



## 基于KTP晶体的斯塔克啁啾快速绝热通道波长转换

万婷 程栋 张翰达 陈长水

### Wavelength conversion of KTP crystal based Stark-chirped rapid adiabatic passage

Wan Ting Cheng Dong Zhang Han-Da Chen Chang-Shui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 114204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20210887

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210887>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 飞秒脉冲抽运掺镱微结构光纤产生超连续谱的实验研究

Experimental study of supercontinuum generation in Yb<sup>3+</sup>-doped microstructure fiber pumped by femtosecond pulses

物理学报. 2019, 68(13): 134206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182051>

#### 基于绝热捷径快速实现远距离的四维纠缠态的制备

Fast implementation of four-dimensional entangled state in separately coupled cavities via shortcut to adiabatic passage

物理学报. 2018, 67(16): 160302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180315>

#### 绝热跃迁方法测量铯喷泉钟冷原子碰撞频移

Investigation of cold atom collision frequency shift measured by rapid adiabatic passage in cesium fountain clock

物理学报. 2020, 69(14): 140601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191800>

#### 动态啁啾脉冲干涉的快速绝对距离测量

Rapid absolute distance measurement by dynamic chirped pulse interferometry

物理学报. 2021, 70(22): 220601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202149>

#### 基于方波脉冲外场的超冷原子-分子绝热转化

Adiabatic conversion of ultracold atoms into molecules via square-shaped pulse field

物理学报. 2018, 67(20): 203701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180908>

#### 基于超绝热捷径技术快速制备超导三量子比特Greenberger-Horne-Zeilinger态

Superadiabatic scheme for fast generating Greenberger-Horne-Zeilinger state of three superconducting qubits

物理学报. 2019, 68(3): 030302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181922>

# 基于 KTP 晶体的斯塔克啁啾快速绝热通道波长转换\*

万婷<sup>1)2)</sup> 程栋<sup>1)</sup> 张翰达<sup>1)</sup> 陈长水<sup>1)†</sup>

1) (华南师范大学信息光电子科技学院, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室,

广州市特种光纤光子器件与应用重点实验室, 广州 510006)

2) (湖南理工学院信息科学与工程学院, 湖南省信息光子学与空间光通信重点实验室, 岳阳 414006)

(2021 年 5 月 11 日收到; 2021 年 12 月 15 日收到修改稿)

通过近似类比原子绝热布居理论, 建立了基于 KTP 晶体的斯塔克啁啾快速绝热通道理论的波长转换模型, 系统研究了晶体耦合调制中的耦合延迟参数和宽度参数、泵浦强度、温度、入射波长等因素对转换效率的影响. 结果表明在 KTP 晶体中能够实现入射光能量到出射光能量近乎完全的转换, 同时转换过程中中间光能量保持极低. 离最优晶体耦合调制参数越远, 转换效率越低. 转换效率先随泵浦强度的增大不断增大, 当转换效率达到最大值, 增大泵浦强度对转换效率几乎无影响. 温度和入射波长的变化对转换效率影响较小. 研究结果表明基于 KTP 晶体的斯塔克啁啾快速绝热通道理论的波长转换具有很好的鲁棒性. 该研究可为紫外到中红外光源的获取以及光子器件的制造提供理论依据.

**关键词:** KTP 晶体, 斯塔克啁啾快速绝热通道, 波长转换

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Ky, 42.50.Hz, 42.65.Sf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20210887

## 1 引言

三波混频 (three wave mixing, TWM) 通过和频过程或者差频过程产生激光器不能直接发射的波长, 可以有效地拓宽波长的转换范围<sup>[1-4]</sup>. 然而转换过程中相位失配的存在极大地限制了波长转换效率, 阻碍了非线性光学技术的发展和运用. 为了解决此问题, 研究者们提出准相位匹配技术, 即通过空间调制晶体二阶非线性系数产生附加波矢来补偿转换过程中的相位失配<sup>[5-7]</sup>. 虽然利用准相位匹配技术能够有效提高转换效率, 但总的转换效率并不高, 且在超短脉冲的转换过程中往往需要权衡效率和转换带宽之间的关系<sup>[8,9]</sup>. 2008 年 Sucho-wski 等<sup>[10]</sup> 类比二能级原子布居系统中的快速绝热

通道 (rapid adiabatic passage, RAP) 理论, 建立了绝热和频转换模型. 当晶体啁啾设计满足绝热条件时, 可实现近红外到可见光 140 nm 的带宽转换, 最大转换效率达到 74%. 其研究结果表明原子物理中绝热理论可为实现高效宽带波长转换提供一条可行的思路. 至此之后, 基于绝热理论的波长转换引起了广泛的关注, 并对其应用研究进行相关探索, 如将之应用于光纤传输<sup>[11,12]</sup>、波导通信<sup>[13]</sup> 以及光学成像<sup>[14]</sup> 等.

