

文章编号: 0258-7025(2007)07-0915-05

MgO:LiNbO₃ 晶体中超短中红外非共线 相位匹配光参量放大过程角度的优化选择

邓 颖¹, 朱启华¹, 曾小明¹, 张 颖^{1,2}, 王凤蕊¹,
谢旭东¹, 王 逍¹, 黄 征¹, 郭 仪¹, 孙 立¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川 绵阳 621900; ² 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要 计算了 MgO:LiNbO₃ 中超短中红外光参量放大(OPA)过程中晶体的相位匹配角与非共线角的优化选择。结果表明,对于 800 nm 波长的抽运光,信号光波长为 1053 nm 时,非共线角 α 优化在 1.74°~2° 之间;当信号光波长在 1046~1067 nm 内变化时, α 在 1.05°~2.18° 之间,并且当信号光波长为 1057 nm, $\alpha = 1.76^\circ$ 时,可实现三波间群速度的完全匹配。同时还得到了抽运光中心波长在 780~810 nm 之间变化时,实现完全群速度匹配时的注入信号光波长与对应的中红外光以及相应的非共线角与相位匹配角。

关键词 非线性光学;超短中红外激光;群速度匹配;非共线相位匹配光参量放大;MgO:LiNbO₃ 晶体
中图分类号 O 437.4 **文献标识码** A

Angle Optimization for Ultra-Short Mid-Infrared Non-Collinear Phase Matching Optical Parametric Amplification in MgO:LiNbO₃ Crystal

DENG Ying¹, ZHU Qi-hua¹, ZENG Xiao-ming¹, ZHANG Ying^{1,2}, WANG Feng-ru¹,
XIE Xu-dong¹, WANG Xiao¹, HUANG Zheng¹, GUO Yi¹, SUN Li¹

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
² Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The phase matching angle and the non-collinear angle for ultrashort and mid-infrared optical parametric amplification (OPA) in MgO:LiNbO₃ are calculated. With pump light wavelength fixed at 800 nm, the non-collinear angle should be optimized between 1.74° and 2° when the seeded signal wavelength is 1053 nm, and the non-collinear angle should be optimized between 1.05° and 2.18° when the seed signal wavelength changes between 1046 and 1067 nm. Especially, when the seeded signal wavelength is 1057 nm and the non-collinear angle is 1.76°, the group velocities mismatching can be almost completely compensated with the pump light wavelength fixed at 800 nm. The series of signal light wavelength, mid-infrared light phase matching angle and non-collinear angle are also achieved when the group velocities are almost completely compensated with the pump light changing between 780 and 810 nm.

Key words nonlinear optics; ultra-short mid-infrared laser; group velocity matching; non-collinear phase matching optical parametric amplification; MgO:LiNbO₃ crystal

1 引 言

超短中红外激光脉冲是研究窄能隙半导体和超晶格多量子阱带间瞬态光跃迁过程、半导体光激发

动力学以及分子内和分子间能量转移和解相现象等的重要手段^[1,2]。此外,3~5 μm 是大气的传输窗口,该波段激光对大雾、烟尘等具有较强的穿透力,在海平面上传输受到气体分子散射小。红外制

