谐振腔类型的影响, 下面将对这些因素逐一进行分析.

### 2.1. 逆转换与抽运光功率密度

以沿  $X$  轴切割的 KTA 晶体为例(下同), 最佳晶体长度和相对剩余抽运光(剩余抽运光与原抽运光的比值, 下同)随初始抽运功率密度的关系如

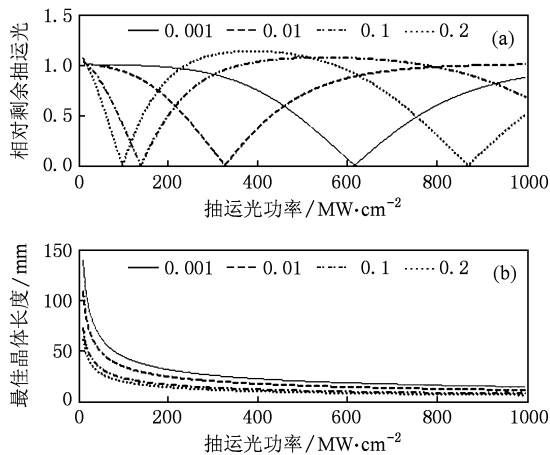


图1 相对剩余抽运光和最佳晶体长度随初始抽运功率密度的关系 (a)相对剩余抽运光, (b)最佳晶体长度 (晶体长度 20 mm, 信号光和抽运光功率分别是 0.001, 0.01, 0.1, 0.2)

图1.

从图1可见, 抽运光功率密度越大, 最佳晶体长度越短, 初始信号光与抽运光功率密度比值越大, 最佳晶体长度越小. 随着抽运功率密度不断增大, 最初的最佳晶体长度大于实际晶体长度, 逆转换现象不发生; 当最佳晶体长度小于实际晶体长度时, 逆转换现象发生, 抽运光转换效率降低. 随着抽运功率密度的继续升高, 能量将在抽运光和参量光之间不断转移. 对于平面波连续光参量过程, 逆转换越严重, 转化效率越低. 不同抽运功率密度下, 通过调节实际晶体长度, 可以有效控制逆转换, 得到最佳的转换效率.

### 2.2. 逆转换与抽运光类型

对于截面能量成高斯分布的抽运光, 光斑中心的参量光首先起振<sup>[14]</sup>, 由于中心抽运功率密度高, 信号光与抽运光比例系数大, 因此最佳晶体长度短, 光斑中心首先发生逆转换. 由于最佳晶体长度空间分布的差异, 使逆转换最低与参量转化效率最高不能工作在同一状态. 高斯光束中心首先发生逆转换, 是抽运光的转换效率不能达到 100% 的主要原因, 也是高斯光束抽运与理想平面波抽运的重要区别.

理论上中间能量凹陷的抽运光可以缩短光束中心和边缘最佳晶体长度的差异, 控制光斑各处的逆转换, 可以使转换效率达到更高. 假设信号光满足高斯分布, 抽运光与信号光光斑大小相同, 不同类型的抽运光光斑半径和功率也相同, 则高斯光束抽运光、准平面波抽运光与中心凹陷的抽运光光斑功率密度分布如图2所示.

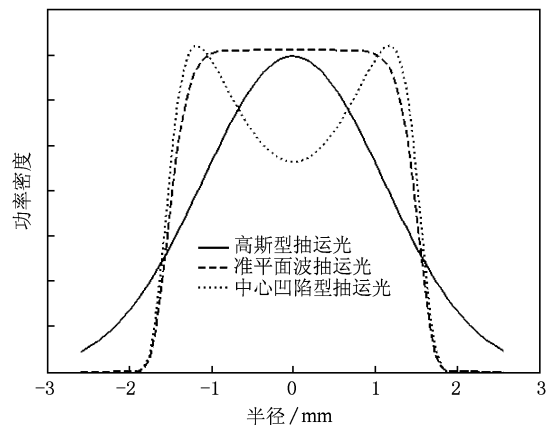


图2 不同类型的抽运光光斑功率密度分布

当抽运功率为 2 MW、光斑直径为 2.6 mm, 不同形式的光束抽运时, 转换效率随晶体长度的变化曲线和光斑截面上的最佳晶体长度分布如图 3 所示.

