

基于电光调制的 DKDP 晶体 OPCPA 增益 带宽特性研究

孙子茗^{1,2}, 刘德安^{1*}, 韩璐^{1,2}, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于电光效应的新型光参量放大方案, 理论分析了磷酸二氘钾(DKDP)晶体增益带宽随氘化率的变化特性, 研究了 70% 和 95% 氘化率的 DKDP 晶体在不同电场强度下的增益带宽变化特性。在 885 nm 中心波长处, 对 70% 氘化率的 DKDP 晶体施加大小为 1.67×10^5 V/m 的场强时, 增益带宽可从 90 nm 拓宽至 124 nm; 在 808 nm 中心波长处, 对 95% 氘化率的 DKDP 晶体施加大小为 1×10^5 V/m 的场强时, 增益带宽可从 52 nm 拓宽至 68 nm。结果表明, 在光学参量放大系统中, 通过线性电光效应可以有效拓宽系统的增益带宽, 同时可通过电光调制调节增益谱的中心波长, 以进行连续波长调谐, 在高能超短激光系统中具有很大的应用前景。

关键词 非线性光学; 磷酸二氘钾晶体; 宽带光参量放大; 电光效应; 增益带宽

中图分类号 O437.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1008001

Study on Gain Bandwidth Characteristics of DKDP-OPCPA Based on Electro-Optic Modulation

Sun Ziming^{1,2}, Liu Dean^{1*}, Han Lu^{1,2}, Zhu Jianqiang¹

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, a new optical parametric amplification scheme based on electro-optic effect is proposed. The change characteristics of gain bandwidth of potassium deuterium phosphate (DKDP) crystal are theoretically analyzed with the change of deuteration rate, and the variation characteristics of gain bandwidth of DKDP crystal with 70% and 95% deuteration rate under different electric field intensities are studied. At 885 nm central wavelength, the gain bandwidth of DKDP crystal with 70% deuteration rate can be broadened from 90 nm to 124 nm when the electric field strength of 1.67×10^5 V/m is applied. At 808 nm central wavelength, the gain bandwidth of DKDP crystal with 95% deuteration rate can be broadened from 52 nm to 68 nm when the applied electric field is 1×10^5 V/m. The results show that the linear electro-optic effect can effectively broaden the gain bandwidth of the optical parametric amplification system, and the central wavelength of the gain spectrum can be adjusted by electro-optic modulation to achieve continuous wavelength tuning. It has a great application prospect in high-energy ultrashort laser system.

Key words nonlinear optics; potassium deuterium phosphate crystal; broadband optical parametric amplification; electro-optic effect; gain bandwidth

OCIS codes 060.4370; 320.7110; 320.7150

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-05-08; 录用日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(11774364)、中国科学院国际合作项目(181231KYSB20170022)、上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1425900)

* E-mail: liudean@siom.ac.cn

1 引 言

自啁啾脉冲放大(CPA)技术提出以来,超短超强激光系统迅速发展^[1-3],目前已经建成很多PW量级激光系统,甚至着手发展EW量级超高功率飞秒激光器^[4-6]。光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术作为一种超短高能激光放大技术,结合了CPA技术与光参量放大(OPA)技术的优势,具有更高的单程增益、更宽的增益带宽、更小的热畸变与B积分以及更高的信噪比,可以有效提高现有激光系统的峰值功率。随着克尔透镜锁模技术的发展以及新型非线性材料的出现,可以得到更可靠的抽运源和高性能非线性晶体,拓宽了激光的调谐波长范围,使OPCPA技术满足非线性光学、生物医疗和光谱学等领域的需求^[7-9]。