收稿日期:2006-11-21;收到修改稿日期:2007-01-29

作者简介:邓 颖(1981—),女,满族,辽宁人,硕士研究生,主要从事高功率激光技术研究。E-mail:tjudengying@sina.com

导师简介:朱启华(1969—),男,四川人,研究员,硕士生导师,主要从事高功率固体脉冲激光放大系统研究。

E-mail:qhzh@sina.com

导导弹和红外预警系统等的探测器都对该波段敏感^[3,4],超短中红外激光脉冲可以在瞬间提供很高的峰值功率损伤这些探测器件。因此,高功率的超短中红外激光脉冲在未来光电对抗中可能具有很多潜在应用,许多国家都在进行这方面的研究^[5]。产生超短中红外激光脉冲的方法有很多,其中参量放大是产生高功率超短中红外激光的主要手段^[6~9]。对于超短脉冲激光的参量放大,必须考虑三波在晶体中的群速度失配。采用非共线相位匹配方式可以实现三波间的群速度失配,从而抑制其时间走离^[10,11]。但目前所报道的主要是 BBO 晶体的非共线相位匹配,未见关于 MgO:LiNbO₃ 晶体中非共线相位匹配情况的计算。本文主要计算了利用 MgO:LiNbO₃ 晶体的非共线相位匹配光参量放大(NOPA)来产生超短中红外激光脉冲过程中,相位匹配角与非共线角的优化选择。对采用此晶体进行高功率激光变频应用将有一定的指导作用。

2 相位匹配与群速度失配

MgO:LiNbO₃ 晶体具有与 LiNbO₃ 晶体类似的透光范围,虽然晶体尺寸和光学均匀性不如 LiNbO₃ 晶体,但是其抗激光损伤阈值比 LiNbO₃ 晶体高 100 倍,因而在超短激光脉冲的频率变换领域中有着广泛的应用。

图 1 为非共线相位匹配的三波矢量图,其中 θ

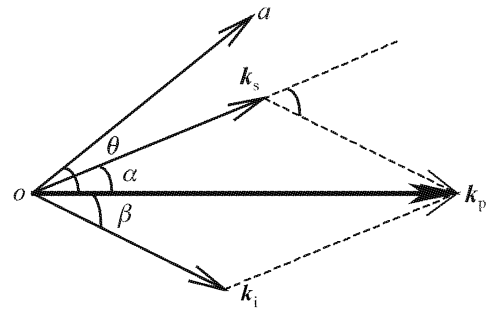


图 1 非共线相位匹配三波矢量图

Fig. 1 Vectorgraph of non-collinear phase matching

为相位匹配角, α 为信号光与抽运光之间的夹角,即本文所要优化的非共线角; β 为中红外闲频光与抽运光之间的夹角。 k_p, k_s, k_i 分别为抽运光、信号光与中红外闲频光的波矢量。参量放大必须满足动量守恒与能量守恒公式

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad k_p = k_s + k_i, \quad (1)$$

式中 $\omega_p, \omega_s, \omega_i$ 分别为抽运光、信号光和中红外闲频光的频率。

非共线相位匹配光参量放大条件下, (1) 式改写为

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad \frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} \cos \alpha + \frac{n_i}{\lambda_i} \cos \beta, \quad (2)$$

式中 $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i, n_p, n_s, n_i$ 分别为抽运光、信号光与中红外闲频光对应的波长及折射率。

结合折射率椭球公式, 得到负单轴晶体 I 类相位匹配的情况下 ($e \rightarrow o + o$) 相位匹配角公式

$$\sin^2[\theta(\lambda_s, \alpha)] = \frac{\lambda_s^2 \lambda_i^2 n_o^2(\lambda_p) n_e^2(\lambda_p) - n_e^2(\lambda_p) (n_s \lambda_p \lambda_i \cos \alpha + n_i \lambda_p \lambda_s \cos \beta)^2}{[n_o^2(\lambda_p) - n_e^2(\lambda_p)] (n_s \lambda_p \lambda_i \cos \alpha + n_i \lambda_p \lambda_s \cos \beta)^2}, \quad (3)$$

式中 n_o, n_e 为主轴折射率。这里主要计算 MgO:LiNbO₃ 晶体的角度参数, 采用塞耳迈耶尔(Sellmeier)方程有^[12]

$$n_o^2 = 4.9048 + 0.11768/(\lambda^2 - 0.04750) - 0.027169\lambda^2,$$

$$n_e^2 = 4.5820 + 0.099169/(\lambda^2 - 0.04443) - 0.02195\lambda^2,$$

晶体中的群速度延迟系数为

$$\beta_1 = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) = \frac{n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega} = \frac{n}{c} - \frac{\lambda}{c} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (4)$$

n 为光波在晶体中的折射率。

非共线相位匹配情况下信号光与抽运光之间以及中红外闲频光与抽运光之间的群速度失配定义为

$$gvm_{sp} = \beta_{1s} \cdot \cos \alpha - \beta_{1p}, \quad gvm_{ip} = \beta_{1i} \cdot \cos \beta - \beta_{1p}, \quad (5)$$

