

中红外室温大能量 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器

潘其坤*, 谢冀江, 陈飞, 张阔, 肖锋, 于德洋, 何洋, 孙俊杰, 张来明, 郭劲

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 理论分析了室温条件下掺铁硒化锌($\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$)激光横向寄生振荡特性,结果显示通过减小抽运光斑尺寸可有效提升寄生振荡反转粒子数阈值,从而抑制 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光横向寄生振荡。以非链式脉冲氟化氢(HF)激光器为抽运源,搭建了 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器实验装置,通过插入不同孔径的光阑,实验研究了不同抽运光斑尺寸下的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出特性。实验结果表明,对于端面尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光晶体,当抽运光斑尺寸 $\leq 9.2\text{ mm}$ 时,横向寄生振荡现象可得到有效抑制,与理论分析结果相符。室温条件下,所获得的最高 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光脉冲能量为 136 mJ ,斜效率为 33.2% ,相对于抽运激光能量的光-光转换效率为 26.5% 。

关键词 激光器; 中红外激光; $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光; 寄生振荡; 室温

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1101001

Mid-Infrared High Energy $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ Laser at Room Temperature

Pan Qikun*, Xie Jijang, Chen Fei, Zhang Kuo, Xiao Feng, Yu Deyang,
He Yang, Sun Junjie, Zhang Laiming, Guo Jin

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract The transversal parasitic oscillation characteristics of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser operating at room temperature are theoretically analyzed, and the results show that the population inversion threshold of parasitic oscillation can be effectively increased via the decrease of pump spot size, and thus the transversal parasitic oscillation of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser can be effectively suppressed. The experimental setup of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser end-pumped by a non-chain pulsed hydrogen fluoride (HF) laser is established. By inserting irises with different apertures, the output characteristics of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser are experimentally studied under different pump spot diameters. The experimental results show that, as for a $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystal with end size of $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$, the phenomenon of transversal parasitic oscillation can be effectively suppressed when the pump spot diameter is smaller than 9.2 mm , which is consistent with the theoretical analysis result. At room temperature, the maximum $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser pulse energy that one can obtain is 136 mJ , the slope efficiency is 33.2% , and the optical to optical efficiency is 26.5% relative to the pump light energy.

Key words lasers; mid-infrared laser; $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser; parasitic oscillation; room temperature

OCIS codes 140.3070; 140.5680; 140.3538

1 引 言

中红外波段激光器在人眼安全雷达、激光光谱学、激光医疗、环境监测、激光通信、激光对抗等领域均具有广泛的应用前景,是国内外激光领域的研究热

点之一。过渡金属 Fe 离子掺杂 II-VI 族晶体(ZnS 、 ZnSe 、 ZnTe 、 CdSe)可输出中红外波段激光,其中,Fe 离子掺杂的 ZnSe 晶体具有超宽的吸收光谱和荧光光谱,在 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段内具有良好的宽带可调谐与高脉冲能量输出特性,因而更具有竞争力^[1-3]。

收稿日期: 2018-05-11; 修回日期: 2018-06-11; 录用日期: 2018-06-26

基金项目: 科技部政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0120200)、国家自然科学基金(61705219)、吉林省科技创新领军人才及团队项目(20170519012JH)、中国科学院青年创新促进会资助课题、激光与物质作用国家重点实验室基金(SKLLIM1709)