磷酸二氧钾(DKDP)晶体是一种电光和非线性光学性质优良的功能晶体材料,具有透光波段宽、电光系数大以及抗激光损伤阈值高等优点^[10],常用于铍玻璃、Nd:YAG等激光器的二次、三次、四次谐波产生,是优质的高功率激光频率转换材料^[11]。目前已经研发出多种性能优异的电光和非线性光学材料,如LiNbO₃(LN)、KTiOPO₄(KTP)、BaB₂O₄(BBO)、LiB₃O₅(LBO)以及KBe₂BO₃F₂(KBBF),虽然这些材料在某些方面(如透光波段、非线性系数、激光损伤阈值)优于DKDP晶体^[12],但DKDP晶体能快速生长成大口径非线性晶体,且能通过调节氘化率获得不同的匹配特性^[13]。当OPCPA/放大器需要达到数百J甚至更高的信号光能量输出时,其非线性晶体口径需要大于150mm,因此,DKDP晶体在基于OPCPA技术的超强激光系统中得到了广泛应用^[14-16]。

尽管OPCPA技术可以实现较宽的增益带宽,但对于光周期量级的时间尺度和PW量级的峰值功率,依旧面临增益带宽受限的难题。因此,本文提出了一种基于电光效应的新型OPA技术方案,并对该方案进行了理论分析和数值模拟。讨论了不同氘化率DKDP晶体的增益带宽特性,研究了电光调制对70%和95%氘化率DKDP晶体增益特性的影响,为基于OPCPA技术的PW量级激光系统提供了理论支撑。

2 DKDP晶体的增益带宽特性

DKDP晶体的匹配特性随氘化率的变化而变化,因此在OPA系统中,可利用该特性结合电光特

性,有效减少相位失配量,从而获得更宽的增益带宽^[17]。

2.1 增益带宽

OPA信号光的放大增益可通过数值求解耦合波方程获得,若在光参量放大过程中不考虑抽运光的抽空效应,且参量光脉宽都在ns量级,群速度失配可以忽略不计。满足相位匹配条件时,信号光通过非线性晶体后的强度增益G可表示为

$$G = 1 + (\gamma L)^2 \left(\frac{\sinh A}{A} \right)^2, \quad (1)$$

其中,

$$A = [(\gamma L)^2 - B^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$B = \frac{\Delta k L}{2}, \quad (3)$$

$$\gamma = 4\pi d_{\text{eff}} \left(\frac{I_p}{2\epsilon_0 n_p n_s n_i c \lambda_s \lambda_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中, γ 为有效增益系数, ϵ_0 为真空介电常数, c 为光在真空中的传播速度, n 为折射率, λ 为波长,下标s、i和p分别为信号光、闲频光和抽运光, L 为晶体的长度, I_p 为抽运光强度, d_{eff} 为有效非线性系数,对于DKDP晶体, $d_{\text{eff}} = d_{36} \sin \theta_3 \sin 2\varphi$,其中, d_{36} 为非线性极化张量矩阵的系数, θ_3 为波矢与Z轴的夹角, φ 为波矢在X-Y平面的投影与X轴的夹角, Δk 为光学参量放大过程中的相位失配量,通常情况下,小信号增益系数G可近似为

$$G = 0.25 \cdot \exp \left\{ 2 \left[L^2 - \left(\frac{\Delta k}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \gamma \right\}. \quad (5)$$

通常定义 $G = 0.5G_0$ 的参量光波长范围为增益带宽,其中, G_0 为完全相位匹配($\Delta k = 0$)时的增益。可以发现,增益G与相位失配量 Δk 有关,而 $\Delta k_{\parallel} = \frac{2\pi n_p}{\lambda_p} - \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} \cos \alpha - \frac{2\pi n_i}{\lambda_i} \cos \beta$, $\Delta k_{\perp} = \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} \sin \alpha - \frac{2\pi n_i}{\lambda_i} \sin \beta$,其中, α 为信号光与抽运光的夹角, β 为闲频光与抽运光的夹角, Δk_{\parallel} 和 Δk_{\perp} 分别为平行和垂直信号光方向的相位失配系数。只考虑平行信号光的失配,将垂直分量认为是自动耦合匹配($\Delta k_{\perp} = 0$),即 Δk_{\parallel} 随折射率的变化而变化,因此可通过改变非线性晶体的折射率调节增益带宽。