式中 $\beta_{1s}, \beta_{1i}, \beta_{1p}$ 分别为信号光、中红外闲频光与抽运光的群速度延迟系数。要实现群速度匹配, 需 $gvm_{sp} = gvm_{ip} = 0$ 。从(5)式中可以看出, 当改变非共线角 α 时, 可以使 gvm_{sp} 或 gvm_{ip} 的值为零, 但不一定同时为零, 所以在进行角度优化时, 要综合考虑。

3 非共线相位匹配光参量放大中非共线角的优化选择

3.1 800 nm 激光抽运, 1053 nm 信号光注入的情况

800 nm 波长激光抽运, 1053 nm 波长信号光注

入时,对应的中红外闲频光波长为3330nm。如图2所示, $\alpha = 1.57^\circ$ 时可以实现抽运光与信号光之间的群速度匹配,即 $gvm_{sp} = 0$, 此时的相位匹配角为 50° 。而 $\alpha = 1.9^\circ$ 时,可实现中红外闲频光与抽运光之间的群速度匹配,即 $gvm_{ip} = 0$, 相应相位匹配角分别为 50.9° 。 $\alpha = 1.81^\circ$ 时, $gvm_{sp} = gvm_{ip} =$

2.8 fs/mm。当 α 在 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的范围内变化时,信号光与抽运光的群速度失配在5 fs/mm范围内;而中红外闲频光与抽运光的群速度失配量较大, $gvm_{ip} < 22$ fs/mm。当 α 在 $1.74^\circ \sim 2^\circ$ 范围内变化时,中红外闲频光与抽运光以及信号光与抽运光之间的群速度失配量可以控制在5 fs/mm范围内,对应的相位匹

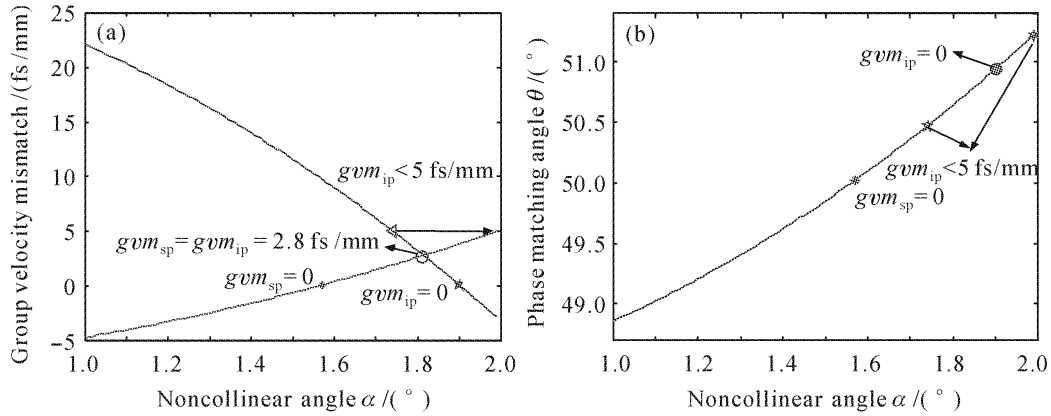


图2 800 nm 抽运光,1053 nm 信号光注入下非共线角的优化选择(a)以及此时相位匹配角随非共线角的变化(b)
Fig. 2 Non-collinear angle (a) and phase matching angle (b) optimization with 1053 nm seed signal pulse and 800 nm pump pulse