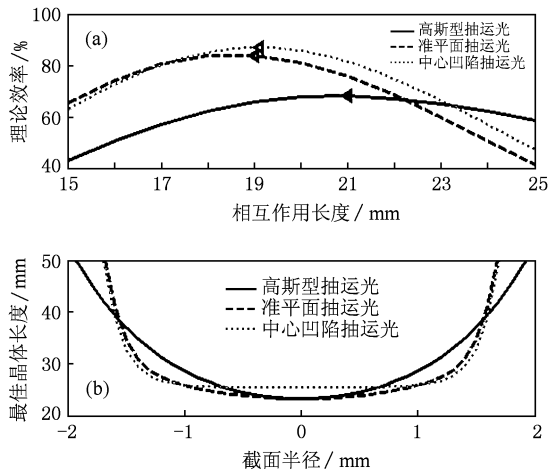


图 3 不同形式的光束抽运时, 随晶体长度变化的转换效率和光斑截面上的最佳晶体长度的关系图 (a) 晶体长度与转换效率关系, (b) 光斑截面与最佳晶体长度关系

高斯光束抽运的时候, 当晶体长度为 21 mm 时, 最高转换效率为 68%; 准平面波抽运的时候, 当晶体长度为 19 mm 时, 最高转换效率为 84%; 中心凹陷型光束抽运的时候, 当晶体长度为 19 mm 时, 最高转换效率为 88%. 不同类型的抽运光使光束截面上最佳晶体长度分布不同, 对逆转换作用的调节作用也不同, 抽运光的最高转换效率也不同. 准平面波抽运光有利于调节逆转换作用, 提高参量转换效率.

### 2.3. 脉冲抽运光参量过程中的逆转换

对于脉冲光参量振荡器, 在抽运脉冲时间内, 信号光从噪声中建立起来, 抽运光的强度随时间变化, 信号光和抽运光强度的比值也随时间变化. 在信号光从无到有到不断放大的过程, 抽运光功率密度不断增大, 信号光与抽运光功率密度的比值也不断增大, 最佳晶体长度不断减小 (仍然大于实际晶体长度), 抽运光的转换效率不断增加, 相对剩余抽运光不断减少. 直到最佳晶体长度小于实际晶体长度, 逆转换发生, 抽运光转换效率降低. 在抽运脉冲的后期, 抽运能量逐渐降低, 最佳晶体长度变大, 开始接近实际晶体长度, 最终远大于实际长度, 逆转换作用将变弱, 直到消失, 抽运效率将逐渐增高, 然后降低至零. 于是, 在抽运脉冲时间内, 如果有逆转

换发生, 相对剩余抽运光的波形将会出现两个 (或更多) 波谷.

定义逆转换系数  $\Omega$ : 剩余抽运光除以原抽运光的波形中两个波谷包围的时间内, 参与逆转换的能量占原抽运能量的比值.

如图 4 所示曲线中实线表示原抽运脉冲, 虚线表示剩余抽运光脉冲, 点划线表示剩余抽运光与原抽运光脉冲波形之比.  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  两个时刻表示点划线两个波谷的时刻, 阴影面积由这两个时刻以及剩余抽运光脉冲波形组成, 阴影面积包围的能量与原抽运脉冲能量的比值就是逆转换系数  $\Omega$ . 逆转换系数越大, 逆转换现象越严重.

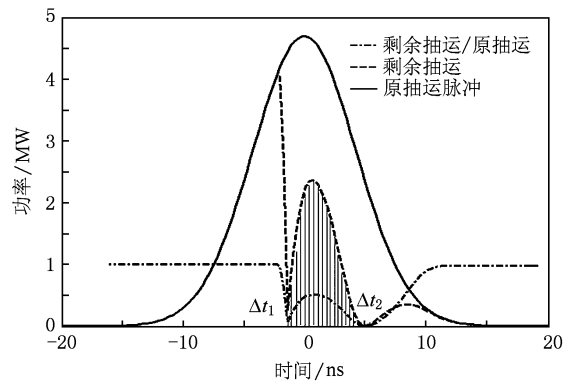


图 4 逆转换系数定义

在高增益大信号环境下, 抽运脉冲时间内最佳晶体长度可能小于实际晶体长度, 抽运光在晶体中可能经过多次逆转换过程. 调节实际晶体的长度, 使其在脉冲过程中尽量匹配最佳长度, 这样可以得到较高的转化效率, 理论上也能得到光束质量较好的参量光. 平面波脉冲光参量振荡过程的波形可以用图 5 表示.