* E-mail: panqikun2005@163.com

自 1999 年美国加利福尼亚大学 Adams 等^[1]首次实现低温 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出以来,国内外学者针对室温 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器输出性能的提升进行了大量研究。2010 年, Kozlovsky 等^[4]在室温条件下,采用调 Q 的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 激光(波长为 $2.94\ \mu\text{m}$, 脉宽为 $50\ \text{ns}$, 脉冲能量为 $30\ \text{mJ}$)抽运 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体,获得能量为 $6\ \text{mJ}$ 、波长为 $4.6\ \mu\text{m}$ 的脉冲激光,激光斜效率为 39% 。2011 年, Myoung 等^[5]采用增益开关 $\text{Er}:\text{Cr}:\text{YSGG}$ 激光(波长为 $2.8\ \mu\text{m}$)抽运 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体,当温度为 $236\ \text{K}$ 时,获得了能量为 $4.7\ \text{mJ}$ 、波长为 $4.3\ \mu\text{m}$ 的脉冲激光;当温度为 $300\ \text{K}$ 时,获得了能量为 $3.6\ \text{mJ}$ 、波长为 $4.37\ \mu\text{m}$ 的脉冲激光,相应的斜效率分别为 19% 和 16% 。2013 年, Frolov 等^[6]采用闪光灯抽运自由运转的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 激光器,获得了能量高达 $8\ \text{J}$ 、波长为 $2.94\ \mu\text{m}$ 的脉冲抽运源,并运用该抽运源来抽运 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体,在温度为 $295\ \text{K}$ 时实现了能量为 $42\ \text{mJ}$ 、波长为 $4.5\ \mu\text{m}$ 的激光输出,激光斜效率仅为 2.8% 。2014 年, Velikanov 等^[7]首次报道了采用氟化氢(HF)激光(波长范围为 $2.6\sim 3.1\ \mu\text{m}$)抽运 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体,在室温条件下可输出能量为 $30.6\ \text{mJ}$ 中红外激光。2017 年, Velikanov 等^[8]以 HF 激光为抽运源来抽运 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体,室温条件下获得了能量为 $1.67\ \text{J}$ 的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出,且在重频运转条件下实现了功率为 $20\ \text{W}$ 的激光输出,相应于抽运能量的斜效率为 27% 。2018 年,孔心怡等^[9]以 HF 激光为抽运源,采用斜入射 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的抽运方式,在室温条件下获得了能量为 $65\ \text{mJ}$ 、波长为 $4.28\ \mu\text{m}$ 的激光输出,斜效率达到 37% 。上述研究表明,为了在室温条件下获得大能量、高效率的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出,必须采用与 Fe 离子室温上能级寿命($370\ \text{ns}$)相匹配的短脉冲、大能量激光抽运源。放电激励的非链式脉冲 HF 激光器具有输出能量高、脉冲宽度窄的特性,是大能量 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光的理想抽运源之一。 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光为准四能级结构^[10],短脉冲、大能量的 HF 激光抽运 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体可在瞬间产生极高的增益,导致横向寄生振荡,严重影响 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光的输出性能。

本文首先对 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光横向寄生振荡的产生机理进行分析,获得有效抑制横向寄生振荡的方法;然后以放电激励的非链式脉冲 HF 激光器为抽运源,在室温条件下搭建 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器实验装置,通过优化抽运光斑尺寸和能量分布均匀性,降低 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光晶体损伤的风险,提升 $\text{Fe}^{2+}:$

ZnSe 激光效率。在抽运光斑尺寸为 $9.2\ \text{mm}$ 时,获得了单脉冲能量为 $136\ \text{mJ}$ 的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出,其相应的抽运能量斜效率为 33.2% 。

2 横向寄生振荡特性分析

非激光轴方向的横向寄生振荡将消耗大量的反转粒子数,降低光轴方向的激光输出性能,该现象在大横截面激光增益介质中尤为明显^[11]。横向寄生振荡产生的阈值条件为

$$G_p \Gamma_p = 1, \quad (1)$$

式中: G_p 为横向寄生增益; Γ_p 为横向单程损耗。这两者的表达式分别为

$$G_p = \exp[\sigma_{\text{em}}(\lambda) d N_p^{\text{thr}}], \quad (2)$$

$$\Gamma_p = R_p \exp[-\sigma_{\text{ab}}(\lambda)(D-d)N_0], \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\text{ab}}(\lambda)$ 和 $\sigma_{\text{em}}(\lambda)$ 分别为 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光波长 λ 处的吸收截面和辐射截面; D 和 d 分别为 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体横截面尺寸和抽运光斑在晶体上的辐照尺寸; N_0 为激光晶体铁离子掺杂浓度; R_p 为激光晶体边缘反射系数; N_p^{thr} 为横向寄生振荡阈值反转粒子数。激光晶体边缘反射系数表达式为

$$R_p = [n(\lambda) - 1]^2 / [n(\lambda) + 1]^2, \quad (4)$$

式中: $n(\lambda)$ 为晶体折射率。联立(1)~(3)式,可得 N_p^{thr} 的表达式为

$$N_p^{\text{thr}} = \frac{1}{\sigma_{\text{em}} d} \ln \left\{ \frac{1}{R_p \exp[-\sigma_{\text{ab}}(\lambda_0)(D-d)N_0]} \right\}. \quad (5)$$