为拓宽波长转换范围, 研究者们提出基于受激拉曼快速绝热通道 (stimulated Raman rapid adiabatic passage, STIRAP)<sup>[4,15,16]</sup> 和斯塔克啁啾快速绝热通道 (Stark-chirped rapid adiabatic passage, SCRAP)<sup>[17-20]</sup> 的波长转换模型. 基于 STIRAP 理论的波长转换是类比于三能级原子布居系统, 在反

\* 广东省自然科学基金 (批准号: 2015A030313383) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [cschen@aiofm.ac.cn](mailto:cschen@aiofm.ac.cn)

直觉序列下实现入射光能量到输出光能量的近乎完全转换, 转换过程中产生的中间光能量极低. SCRAP 是在 STIRAP 的基础上加一束斯塔克光, 利用斯塔克场引起的斯塔克位移产生能级交叉, 产生一条绝热通道, 从而实现能量从初始状态到目标状态的高效传输<sup>[21–24]</sup>. 与 STIRAP 相比, 它不需要满足双光子共振条件, 可以应用于多光子传输, 也无耦合次序的限制. 然而, 以往基于 SCRAP 的波长转换研究是基于离子和原子之间的能量转移, 只能产生与离子或原子共振一致的波长<sup>[17,18]</sup>. 受 STIRAP 与准相位匹配技术在波长转换中的应用启发<sup>[25–31]</sup>, 本组类比三能级系统原子绝热布居, 提出了一种基于 SCRAP 的级联 TWM 模型, 其转换波长可以覆盖非线性介质的透光范围<sup>[19,20]</sup>. 相比于 STIRAP, 基于 SCRAP 理论的波长转换具有更好的稳定性. 转换过程与作用的非线性晶体物理性质密切相关, KTP 晶体具有较大的透光范围、较高的非线性光学系数和损伤阈值、对光折变损伤的敏感性低等优势<sup>[32]</sup>. 基于 SCRAP 理论的波长转换在 KTP 晶体中是否也能保持高效的转换以及鲁棒性?

本文将系统研究基于 KTP 晶体的 SCRAP 波长转换模型. 首先通过近似类比三能级原子布居系统中的绝热理论, 建立基于 KTP 晶体的级联波长转换模型. 然后在此基础上, 研究晶体耦合延迟参数、宽度参数、泵浦强度、温度以及入射波长等因素对转换效率的影响, 并总结其对转换过程的影响规律.

## 2 基于 SCRAP 理论的级联耦合模型

基于 SCRAP 的  $\Lambda$  型三态量子系统的粒子布

居过程如图 1(a) 所示. 频率为  $w_{\text{pump}}$  的泵浦光将粒子从初始态 $|1\rangle$ 激发到中间态 $|2\rangle$ , 然后频率为  $w_{\text{Stokes}}$  的斯托克斯光将粒子从中间态 $|2\rangle$ 激发到终态 $|3\rangle$ . 同时, 远离共振的斯塔克脉冲  $w_{\text{Stark}}$  产生能级位移调节由泵浦光和斯托克斯光引起的失谐  $\Delta_p$  和  $\Delta_s$ . 通过合适的时间延迟, 3 个透热态之间的能级交叉形成一条绝热通道, 使得粒子从初始态 $|1\rangle$ 转换到终态 $|3\rangle$ . 在无泵浦损耗近似下, 级联 TWM 过程与三态量子系统的耦合波方程具有动态对称性, 具有相同的动力学行为, 因此可以将三态量子理论类比到 TWM 过程中<sup>[4,10,15,33]</sup>. 如图 1(b) 所示, 当频率为  $w_1$  的入射光入射到非线性晶体时, 第 1 个 TWM 过程在频率为  $w_{p1}$  的强泵浦的作用下产生频率为  $w_2$  的中间光. 然后第 2 个 TWM 过程在频率为  $w_{p2}$  的强泵浦作用下产生频率为  $w_3$  的输出光.