允许相位失配量的范围为 $|\Delta k| \leq \frac{\pi}{L}$,取 $L = 30$ mm,则其最大允许相位失配量为104.7 rad/m,要获得更宽的增益带宽,则允许相位失配量覆盖的波长范围要更大。不同氘化率的DKDP晶体折射

率不同,模拟得到不同氘化率 DKDP 晶体的相位失配量情况如图 1 所示。可以发现,808 nm 中心波长处允许相位失配覆盖的波长范围随晶体氘化率的增加而增加,因此可通过改变晶体氘化率改变增益带宽。

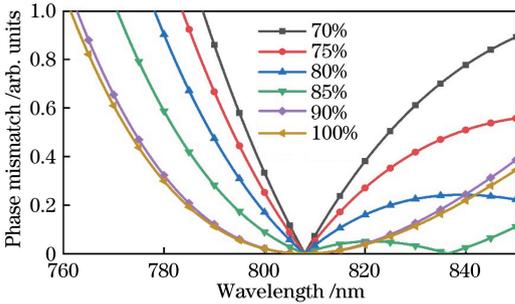


图 1 DKDP 晶体氘化率与相位失配的关系

Fig. 1 Relationship between the deuteration rate of DKDP crystal and the phase mismatch

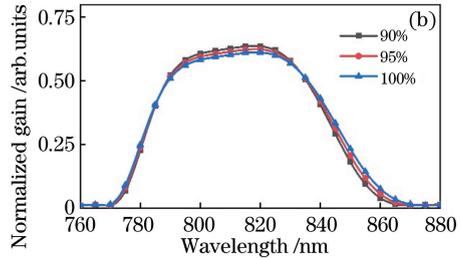
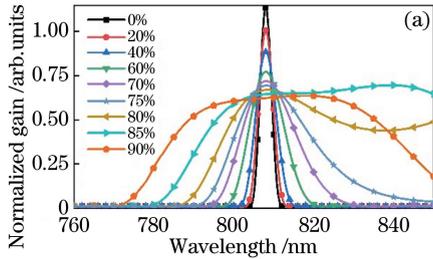


图 2 增益带宽随氘化率的变化曲线。(a)氘化率为 0%~90%;(b)氘化率为 90%~100%

Fig. 2 Change curves of gain bandwidth with deuteration rate. (a) Deuteration rate is 0%–90%; (b) deuteration rate is 90%–100%

图 3 为抽运光强度为 2 GW/cm^2 时晶体的能量转化效率,可以发现,95%氘化率 DKDP 晶体在非共线的 OPA 情况下更易发生转化,信号光的转化效率明显高于 70%氘化率的共线 OPA 转化效率。图 4 为信号光(波长为 808 nm)、抽运光(波长

2.2 DKDP 晶体氘化率对增益带宽的影响

为了更好地研究电光调制对增益带宽的影响,计算了不同氘化率晶体在相位匹配和群速匹配条件下的增益带宽。计算时,注入的抽运光强度为 2 GW/cm^2 ,晶体口径为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,长度为 30 mm。DKDP 晶体的折射率随氘化率的变化而变化,其对应的最佳非共线角也会变化。图 2 为不同氘化率下 DKDP 晶体在其最佳非共线角情况下的增益带宽变化特性,可以发现,808 nm 中心波长处的增益带宽随 DKDP 晶体氘化率的增加迅速变宽,且增益强度随氘化率的增加逐渐降低。当氘化率高于 90%时,增益带宽不再有显著增加,改变晶体氘化率可使增益带宽从 4 nm 拓宽至 52 nm。考虑到实际情况,选择氘化率分别为 70%和 95%的 DKDP 晶体研究共线相位匹配和非共线相位匹配两种情况的 OPA 转化效率。