为了抑制横向寄生振荡,光轴方向激光振荡的阈值反转粒子数 N_G^{thr} 必须小于横向寄生振荡阈值反转粒子数 N_p^{thr} 。激光振荡的阈值反转粒子数 N_G^{thr} 可表示为

$$N_G^{\text{thr}} = - \frac{\ln(R_{\text{rear}} R_{\text{out}} T^2)}{2\sigma_{\text{em}} l_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

式中: R_{rear} 和 R_{out} 分别为 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器全反射镜和输出镜的反射率; l_{eff} 为晶体有效长度; R_{tra} 为腔内单程透过率,它取决于激光晶体表面反射损耗、光阑衍射损耗、腔内传输损耗等参数。

根据 Fe 离子的吸收、辐射参数^[1,11]及本实验中采用的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体相关数据,该激光器横向寄生振荡特性分析所采用的参数为: $\sigma_{\text{ab}}(\lambda) = 0.14 \times 10^{-18}\ \text{cm}^2$, $\sigma_{\text{em}}(\lambda) = 1.2 \times 10^{-18}\ \text{cm}^2$, $N_0 = 4 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, $l_{\text{eff}} = 4\ \text{mm}$, $R_{\text{rear}} = 0.99$, $R_{\text{out}} = 0.7$, $R_{\text{tra}}^2 = 0.5$, $n(\lambda) = 2.43$ 。将上述参数代入(5)~(6)式可获得寄生振荡阈值反转粒子数随抽运光斑尺寸的变化关系,结果如图 1 所示。激光振荡阈值反转粒子数

N_G^{thr} 为 $6.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。由图 1 可知,通过降低抽运光斑尺寸 d ,可有效提升寄生振荡阈值反转粒子数,使之高于激光振荡阈值反转粒子数,从而有效地抑制横向寄生振荡的产生。当 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体横向尺寸分别为 10、15、20、25 mm 时,允许的最大抽运光斑尺寸分别为 5.6、7.7、9.8、12 mm,因此采用大尺寸 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体是一种提升注入能量、获得大能量 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出的有效方法。

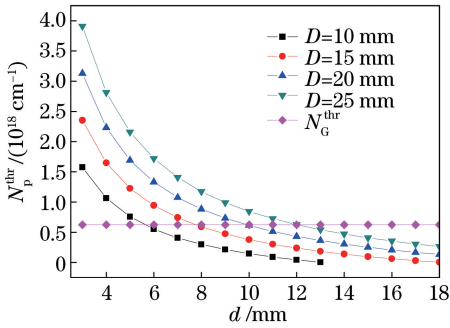


图 1 寄生振荡阈值反转粒子数随抽运光斑直径的变化关系
Fig. 1 Population inversion threshold of parasitic oscillation versus pump spot diameter

3 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器实验装置

$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器的实验装置如图 2 所示。抽运源采用放电激励的非链式脉冲 HF 激光器^[12-14],其工作气体的压强比为 $P_{\text{SF}_6} : P_{\text{C}_2\text{H}_6} = 7 \text{ kPa} : 400 \text{ Pa}$,放电电压为 42 kV,输出单脉冲能量大于 4 J,输出光斑尺寸为 $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ 。图 3 所示为 HF 激光实测脉冲波形,其半峰全宽(FWHM)约为 100 ns,较好地匹配了室温时 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器的上能级寿命。实验中采用的 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体为布里奇曼法生长获得的高均匀性、体掺杂激光晶体,其截面尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,厚度为 4 mm,双端面采用光学抛光,但未镀膜。 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的透射光谱和吸收光如图 4 所示。可以看出, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的吸收峰位于 $3 \mu\text{m}$,在 $2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 的 HF 激光光谱范围内均具有良好的吸收特性。为了匹配抽运光斑尺寸与激光晶体尺寸,抽运激光在入射晶体前经望远镜系统对抽运光斑进行缩束,望远镜缩束倍率设计为 3 倍。望远镜第二面镜固定在线性位移台上,其行程为 80 mm,通过调节望远镜的光学间隔,可有效调节入射到 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体上的能量密度,避免大能量抽运对 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体造成损伤。实验采用有利于抽运激光与 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光腔模匹配的端面正入射抽运方式,光学谐振腔为平腔结构,腔