四个晶体长度分别为 12, 15, 20 和 30 mm, 抽运光转换效率分别为 7.3%, 38.3%, 50.8% 和 30.5%, 逆转换系数分别为 0, 0, 0.173 和 0.613. 在晶体长度为 20 mm 的时候虽然有逆转换作用, 但是由于脉冲建立时间缩短, 仍然可以获得最高的转换效率. 抽运光经历了正转换、逆转换、正转换这几个过程, 由于逆转换会使原抽运光的光束质量变差, 这时候得到的参量光的光束质量差于没有逆转换作用时的参量光 (12 和 15 mm 时). 因此抽运光最佳转换效率和最小逆转换系数往往不工作在同一状态. 平面波脉冲光参量振荡过程转换效率不能达到 100%, 除了脉冲建立时间的因素外, 最佳晶体长

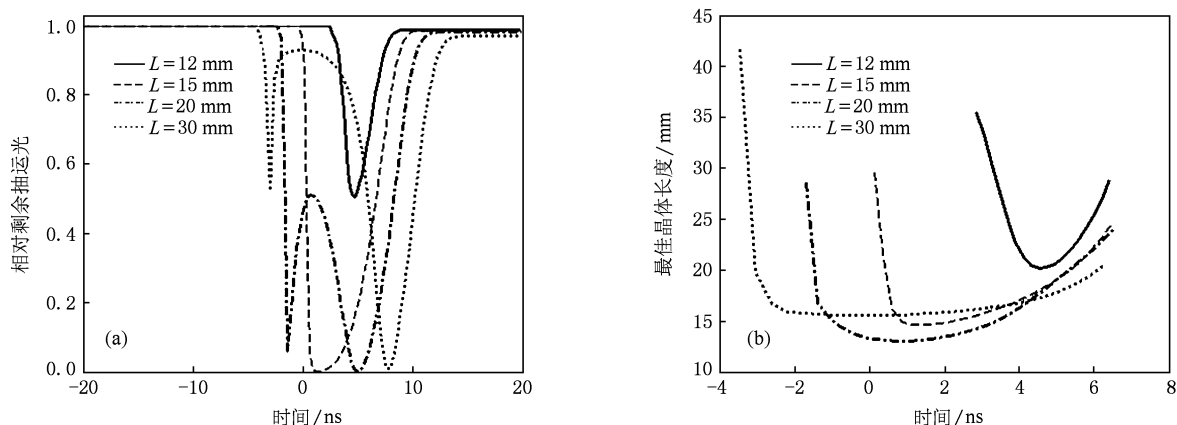


图5 脉冲 OPO 抽运光时, 剩余抽运光相对原抽运光衰减和最佳晶体长度随时间的变化 (a) 相对剩余抽运光随时间的变化, (b) 最佳晶体长度随时间的变化. 晶体距离两腔镜各 5 mm, 信号光单谐振反射率为 0.5, 平面波, X-cut KTA, 2.6 mm, 50 mJ, 10 ns

度随时间动态变化, 难以适应实际晶体长度, 脉冲过程中的逆转换难以消除. 调整实际晶体的长度, 可以有效控制逆转换, 在最高转换效率和最优光束质量之间得到最理想的输出结果.

### 2.4. 逆转换与谐振腔类型

对于准平面波抽运光, 单谐振和双谐振 OPO, 相对剩余抽运光波形如图 6 所示<sup>[20]</sup>.

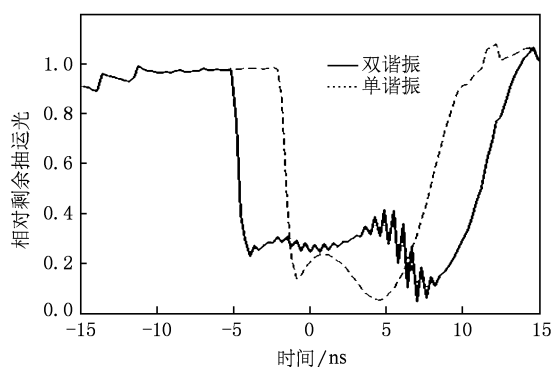


图6 准平面波抽运光时输出相对剩余抽运光变化曲线 (虚线为单谐振(OPO), 实线为双谐振 OPO, 信号光闲频光反射率均为 0.5, X-cut KTA, 2.6 mm, 50 mJ, 10 ns)

准平面光束抽运时, 在单谐振和双谐振情况下逆转换系数分别是 0.078 和 0.221, 光参量振荡器的阈值和信号光建立时间明显低于单谐振. 双谐振时由于逆转换作用不稳定, 输出抽运光波形不再光滑, 双谐振的逆转换比单谐振更加难于控制. 另外

输出镜对信号光的反射率影响振荡过程中信号光与抽运光功率密度的比值, 也影响脉冲过程中最佳晶体长度, 从而影响逆转换过程.

### 3. 实验结果

实验搭建了脉冲抽运非临界相位匹配 KTA 光参量振荡器实验装置, 抽运光参数为: 抽运波长 1064 nm, 抽运脉宽 10 ns, 抽运能量约 1 J, 光斑直径 10 mm, 近平顶分布, 根据理论分析结果, 我们确定了 KTA 晶体长度为 20 mm, 采用了单谐振光参量振荡形式, 腔长为 30 mm, 输出镜对信号光耦合率确定为 50%. 在上述条件下逆转换作用可以得到抑制, 理论转换效率可以达到 48%. 实验获得 270 mJ 信号光和 150 mJ 闲频光输出, 有效地抑制了逆转换影响, 参量转化效率达到了 43%.