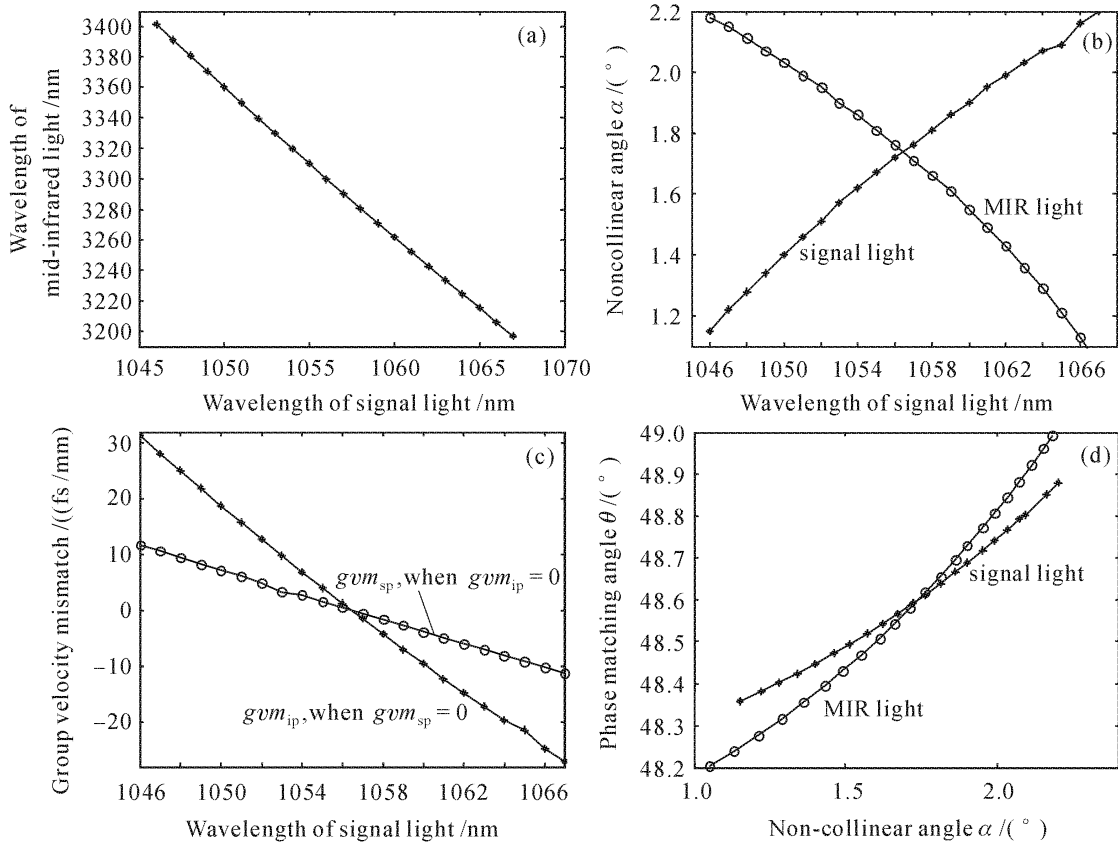


图3

(a) 信号光波长为 1046~1067 nm 时输出的中红外闲频光波长; (b) 信号光波长为 1046~1067 nm 时,信号光和中红外闲频光的角度优化; (c) 分别对 gvm_{sp} 和 gvm_{ip} 优化时,相应另一个值的变化情况; (d) 分别对信号光与中红外闲频光优化时,相位匹配角的变化情况

Fig. 3

(a) mid-infrared wavelengths versus seed signal wavelength; (b) non-collinear angle optimization for signal pulse and mid-infrared pulse versus seed signal wavelength; (c) gvm_{ip} 's change when optimization for gvm_{sp} 's and the reverse; (d) phase matching angle changing with optimized signal pulse and mid-infrared pulse