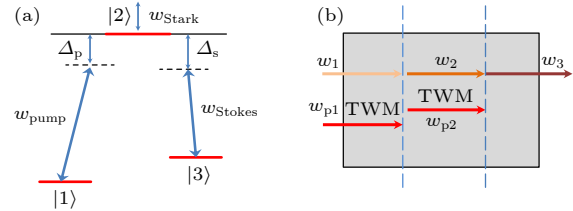


图 1 (a)  $\Lambda$  型三态量子系统; (b) 级联 TWM 过程示意图  
Fig. 1. (a) Schematic of the  $\Lambda$ -type three-state quantum system; (b) the diagram of the cascaded TWM.

值得注意的是, 这里考虑的是无泵浦损耗近似, 即泵浦光的强度远高于其他激光, 转换过程中泵浦光强度的变化可忽略不计. 近似类比于一个基于 SCRAP 的三态量子系统可以得到级联 TWM 的耦合动力学方程<sup>[10,13,15,19]</sup>:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = i \begin{bmatrix} 0 & \kappa_{12}(z) e^{-i\Delta k_1 z} & 0 \\ \kappa_{21}(z) e^{i\Delta k_1 z} & \Delta k_2 + \kappa_c(z) e^{-i\Delta k_3 z} & \kappa_{23}(z) e^{-i\Delta k_2 z} \\ 0 & \kappa_{32}(z) e^{i\Delta k_2 z} & \Delta k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  分别表示输入光、中间光以及输出光的复振幅. 其中  $\kappa_{12} = [\chi^{(2)}(w_1, w_{p1}; w_2) w_1^2 / k_1 c^2] \times [\text{Re}\{\varphi_{p1}\} \mp i \text{Im}\{\varphi_{p1}\}]$ ,  $\chi^{(2)}$  为非线性晶体的二阶非线性系数,  $\varphi_{p1}$  是第 1 个泵浦光的复振幅包络,  $c$  表示光速.  $\kappa_{23} = [\chi^{(2)}(w_2, w_{p2}; w_3) w_2^2 / k_2 c^2] [\text{Re}\{\varphi_{p2}\} \mp i \text{Im}\{\varphi_{p2}\}]$ ,  $\varphi_{p2}$  为第 2 个泵浦光的复振幅包络, 同

时还有  $\kappa_{ij} = (w_i^2 k_j / w_j^2 k_i) \kappa_{ji}^*$ .  $\Delta k_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 为级联 TWM 过程的相位失配, 这里  $\Delta k_1 = k_1 \pm k_{p1} - k_2$ ,  $\Delta k_2 = k_2 \pm k_{p2} - k_3$ ,  $k_j = n_j(w_j) w_j / c$ ,  $k_{pj}$  是各光波的波矢, 当转换过程为和频时取正号, 为差频时取负号. 这里耦合系数  $\kappa_{12}(z)$ ,  $\kappa_{23}(z)$  以及  $\kappa_c(z)$  采用高斯调制的形式, 其表达式如下:

$$\begin{cases} \kappa_{12}(z) = \kappa_{12} e^{-(z+s_1)^2/d_1^2}, \\ \kappa_{23}(z) = \kappa_{23} e^{-(z+s_2)^2/d_2^2}, \\ \kappa_c(z) = \kappa_c e^{-z^2/d_3^2}, \\ \kappa_c = \sqrt{\kappa_{12}\kappa_{21} + \kappa_{23}\kappa_{32}}, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $s_j$  和  $d_j$  分别表示晶体耦合调制中的耦合延迟参数和宽度参数, 分别决定着耦合调制最大位置 and 变化速度. 如果  $s_1 < s_2$ , 绝热交叉使用的是反直觉序列, 否则, 使用的是直觉序列. 耦合调制函数  $\kappa_{12}(z)$ ,  $\kappa_{23}(z)$  以及  $\kappa_c(z)$  可以通过相位反转准相位匹配技术来实现 [15,34,35]. 在相位反转准相位匹配中, 二进制函数相乘可以产生所需的耦合调制, 具有多个傅里叶分量, 可为转换过程提供多个准相位匹配. 非线性系数与耦合系数成正比, 因此, 可通过调控占空比来获得所需的耦合调制.