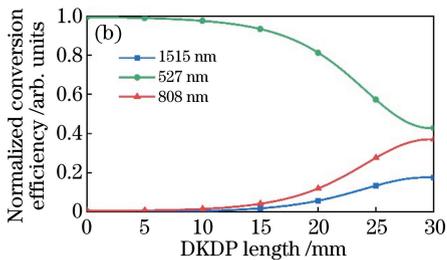
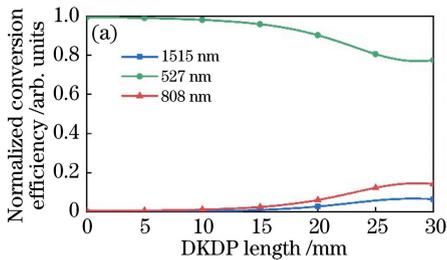


图 3 DKDP 晶体 OPA 过程中的能量转化效率。(a) 70%氘化率;(b) 95%氘化率

Fig. 3 Energy conversion efficiency in the OPA process of DKDP crystal.

(a) Deuteration rate is 70%; (b) deuteration rate is 95%

2.3 DKDP 晶体电光调制对增益带宽的影响

DKDP 晶体用作电光晶体时,外加电场 E 的方向平行于光轴 z 方向,此时 DKDP 晶体由单轴晶体

变为双轴晶体,如图 5 所示。在外电场作用下,新的折射率椭球主轴 x' 和 y' 的折射率大小与电场强度呈线性关系^[18-19],可表示为

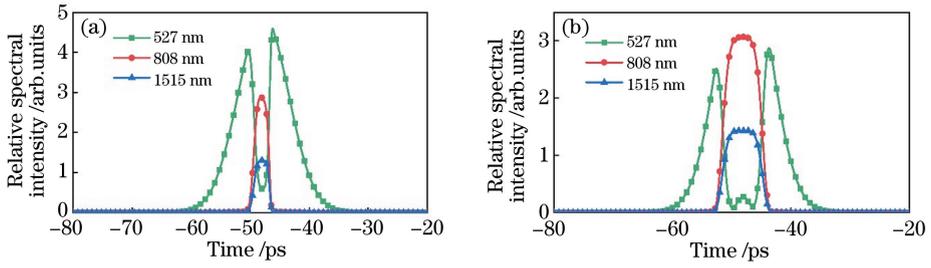


图 4 DKDP 晶体 OPA 过程时域波形。(a) 70% 氘化率; (b) 95% 氘化率

Fig. 4 Time-domain waveform in OPA process of DKDP crystal. (a) Deuteration rate is 70%; (b) deuteration rate is 95%

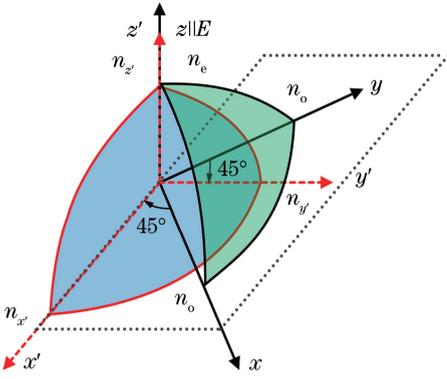


图 5 沿 z 轴加外部电场的 DKDP 晶体(1/8 椭球)

Fig. 5 DKDP crystal with external electric field applied along the z axis (1/8 ellipsoid)

$$n_{x'} = n_o - \frac{n_o^3 r_{63} E}{2}, \quad (6)$$

$$n_{y'} = n_o + \frac{n_o^3 r_{63} E}{2}, \quad (7)$$

$$n_{z'} = n_e, \quad (8)$$

式中, n_o 和 n_e 分别为寻常光折射率和非常光折射率, $n_{x'}$ 、 $n_{y'}$ 、 $n_{z'}$ 分别为新的主轴折射率, r_{63} 为线性电光系数, $E = V/d$ 为电场强度, 其中, V 和 d 分别为电压和晶体的厚度。