配角在 $50.5^\circ \sim 51^\circ$ 之间,此时对于100 fs的脉冲,晶体长度可达到20 mm以上。

3.2 800 nm 激光抽运,不同信号光波长注入的情况

图 3 为 800 nm 抽运下,注入信号光波长在 1046~1067 nm 内变化时,分别对信号光与中红外闲频光非共线角的优化与相应的相位匹配角的变化情况。

图 3(a)计算了对应的中红外闲频光,当信号光波长在 1046~1067 nm 内变化时输出的中红外闲频光波长在 3197~3402 nm 范围内线性变化。可见当信号光波长在 1046~1067 nm 范围内调谐时,输出的中红外闲频光有 200 nm 的调谐范围。图 3(b)给出了当信号光波长在 1046~1067 nm 之间变化,当 $gvm_{sp} = 0, gvm_{ip} = 0$ 时,非共线角随信号光波长的变化。

图 3(c)计算了当 $gvm_{sp} = 0$ 时,对应的中红外闲频光与抽运光之间的群速度失配量,以及当

$gvm_{ip} = 0$ 时,对应的信号光与抽运光之间的群速度失配量。可见当注入信号光波长在 1046~1067 nm 内变化时,对信号光的非共线角的优化在 $1.15^\circ \sim 2.2^\circ$ 之间,此时对应的中红外闲频光与抽运光之间的群速度失配量在 $-27 \sim 31$ fs/mm 内。而中红外闲频光的非共线角优化在 $1.05^\circ \sim 2.18^\circ$ 之间时,对应的信号光与抽运光之间的群速度失配量在 $-11 \sim 11$ fs/mm 内。因此,取对中红外闲频光优化的角度更有益于光参量放大过程;并且当注入信号光波长为 1057 nm 时(相应的中红外闲频光波长为 3290 nm),存在一个可同时实现三波群速度匹配的最佳非共线角 $\alpha = 1.76^\circ$ 。

图 3(d)分别计算了 $gvm_{sp} = 0$ 与 $gvm_{ip} = 0$ 时,相应相位匹配角的变化情况。当 $gvm_{sp} = 0$ 时,相位匹配角在 $48.4^\circ \sim 48.9^\circ$ 之间;当 $gvm_{ip} = 0$ 时,相位匹配角在 $48.2^\circ \sim 49^\circ$ 之间。当非共线角 $\alpha = 1.76^\circ$ 时,相位匹配角为 48.6° 。