### 3 数值模拟与分析

本文采用级联差频过程为例对基于 KTP 晶体的 SCRAP 波长转换进行研究, 重点研究耦合延迟参数、宽度参数、泵浦强度、温度以及入射波长的变化对转换过程的影响. 选用的参数如下: 入射光的波长为 1064 nm, 两个泵浦的波长分别为 2700 nm 和 3000 nm, 则中间光的波长为 1755 nm, 输出光的波长为 4228 nm. KTP 的二阶非线性系数为 16.65 pm/V, 晶体折射率系数是晶体温度为 100 °C 时通过 Sellmeier 方程计算得到 [36]. 入射光、第 1 个泵浦光和第 2 个泵浦光的强度分别为 100 MW/cm<sup>2</sup>, 72 GW/cm<sup>2</sup> 和 3.5 GW/cm<sup>2</sup>. 这里采用的是无泵

浦损耗近似, 可以得到  $d\varphi_{p1}/dz = d\varphi_{p2}/dz = 0$ .

#### 3.1 耦合延迟参数对转换过程的影响

宽度参数为  $d_1^2 = 0.00005 \text{ m}^2$ ,  $d_2^2 = 0.00003 \text{ m}^2$ ,  $d_3^2 = 0.00009 \text{ m}^2$ . 图 2(a) 描述的是三波长强度随传播长度的变化情况. 从图 2(a) 可以看出, 转换过程开始于 -5 mm 结束于 6 mm. 在转换过程一直保持在较低的中间光能量, 入射光能量近乎完全转化为输出光能量, 此外, 出射光强度为 25.1 GW/cm<sup>2</sup>, 满足完全转换所需的比例关系  $\lambda_1/\lambda_3 = I_3/I_1$ , 在这个转换过程中转换效率达到 100%. 产生该现象的原因是 SCRAP 中的中间光和输出光能量耦合会先于入射光和中间光能量耦合, 因此在转换过程中能量能尽可能的转换为输出光, 且中间光几乎没有能量的存在 [21]. 通过以上分析可知基于 KTP 晶体的级联波长转换模型能实现高效的波长转换. 高效的转换与耦合延迟参数有很大关系, 只有选择合适的晶体耦合调制, 才能补偿转换过程中的相位失配, 使信号光能量能够顺利转换到输出光能量 [37]. 为了实现高效转换, 将耦合延迟参数设置为  $s_1 = -0.011 \text{ m}$ ,  $s_2 = 0.002 \text{ m}$ , 对应的耦合调制参数如图 2(b) 所示.

转换效率随耦合延迟参数  $s_1, s_2$  的变化如图 3(a) 所示, 颜色的深浅表示转换效率的大小. 从图 3(a) 可以看出, 存在一个带状区域的耦合延迟参数可以实现高效的波长转换, 离最优耦合延迟参数越远, 转换效率越低. 为了更加清楚地显示当耦合延迟参数非最优时转换过程, 画出了耦合延迟参数为  $s_1 = -0.011 \text{ m}$ ,  $s_2 = 0.006 \text{ m}$  时三波长强度随传

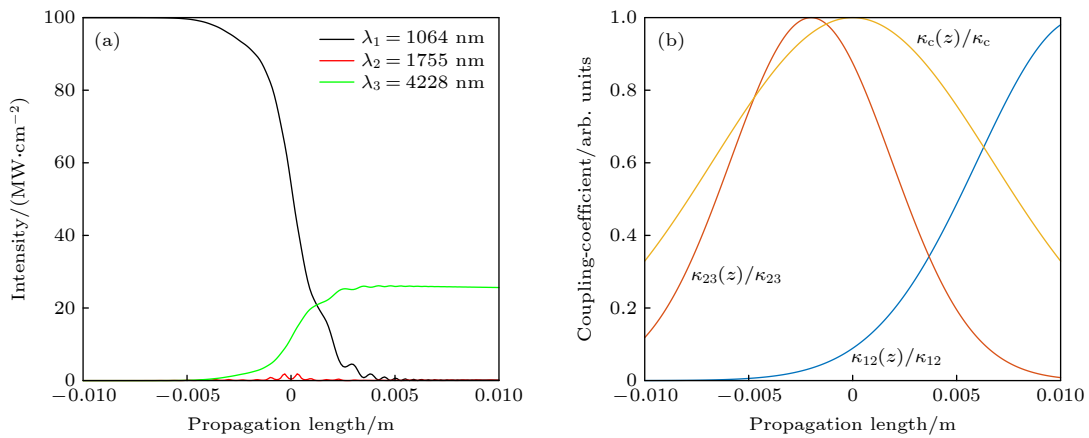


图 2 (a) 三波长强度随传播长度的变化; (b) 耦合系数调制随传播长度的变化

Fig. 2. (a) Intensities of the three wavelengths varies with the propagation length; (b) the coupling-coefficients modulation along the propagation length.