不仅可以调节氘化率改变 DKDP 晶体的折射率, 也可以利用线性电光效应改变折射率, 从而调节频率变换过程中的带宽。图 6 为氘化率分别为 70% 和 95% 的 DKDP 晶体在不同电场强度下的相位失配量变化曲线, 可以发现, 在一定电压范围内, 允许相位失配量覆盖的波长范围随电场强度的变化而变化, 因此, 可以通过改变电场强度改变增益带宽。

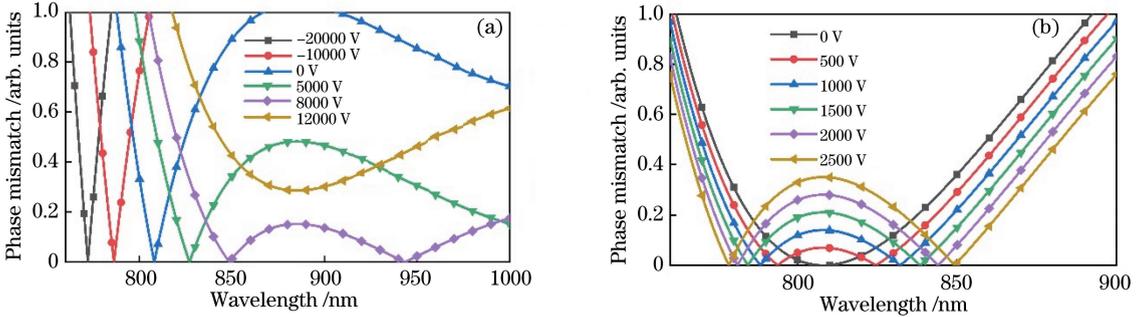


图 6 施加不同电压时 DKDP 晶体的相位失配。(a) 70% 氘化率; (b) 95% 氘化率

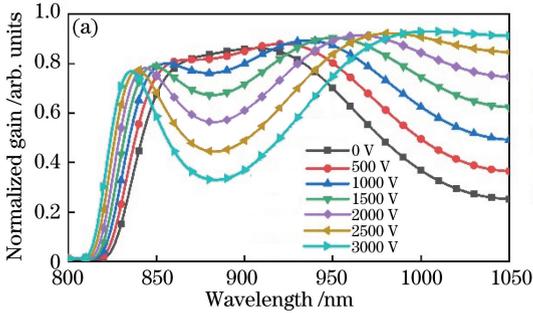
Fig. 6 Phase mismatch of DKDP crystal when different voltages are applied.

(a) Deuteration rate is 70%; (b) deuteration rate is 95%

选取氘化率为 70% 和 95% 的 DKDP 晶体, 进一步研究电光调制对共线相位匹配与非共线相位匹配条件下增益带宽的影响。由于氘化率低于 85% 的 DKDP 晶体在共线匹配中获得的最大参量带宽小于 40 nm, 考虑到一定的冗余度, 不适合用波长为 808 nm 且脉宽小于 50 fs 的超短超强激光系统^[20]。模拟发现氘化率为 70% 的 DKDP 晶体仅在 885 nm 中心波长处用共线相位匹配对晶体 z 轴施加负向电压时, 增益谱的中心波长才不会发生偏移, 从而产

生增益带宽特性变化。图 7(a) 为向 70% 氘化率 DKDP 晶体施加 0~3 kV 的电压后, 在 885 nm 中心波长处的增益带宽变化特性。可以发现, 未加电压时, 晶体在 885 nm 中心波长处的相位匹配角为 37.98° 。相比场强为 0 V/m 时, 电场强度为 1.67×10^5 V/m 时的增益带宽从 90 nm 拓宽至 124 nm。虽然增益谱的宽度仍随场强的增加而增加, 但在 885 nm 中心波长处出现凹陷, 且电压越大凹陷越深, 谱宽迅速变窄, 使压缩后输出的脉冲宽度变宽。