长为 50 mm。输入镜 M_1 对抽运光($2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$)的透射率较高,对 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光($4 \sim 5 \mu\text{m}$)的反射率较高;输出镜 M_2 对抽运光的透射率较高,对 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光的反射率为 70%。谐振腔内紧贴激光晶体插入不同孔径的光阑,可在同样抽运能量密度条件下有效控制抽运光斑尺寸及能量。

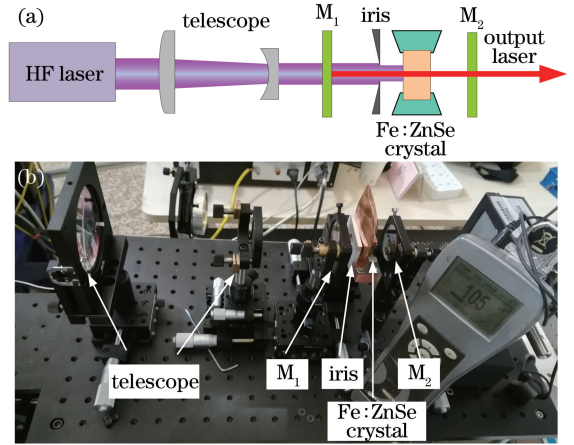


图 2 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器实验装置。
(a)原理示意图;(b)实物照相机

Fig. 2 Experimental setup of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser.
(a) Schematic; (b) physical map

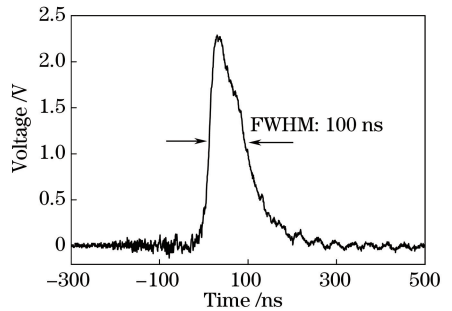


图 3 抽运激光的脉冲波形

Fig. 3 Pulse waveform of pump laser

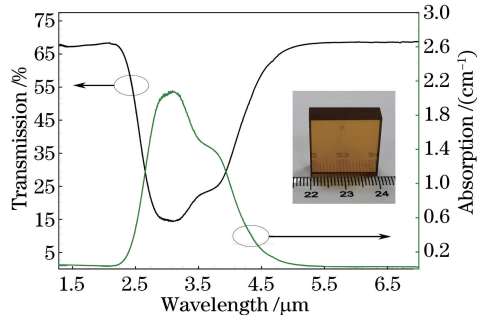


图 4 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的透射光谱和吸收光谱
(插图为 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体)

Fig. 4 Transmission and absorption spectra of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystal (The illustration shows $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystal)

4 实验结果与讨论

室温条件下, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体对抽运激光和振荡激光均有吸收, 且 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体质软(努氏硬度为 110 kg/mm^2), 光学加工过程中易在晶体表面形成肉眼不可见的微小麻点与划痕, 因此在焦耳级大能量、短脉冲激光抽运条件下易造成激光晶体表面损伤。为提升 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体抗损伤阈值, 采取了 2 个方面的措施: 1) 对 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体进行超精密加工, 提升晶体表面光洁度; 2) 控制入射到晶体上的抽运激光能量密度, 提升抽运激光光强分布均匀性。

HF 激光器的放电电极横截面尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 输出光斑如图 5(a) 所示, 光斑尺寸为 $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$, 光斑模式为典型的高阶横模。初始光斑入射到望远镜缩束系统, 通过调节望远镜光学间隔, 有效改变入射到晶体表面的能量密度, 能量密度调节范围为 $0.1 \sim 3 \text{ J/cm}^2$ 。本实验旨在探索室温条件下大能量 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光技术的获取途径。首先通过提升抽运激光能量来提升 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出性能, 但受 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光晶体损伤阈值限制, 入射到激光晶体上的抽运能量密度不能无限提高, 因此在低于激光晶体损伤阈值的抽运能量密度条件下扩大抽运光斑尺寸显得尤为重要。然而, 当大抽运光斑、高能量密度抽运时, 激光横向寄生振荡效应又限制了 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出效率。根据横向寄生振荡特性理论分析结果, 在腔内插入光阑, 实验研究了不同抽运光斑尺寸条件下 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出特性。图 5(b)、(c) 所示为采用不同孔径的光阑时入射到晶体表面的抽运光斑, 尺寸分别为 $\phi 5.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 9.2 \text{ mm}$, 其光强分布均匀性良好, 激光