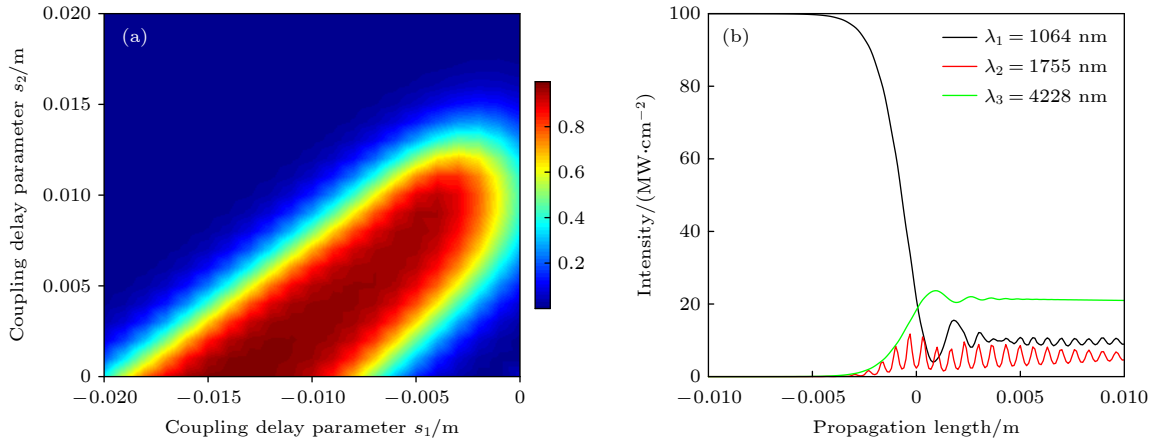


图 3 (a) 耦合延迟参数对转换效率的影响; (b) 耦合延迟参数为  $s_1 = -0.011$  m,  $s_2 = 0.006$  m 时三波长强度随传播长度的变化情况

Fig. 3. (a) The conversion efficiency as a function of the coupling delay parameters; (b) the three wavelengths vary with propagation length when the coupling delay parameters are  $s_1 = -0.011$  m,  $s_2 = 0.006$  m.

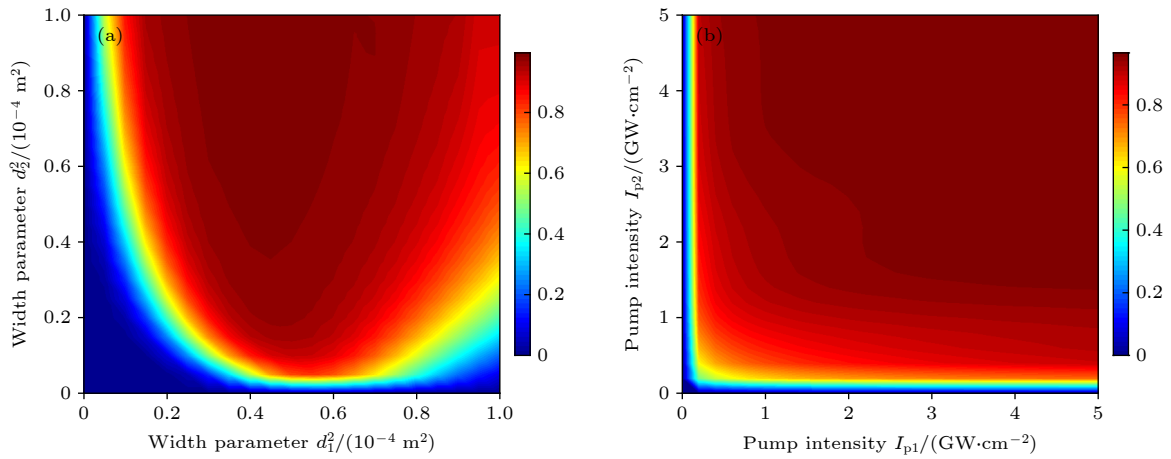


图 4 (a) 宽度参数  $d_1^2$ ,  $d_2^2$  对转换效率的影响; (b) 泵浦强度  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$  对转换效率的影响

Fig. 4. (a) The conversion efficiency as a function of the width parameters  $d_1^2$  and  $d_2^2$ ; (b) the conversion efficiency as a function of the pump intensities  $I_{p1}$  and  $I_{p2}$ .