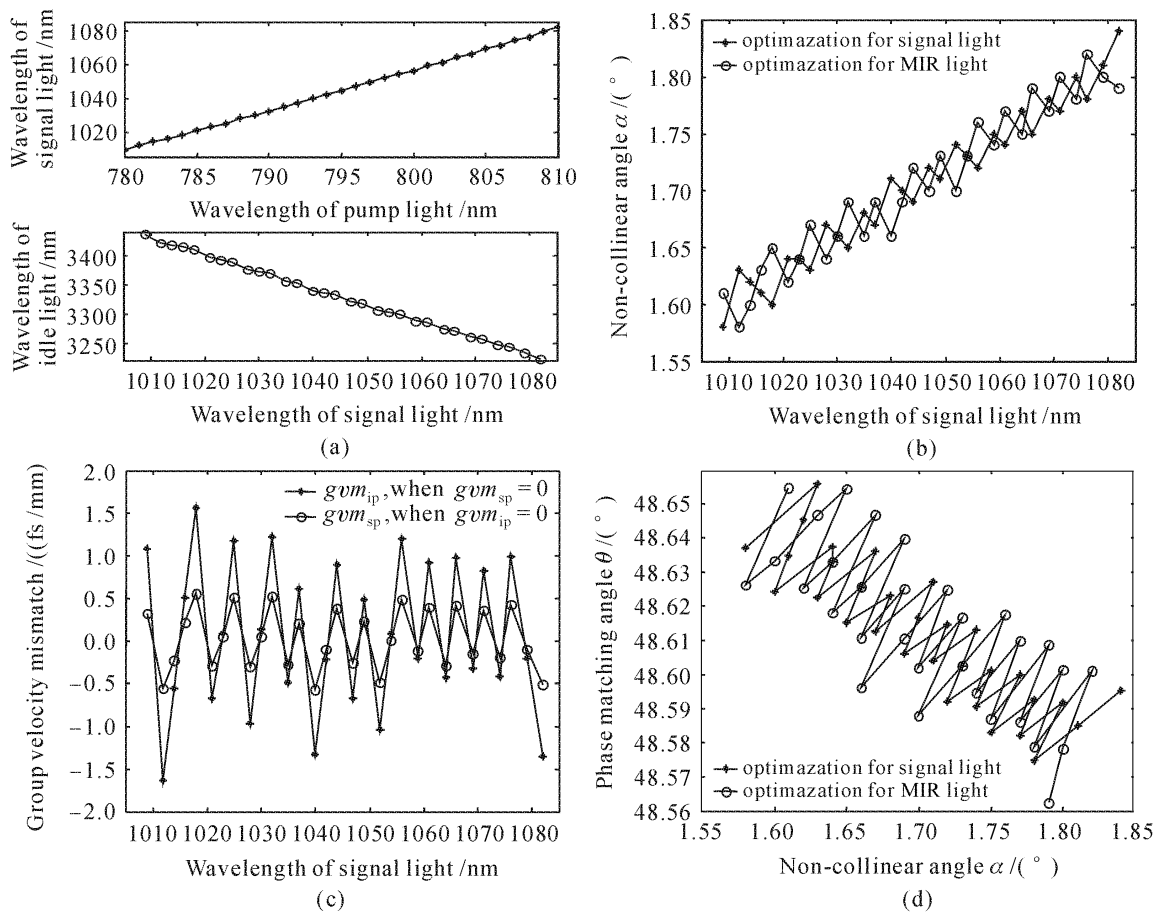


图 4

(a) 不同抽运下,近似完全群速度匹配对应的信号光与中红外闲频光;(b) 图 4(a)对应的非共线角的优化选择;
(c) 在图 4(b)情况下,两个群速度失配量的变化情况;(d) 图 4(c)对应的相位匹配角

Fig. 4

(a) signal and mid-infrared light under the condition of group velocities matching with different pump wavelength; (b) non-collinear angles choosing under the condition of Fig. 4(a); (c) group velocities mismatch under the condition of Fig. 4(b); (d) phase matching angles under the condition of Fig. 4(c)

3.3 不同抽运中心波长的情况

图 4 为抽运光波长在 780~810 nm 下,对信号光波长、相应非共线角、相应的群速度失配量与相位匹配角的优化计算。

图 4(a) 计算了抽运光中心波长在 780~810 nm 范围内变化时,近似完全实现群速度匹配(一个群速度失配量为零,另一个群速度的失配量小于 2 fs/mm)时的信号光波长与中红外闲频光波长的优化情况。可见当抽运光中心波长在 780~810 nm 范围内变化时,近似完全实现群速度匹配时的信号光波长应选在 1009~1082 nm 之间,对应的中红外闲频光波长在 3222~3437 nm 之间,约 200 nm 的调谐范围。图 4(b) 计算了对应图 4(a) 情况下,非共线角优化选择在 1.58°~1.84° 之间。图 4(c) 计算了对应图 4(b) 情况下,信号光与抽运光以及中红外闲频光与抽运光之间群速度失配量的变化情况。可见当 $gvm_{sp} = 0$, $\alpha = 1.58^\circ \sim 1.84^\circ$ 时, gvm_{ip} 在 -1.35~1.08 fs/mm 范围内;当 $gvm_{ip} = 0$, $\alpha = 1.61^\circ \sim 1.79^\circ$ 时, gvm_{sp} 在 -0.51~0.32 fs/mm 范围内。图 4(d) 计算了图 4(c) 对应的相位匹配角的变化情况。可见相位匹配角在 48.58°~48.66° 范围内变化,即在 48.6° 左右。