图 7(b)为 95%氘化率 DKDP 晶体在 808 nm 中心波长处用非共线相位匹配的情况,与 70%氘化率 DKDP 晶体在 885 nm 中心波长处的增益带宽变化特性类似,未施加电压时,相位匹配角为 36.7°,最佳非共线角为 0.49°,电压的方向沿 z 轴负方向。



起初增益带宽随电压的增加而增加,当场强达到 1×10^5 V/m 时,增益带宽最宽可达 68 nm,当场强大于 1×10^5 V/m 时,在 808 nm 中心波长处增益谱出现凹陷,谱宽迅速变窄,导致无法输出理想的超短脉冲。

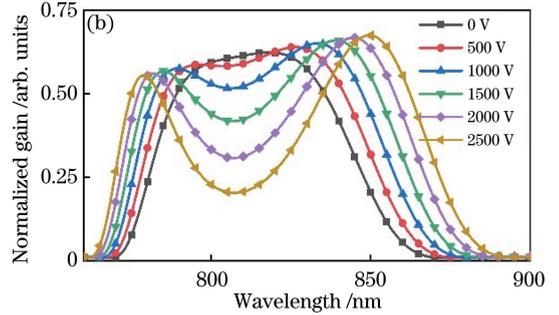


图 7 DKDP 晶体在中心波长处的增益带宽变化特性。(a) 70%氘化率;(b) 95%氘化率
Fig. 7 Gain bandwidth variation characteristics of DKDP crystal at the center wavelength.

(a) Deuteration rate is 70%; (b) deuteration rate is 95%

综上所述,氘化率为 70%和 95%的 DKDP 晶体分别在 885 nm 和 808 nm 中心波长处的增益带宽对外加电场强度的变化非常敏感。通过电光调制,可使 70%氘化率的晶体增益带宽从 90 nm 拓宽至 124 nm,拓宽了 37.8%,使 95%氘化率的晶体增益带宽从 52 nm 拓宽至 68 nm,拓宽了 30.8%,这表明电光调控的方法在发展大能量短脉宽的强激光装置中有很大的应用潜力。

3 DKDP 的电光调谐特性

由于参量放大过程中的增益波长只和相位匹配波长相关,因此,可通过调节晶体的相位匹配实现波长调谐输出。调谐方式可分为电光调谐、温度调谐、角度调谐以及极化周期调谐,其中,极化周期调谐是针对准相位匹配的周期极化晶体而言^[21],电压、温度和角度调谐则是普适性的调谐方式。由于电压调节具有更高的灵活性和精确度,因此广泛应用于生

物医学、材料科学、激光光谱学以及化学等领域。

图 8 为氘化率分别为 60%和 70%的 DKDP 晶体在 808 nm 中心波长处采用共线相位匹配的情况下,增益特性随电压的变化趋势。可以发现,60%与 70%氘化率的晶体变化趋势相同。未施加电压时,两块晶体的信号光中心波长为 808 nm;对晶体施加反向电压时,晶体增益谱的中心波长向短波长方向偏移,增益带宽逐渐变窄;对晶体施加正向电压时,晶体增益谱的中心波长向长波长方向偏移,增益带宽逐渐变宽。对于 60%氘化率的晶体,当反向电压达到 30 kV 时,其中心波长偏移到 772 nm 处,正向电压达到 25 kV 时,其中心波长偏移到 976 nm 处;对于 70%氘化率的晶体,当反向电压达到 30 kV 时,其中心波长偏移到 762 nm 处,正向电压超过 7 kV 时,其中心波长稳定在 885 nm 不再随电压增加而偏移。60%氘化率的晶体连续可调谐范围比 70%氘化率的晶体约宽 80 nm,且在调谐过程中