播长度的变化情况, 如图 3(b) 所示. 从图 3(b) 可以看出在此耦合参数下三波长的能量共同存在, 入射光能量只有部分能量进行转换, 并且已转换的入射光能量转换为出射光能量的同时还转换为中间光能量. 这是由于在此耦合延迟参数下不能实现相位匹配, 使得转换过程中入射光能量不会近乎完全转换, 并且使入射光能量与中间光能量相互振荡.

### 3.2 宽度参数和泵浦强度对转换效率的影响

固定宽度参数  $d_3^2 = 0.00009$  m<sup>2</sup>, 耦合延迟参数为  $s_1 = -0.011$  m,  $s_2 = 0.002$  m. 宽度参数  $d_1^2$ ,  $d_2^2$  的变化对转换效率的影响如图 4(a) 所示. 从图 4(a)

可以看出, 离最优宽度参数越远, 转换效率越低. 当宽度参数  $d_2^2$  固定时转换效率随着宽度参数  $d_1^2$  的变化先增大到最大值, 然后再缓慢减小. 还可以发现宽度参数  $d_2^2$  值越大, 能实现高效转换的带宽越大, 最大的转换效率可以接近 100%. 转换效率随泵浦强度的变化如图 4(b) 所示, 所选的耦合调制参数  $d_1^2 = 0.00005$  m<sup>2</sup>,  $d_2^2 = 0.00003$  m<sup>2</sup>. 由图 4(b) 可知, 转换效率与泵浦强度成正比, 随泵浦光强度的增大而增大, 但是转换效率对泵浦强度  $I_{p1}$  的变化更敏感. 当泵浦强度  $I_{p1}$  大于 1 GW/cm<sup>2</sup> 且  $I_{p2}$  大于 1.5 GW/cm<sup>2</sup> 时可以实现高效的波长转换, 当达到高效波长转换后, 增加泵浦强度对转换效率几乎无影响.

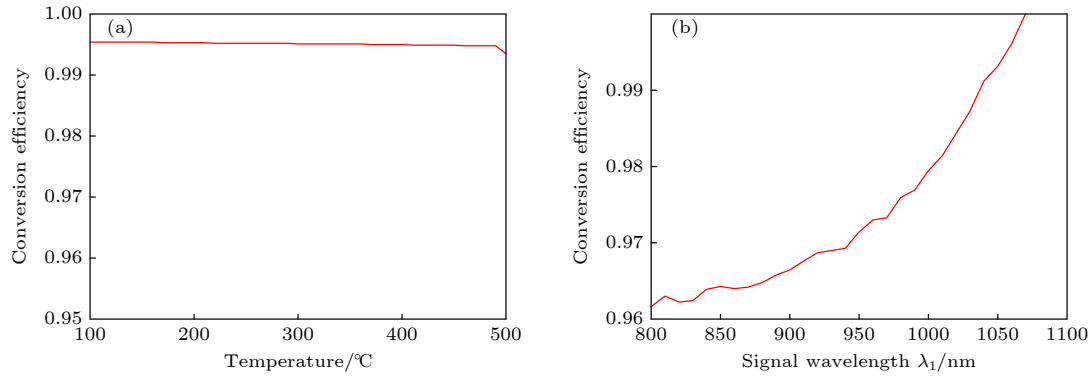


图 5 (a) 温度对转换效率的影响; (b) 入射波长对转换效率的影响

Fig. 5. (a) The conversion efficiency varies with the temperature; (b) the conversion efficiency varies with the signal wavelength.

### 3.3 温度和入射光波长对转换效率的影响

晶体的折射率与温度和入射光波长密切相关, 随着温度和入射波长的变化而变化, 间接影响转换过程中的相位失配. 图 5(a) 描述的是转换效率随温度的变化情况, 从图 5(a) 可以看出, 当温度从 100 °C 升高至 500 °C 时对转换效率几乎没有影响, 转换效率保持在 99% 以上. 图 5(b) 为转换效率随入射波长的变化情况. 考虑到 KTP 的最大透光范围为 4.5  $\mu\text{m}$ , 入射波长从 800 nm 增大到 1070 nm 时, 保持泵浦波长不变, 其输出的波长范围为 1830—4331 nm. 从图 5(b) 可以看出, 转换效率随着入射波长的增大整体上不断增大, 在 1064 nm 附近时转换效率最大, 近 100%. 当入射波长为 800 nm 时转换效率最低, 最低转换效率超过 96%. 由此可知, 温度和入射光波长的变化对基于 KTP 晶体的 SCRAP 波长转换过程影响较小, 这是由于 SCRAP 理论的波长转换能补偿这两个参数引起的相位失配, 进而能保持高效的转换, 这也验证了基于 SCRAP 的波长转换方案具有很好的鲁棒性.