4 结 论

从实现三波群速度匹配的角度出发,分析了 MgO:LiNbO₃ 中超短中红外非共线相位匹配光参量放大过程中,非共线角的优化选择以及相应的相位匹配角变化等情况。分别计算了 800 nm 波长激光抽运,1053 nm 波长信号光注入条件与 800 nm 波长激光抽运,不同信号光波长注入条件以及不同抽运中心波长条件下三种情况。800 nm 波长激光抽运,1053 nm 信号注入时,非共线角应优化在 1.74°~2° 之间,相应的相位匹配角选择在 50.5°~51° 之间;800 nm 波长激光抽运时,存在一个最佳的注入信号波长为 1057 nm 对应的非共线角为 $\alpha = 1.76^\circ$,此时可以近似完全实现群速度匹配,而对应的相位匹配角为 48.6°;当抽运光中心波长在 780~810 nm 范围内变化时,为近似实现完全群速度匹配,信号光波长对应应在 1009~1082 nm 之间,相应的非共线角应优

化在 1.61°~1.79° 内,此时 $gvm_{ip} = 0$ 而 gvm_{sp} 在 -0.51~0.32 fs/mm 范围内,而相位匹配角可选在 48.6° 附近。

参 考 文 献

- Miriam R. X. de Barros, Rubens S. Miranda, Tom M. Jedju *et al.*. High-repetition-rate femtosecond mid-infrared pulse generation [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5):480~482
- Cui Dafu, Zhang Jie. The generation and the recent progress for mid-infrared ultra short pulse [J]. *Physics*, 1996, **23**(3):173~178
崔大复,张杰. 中红外超短脉冲的产生及其研究的最新进展 [J]. *物理*, 1996, **23**(3):173~178
- Ren Guoguang. Status and development trend of airborne laser-based IRCM [J]. *Laser and Infrared*, 2000, **30**(6):323~327
任国光. 机载激光红外对抗的现状和发展趋势 [J]. *激光与红外*, 2000, **30**(6):323~327
- Weng Xiaodong, Xu Jun, Zhou Wenming. Developments of American & Russian anti-satellite weapons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(8):22~25
翁晓东,徐军,周文明. 美俄激光反卫星武器的发展现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(8):22~25
- Deng Ying, Zhu Qihua, Zeng Xiaoming *et al.*. The generation and recent progress of ultrashort mid-infrared pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(8):21~26
邓颖,朱启华,曾小明等. 超短中红外激光脉冲的产生及其发展状况分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(8):21~26
- Jiun-Cheng Wang, Juen-Kai Wang. Experimental and theoretical analysis of white-light seeded, collinear phase-matching, femtosecond optical parametric amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(1):45~56
- G. R. Holtom, R. A. Crowell. Femtosecond mid-infrared optical parametric oscillator based on CsTiOAsO₄ [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18):1880~1882
- V. Petrov, F. Noack. Narrow-band seeding of an optical parametric amplifier in the femtosecond regime [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1996, **28**(8):1105~1110
- Shujie Lin, Takanori Suzuki. Tunable picosecond mid-infrared pulses generated by optical parametric generation/amplification in MgO:LiNbO₃ crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8):579~581
- Deng Ying, Zhu Qihua, Zhang Ying *et al.*. Temporal and spatial walk-off for ultra-short mid-infrared optical parametric amplification [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1):14~18
邓颖,朱启华,张颖等. 超短中红外参量放大过程的时空走离特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1):14~18
- Ma Jing, Zhang Ruobing, Zhang Weili *et al.*. Compensation of group velocity mismatching of three pulses in femtosecond optical parametric amplification [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2):755~761
马晶,章若冰,张伟力等. 飞秒光参量放大中三波群速失配的补偿 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(2):755~761
- Zhang Kecong, Wang Ximin. Nonlinear Optical Crystal Materials Science [M]. Beijing: Science Press, 2005
张克从,王希敏. 非线性光学晶体材料科学 [M]. 北京:科学出版社, 2005