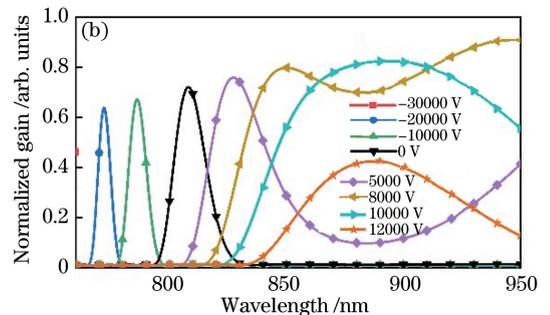
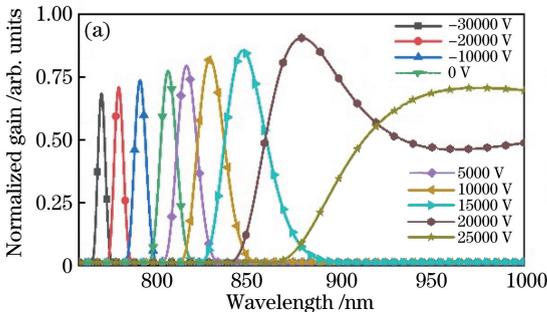


图 8 施加不同电压时 DKDP 晶体的增益谱特性。(a) 60%氘化率;(b) 70%氘化率
Fig. 8 Gain spectrum characteristics of DKDP crystal when different voltages are applied.

(a) Deuteration rate is 60%; (b) deuteration rate is 70%

60%氘化率的晶体增益强度也高于70%氘化率的晶体,但70%氘化率的晶体在各个调谐波段的增益带宽均比60%氘化率的晶体宽。

氘化率分别为60%、65%、70%与75%的DKDP晶体增益谱的中心波长随外加电压的变化趋势如图9所示。由于DKDP晶体的电光系数 γ_{63} 与氘化率成线性关系^[22],结合(3)式~(5)式可知,晶体的电光系数随氘化率的增加而增加,且中心波长对电压的变化更敏感。可以发现,氘化率越高,曲线斜率越大,调谐所需的电压越低,但可连续调谐的范围变小。当正向电压超过一定范围时,信号光与闲频光的增益谱会发生简并,导致中心波长突然大幅度偏移,不再连续可调谐;当电压继续增加,60%、65%、70%与75%氘化率晶体增益谱的中心波长会分别稳定在1053,1053,885,861 nm,且不再随电压的变化而变化。

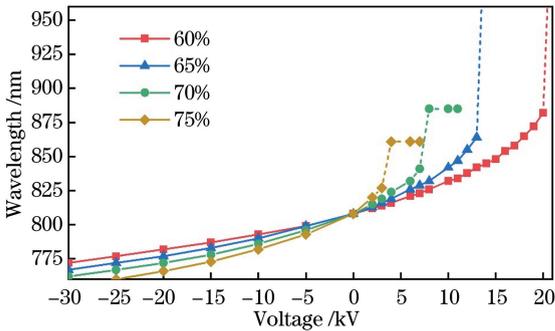


图9 不同氘化率DKDP晶体的增益谱中心波长与外加电压的关系

Fig. 9 Relationship between the center wavelength of the gain spectrum of DKDP crystals with different deuteration rates and the applied voltage

综上所述,可通过调节不同氘化率DKDP晶体外加电压的大小与方向实现近红外波段的波长调谐。实际应用中,可综合考虑调谐范围、电压的灵敏度、增益带宽、稳定性等因素,选择不同氘化率的DKDP晶体,为可调谐的OPA激光系统提供一种可行的调谐方案。

4 结 论

从理论上分析了电光调制对非线性晶体DKDP OPA增益带宽的影响,结果表明,DKDP晶体的增益带宽对晶体的氘化率和晶体外加电场的变化非常敏感。对于氘化率为70%的DKDP晶体,通过电光调制可以实现762~841 nm范围内的连续波长调谐,且在885 nm中心波长处的增益带宽从90 nm拓宽至124 nm。对于氘化率为95%的DKDP晶

体,当外加电场达到 1×10^5 V/m时,可使808 nm中心波长处的增益带宽从52 nm拓宽至68 nm。仿真结果表明,部分掺氘DKDP晶体以及线性电光效应应用在OPCPA系统中可以有效拓宽增益带宽,同时通过波长连续可调谐能实现一定波段的OPA,对进一步缩短OPCPA系统的脉冲宽度具有实际参考意义。