## 4 总 结

本文建立了基于 KTP 晶体的 SCRAP 的波长转换模型, 分别研究了耦合调制参数中耦合延迟参数和宽度参数、泵浦强度、温度、入射波长等因素对转换过程的影响. 研究结果表明基于 KTP 晶体的转换过程能够实现输入光能量到输出光能量近乎完全的转换, 且中间光能量一直保持极低. 基于 SCRAP 理论的波长转换对晶体耦合调制参数的变化最敏感, 其次是泵浦强度, 而对温度和入射波长

的变化不敏感. 存在一个带状区域的耦合延迟参数可以实现高效的波长转换. 当宽度参数  $d_2^2$  固定时, 随着宽度参数  $d_1^2$  的增大, 转换效率会先增大到最大值, 然后缓慢下降. 同时, 宽度参数  $d_2^2$  的数值越大, 能实现的最大转换效率越大, 能实现高效波长转换的带宽越大. 离晶体最优耦合调制参数越远, 转换效率越低. 转换效率随着泵浦强度的增大而增大, 当转换效率达到最大值, 增加泵浦强度对转换效率几乎无影响. 温度和入射波长的变化对转换效率影响不大. 上述研究验证了基于 SCRAP 理论的波长转换具有很好的鲁棒性.

## 参考文献

- [1] Stolen R H, Bjorkholm J E, Ashkin A 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 308
- [2] Chang J H, Mao Q H, Feng S J, Gao X M, Xu C Q 2010 *Opt. Lett.* **35** 3486
- [3] Zhong H Z, Zhang L F, Li Y, Fan D Y 2015 *Sci. Rep.* **5** 10887
- [4] Margules P, Moses J, Suchowski H, Porat G 2021 *J. Phys. Photonics* **3** 022011
- [5] Sasaki Y, Yuri A, Kawase K, Ito H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3323
- [6] Huang J T, Rao Z M, Xie F S 2019 *Opt. Express* **27** 17199
- [7] Li Y Y, Yesharim O, Hurvitz I, Karnieli A, Fu S H, Porat G, Arie A 2020 *Phys. Rev. A* **101** 033807
- [8] Chen B Q, Zhang C, Hu C Y, Liu R J, Li Z Y 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 083902
- [9] Chen B Q, Hong L H, Hu C Y, Zhang C, Liu R J, Li Z Y 2018 *J. Opt.* **20** 034009
- [10] Suchowski H, Oron D, Arie A, Silberberg Y 2008 *Phys. Rev. A* **78** 063821
- [11] Ding X Y, Heberle D, Harrington K, Flemens N, Chang W Z, Birks T A, Moses J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 153902
- [12] Ding X Y, Habib M S, Amezcua-Correa R, Moses J 2019 *Opt. Lett.* **44** 1084
- [13] Bahar E, Ding X Y, Dahan A, Suchowski H, Moses J 2018 *Opt. Express* **26** 25582
- [14] Mrejen M, Erlich Y, Levanon A, Suchowski H 2020 *Laser*