### 4. 结 论

逆转换是影响光参量变换的转换效率和参量光的光束质量的关键因素. 适当设计晶体的长度可以降低逆转换过程, 准平面波光束抽运比高斯光束抽运更有利于降低逆转换作用, 双谐振比单谐振有利于降低 OPO 阈值但增强了逆转换作用, 减小输出镜的反射率会增高 OPO 阈值但有利于降低逆转换作用. 通过实验验证, 理论分析和实验结果基本一致.

- [1] Yao J Q, Xu D G 2007 *All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology* (Beijing: Science Press) p652 (in Chinese) [姚建铨、徐德刚 2007 全固态激光及非线性光学频率变换技术(北京:科学出版社)第652页]
- [2] Li G 2005 *The Conversion and Scaling for Lasers Frequency: The Practical Nonlinear Optics Technology* (Beijing: Science Press) p205 (in Chinese) [李 港 2005 激光频率的变换与扩展——使用非线性光技术(北京:科学出版社, 2005)第205页]
- [3] Cui Q J, Xu Y T, Zong N, Lu Y F, Cheng X K, Peng Q J, Bo Y, Cui D F, Xu Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1751 (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 ]
- [4] Takada A, Imajuku W, Morioka T, Hagimoto K 2005 *Optical Amplifiers and Their Applications* Budapest, Hungary, August 7, 2005 PWC1
- [5] Ding X, Sheng Q, Chen N, Yu X, Wang R, Zhang H, Wen W, Wang P, Yao J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4314
- [6] Li H, Geng A, Bo Y, Wu L, Cui D, Xu Z 2005 *Chin. Phys.* **14** 2026
- [7] Liu H J, Chen G F, Zhao W, Wang Y S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 105 (in Chinese) [刘红军、陈国夫、赵 卫、王屹山 2004 物理学报 **53** 105]
- [8] Haus J W, Pandey A, Powers P E 2007 *Opt. Commun.* **269** 378
- [9] Berrou A, Godard A, Lefebvre M 2007 Baltimore, Maryland, May 8, 2007 PJWA28
- [10] Lee K S, Gross M C, Ralph S E, Buck J A 2003 *Lasers and Electro-Optics Society* **1** 362
- [11] Lowenthal D D 1998 *J. Quantum Electron.* **34** 1356
- [12] Arisholm G, Paschotta R, Südmeyer T 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 578
- [13] McEwan K J, Terry J A C 2000 *Opt. Commun.* **182** 423
- [14] Oron M B, Eger D, Katz M, Bruner A, Englander A, Tsuk Y, Raphael Lavi 2000 *Proc. SPIE* **3936** 186
- [15] Lowenthal D D 1999 *Proc. SPIE* **3613** 155
- [16] McEwan K J 2003 *Proc. SPIE* **4972** 1
- [17] Anstett G, Nittmann M, Wallenstein R 2004 *Appl. Phys. B* **79** 305
- [18] Alford W J, Smith A V 1997 *U. S. Patent* 6147793
- [19] Liang X, Bartschke J, Peltz M 2007 *Appl. Phys. B* **87** 649
- [20] Urschel R, Borsutzky A, Wallenstein R 2000 *Appl. Phys. B* **70** 203

## Back conversion in optical parametric process

Liu Jian-Hui Liu Qiang<sup>†</sup> Gong Ma-Li

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 30 March 2010; revised manuscript received 28 April 2010)

### Abstract

Back conversion is the key factor that affects the conversion efficiency, the beam quality of the parametric waves, and the stability of the output in the optical parametric process. For the reason of the variation of the back conversion with the distribution in the cross-section and with time, the back conversion cannot be eliminated thoroughly. We analyzed the problem of the back conversion in the optical parametric process, and established the models of the parametric process for the continuous waves and the pulsed waves, which help us study the key factors affecting the back conversion. According to the conclusion of our analysis, the proper length of the nonlinear crystals, the optimal distribution of the energy of the pump beam, and the proper parameters of the resonant cavity (for optical parametric oscillators) could reduce the back conversion and help to increase the conversion efficiency. According to the theoretical results, we designed an X-cut KTA (Potassium Titanyl Arsenate) optical parametric oscillator, and obtained the signal light with the energy of 270 mJ and the idler light with the energy of 150 mJ, which decreased the back conversion, and the efficiency reached 43%.

**Keywords:** back conversion, optical parametric amplification, optical parametric oscillation

**PACS:** 42.65. Yj, 42.65. Lm

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: qiangliu@mail.tsinghua.edu.cn