参 考 文 献

- [1] Dubietis A, Jonušauskas G, Piskarskas A. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal[J]. Optics Communications, 1992, 88(4/5/6): 437-440.
- [2] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [3] Ye R, Yin M, Wu X Y, et al. Theoretical study of spectrum shaping of chirped pulse in OPCPA with angular spectral dispersion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041901. 叶荣, 阴明, 吴显云, 等. 光谱角色散OPCPA中啾啾脉冲频谱整形的理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041901.
- [4] Cui Z R, Kang J, Xie X L, et al. Compensation for chromatic aberration in femtosecond petawatt laser systems based on zoom image transfer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0905001. 崔自若, 康俊, 谢兴龙, 等. 基于变焦像传递的飞秒拍瓦激光系统色差补偿[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0905001.
- [5] Chu Y, Liang X Y, Yu L, et al. Parasitic lasing suppression in large-aperture Ti:sapphire amplifiers by optimizing the seed-pump time delay[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055302.
- [6] Institute of Applied Physics. Exawatt center for extreme light studies (XCELS) [R]. Russian: The Institute of Applied Physics RAS, 2011.
- [7] Mero M, Sipos A, Kurdi G, et al. Generation of energetic femtosecond green pulses based on an OPCPA-SFG scheme[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9646-9655.
- [8] Wnuk P, Stepanenko Y, Radzewicz C. High gain broadband amplification of ultraviolet pulses in optical parametric chirped pulse amplifier [J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7911-7916.
- [9] Vaughan P M, Trebino R. Optical-parametric-amplification imaging of complex objects[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8920-8929.
- [10] Xu M X, Zhang L S, Liu F F, et al. Effect of

- deuterium content on the optical properties of DKDP crystals[J]. *Crystal Research and Technology*, 2018, 53(6): 1700298.
- [11] Zhang K C, Wang X M. *Nonlinear optical crystal material science*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005.
张克从, 王希敏. *非线性光学晶体材料科学*[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] Li H N, Zhang D C, Zhu J F, et al. Nanosecond mid-infrared tunable parametric laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1114002.
李浩宁, 张大成, 朱江峰, 等. 纳秒中红外可调谐参量激光研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1114002.
- [13] Su G B, Zeng J B, He Y P, et al. Application of large section KDP crystals in the study of laser fusion [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1997, 25(6): 93-95.
苏根博, 曾金波, 贺友平, 等. 大截面 KDP 晶体在激光核聚变研究中的应用[J]. *硅酸盐学报*, 1997, 25(6): 93-95.
- [14] Ross I N, Matousek P, Towrie M, et al. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. *Optics Communications*, 1997, 144(1/2/3): 125-133.
- [15] Lozhkarev V V, Freidman G I, Ginzburg V N, et al. 200 TW 45 fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 446-454.
- [16] Tang Y, Ross I N, Hernandez-Gomez C, et al. Optical parametric chirped-pulse amplification source suitable for seeding high-energy systems[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(20): 2386-2388.
- [17] Cui Z J, Liu D A, Miao J, et al. Phase matching using the linear electro-optic effect [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(4): 043901.
- [18] Boyd R W. *Nonlinear optics* [M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2008.
- [19] Yariv A, Yeh P. *Optical electronics in modern communications* [M]. 6th ed. New York: Oxford University Press, 2007.
- [20] Liang X, Kang J, Sun M Z, et al. 808-nm optical parametric amplification based on DKDP crystals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081901.
- [21] Aadhi A, Chaitanya N A, Jabir M V, et al. All-periodically poled, high-power, continuous-wave, single-frequency tunable UV source [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 33-36.
- [22] Liu W J, Yin X, Wang S L, et al. Dependence of refractive indices on deuterium content in $K(H_{1-x}D_x)_2PO_4$ crystals [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1769-1772.