*Photonics Rev.* **14** 2000040

- [15] Porat G, Arie A 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 2901
- [16] Porat G, Silberberg Y, Arie A, Suchowski H 2012 *Opt. Express* **20** 3613
- [17] Rickes T, Marangos J P, Halfmann T 2003 *Opt. Commun.* **227** 133
- [18] Oberst M, Klein J, Halfmann T 2006 *Opt. Commun.* **264** 463
- [19] Wang T F, Li J F, Zhou W H, Chen C S 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 122202
- [20] Wang T F, Wan T, Zhou W H, Chen C S 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** 1958
- [21] Rangelov A A, Vitanov N V, Yatsenko L P, Shore B W, Halfmann T, Bergmann K 2005 *Phys. Rev. A* **72** 053403
- [22] Yatsenko L P, Shore B W, Halfmann T, Bergmann K, Vardi A 1999 *Phys. Rev. A* **60** R4237
- [23] Viedma D, Ahufinger V, Mompert J 2021 *Opt. Express* **29** 39200
- [24] Vitanov N V, Rangelov A A, Shore B W, Bergmann K 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 015006
- [25] Mizuuchi K, Yamamoto K, Kato M, Sato H 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 1596
- [26] Guo H C, Tang S H, Qin Y Q, Zhu Y Y 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066615
- [27] Wei J X, Chen C S 2013 *Opt. Commun.* **311** 380
- [28] Wei J X, Chen C S, Jiang H, Li W, Han T 2013 *Phys. Rev. A* **88** 023806
- [29] Sun C, Chen C S, Wei J X, Li P P 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 6100607
- [30] Xu L, Chen C S, Zhao X Y, Liu T, Hu H 2015 *Laser Phys.* **25** 125404
- [31] Li F J, Zhang Z H, Wan T, Zhang H D, Chen C S 2022 *Opt. Commun.* **502** 127427
- [32] Shur V Y, Pelegova E V, Akhmatkhanov A R, Baturin I S 2016 *Ferroelectrics* **496** 49
- [33] Suchowski H, Porat G, Arie A 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 333
- [34] Chou M H, Parameswaran K R, Fejer M M, Brener I 1999 *Opt. Lett.* **24** 1157
- [35] Chen X F, Wu F, Zeng X L, Chen Y P, Xia Y X, Chen Y L 2004 *Phys. Rev. A* **69** 013818
- [36] Reshak A H, Kityk I V, Auluck S 2010 *J. Phys. Chem. B* **114** 16705
- [37] Hu X P, Xu P, Zhu S N 2013 *Photonics Res.* **1** 171

# Wavelength conversion of KTP crystal based Stark-chirped rapid adiabatic passage<sup>\*</sup>

Wan Ting<sup>1)2)</sup> Cheng Dong<sup>1)</sup> Zhang Han-Da<sup>1)</sup> Chen Chang-Shui<sup>1)†</sup>

<sup>1)</sup> (*Guangzhou Key Laboratory for Special Fiber Photonic Devices, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, School of Information Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

<sup>2)</sup> (*Key Laboratory of Hunan Province on Information Photonics and Freespace Optical Communications, School of Information Science and Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China*)

( Received 11 May 2021; revised manuscript received 15 December 2021 )

## Abstract

The nonlinear wavelength conversion can generate the laser wavelengths which are not directly available, thereby broadening the laser spectrum range. However, the phase mismatch greatly limits the development and application of nonlinear optical technology. The wavelength conversion schemes in a manner analogous to population transfer in atomic rapid adiabatic passage, stimulated Raman adiabatic passage (STIRAP), and Stark chirped rapid adiabatic passage (SCRAP) provide feasible solutions for efficient and broadband wavelength conversion. The SCRAP uses the Stark shift caused by the Stark field to generate energy level crossings, therefore, the population in initial state can be efficiently converted into the target state. It does not require the two-photon resonance, and can be applied to multi-photon transition. In this paper, by approximate analogy to the adiabatic population theory, a wavelength conversion model with the KTP crystals based SCRAP is established, the influence of the coupling delay parameters, width parameters, pump intensity, temperature, and incident wavelength on the conversion process are systematically studied. The results show that the signal laser energy can be almost converted into output laser energy, while the intermediate laser energy is kept extremely low in the conversion process. The conversion process is sensitive to changes in coupling delay parameters, width parameters, and pump intensity. The farther away from its optimal value the coupling delay parameter, the lower the conversion efficiency is. When the width parameter  $d_2^2$  is fixed, as the width parameter  $d_1^2$  increases, the conversion efficiency first increases to a maximum value, and then slowly decreases. At the same time, the greater the value of the width parameter  $d_2^2$ , the greater the achievable maximum conversion efficiencies, and the greater the bandwidth that can achieve high-efficiency wavelength conversion. The conversion efficiency increases as the pump intensity increases. When the conversion efficiency value reaches a maximum value, the increase in pump intensity has almost no effect on the conversion efficiency. However, changes in temperature and incident wavelength have little effect on the conversion efficiency. The above research can provide a theoretical basis for the acquisition of ultraviolet to mid-infrared light sources and the manufacture of photonic devices.

**Keywords:** KTP crystal, stark-chirped rapid adiabatic passage, wavelength conversion

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Ky, 42.50.Hz, 42.65.Sf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20210887

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2015A030313383).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [cschen@aiofm.ac.cn](mailto:cschen@aiofm.ac.cn)