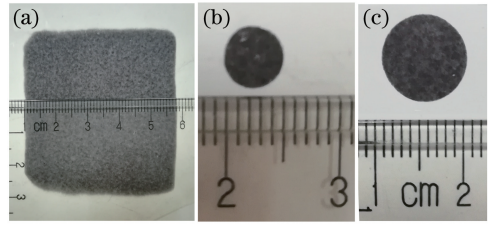


图 5 激光光斑。(a)原始光斑;(b)光束整形后 $\phi 5.2 \text{ mm}$ 光斑;(c)光束整形后 $\phi 9.2 \text{ mm}$ 光斑

Fig. 5 Laser spots. (a) Original spot; (b) $\phi 5.2 \text{ mm}$ spot after beam shaping; (c) $\phi 9.2 \text{ mm}$ spot after beam shaping
能量密度约为 300 mJ/cm^2 。

实验中, 将孔径为 $\phi 5.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 6.8 \text{ mm}$ 、 $\phi 7.1 \text{ mm}$ 、 $\phi 8.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 9.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 10.5 \text{ mm}$ 的 6 个光阑分别插入到 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光腔内, 获得了不同抽运光斑尺寸条件下 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光脉冲输出能量随抽运能量的变化关系, 结果如图 6 所示。首先, 在所有的抽运光斑尺寸条件下, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出能量均随抽运能量的升高而线性增大, 且均未出现吸收饱和现象, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光阈值能量密度约为 200 mJ/cm^2 。其次, 在同样抽运能量密度条件下, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出能量先随着抽运光斑尺寸的增大而增大, 直至光斑尺寸大于 9.2 mm 后激光输出能量显著下降, 此时 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器出现显著的横向寄生振荡效应, 该实验结果与第 2 节的理论分析结果相符。当抽运光斑尺寸为 $\phi 9.2 \text{ mm}$ 、抽运能量为 492 mJ 时, 获得的最大 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光能量为 136 mJ , 且随着抽运能量的提高, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出能量还有进一步提升的潜力。

$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光效率随抽运光斑尺寸的变化关系如图 7 所示。在未出现横向寄生振荡效应之前, 激光斜效率近似不变, 相应于抽运能量的最大斜效率

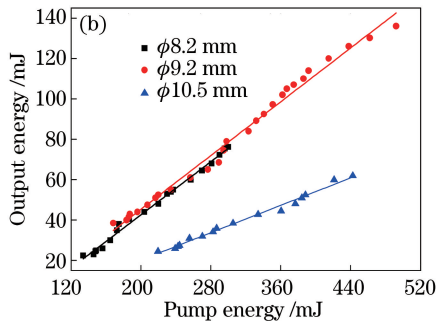
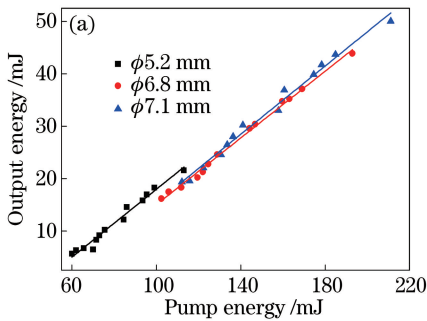


图 6 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光输出能量随抽运能量的变化关系。(a)抽运光斑尺寸分别为 $\phi 5.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 6.8 \text{ mm}$ 、 $\phi 7.1 \text{ mm}$;
(b)抽运光斑尺寸分别为 $\phi 8.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 9.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 10.5 \text{ mm}$

Fig. 6 Output energy of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser versus pump energy under different pump spot diameters.
(a) $\phi 5.2 \text{ mm}$, $\phi 6.8 \text{ mm}$, $\phi 7.1 \text{ mm}$; (b) $\phi 8.2 \text{ mm}$, $\phi 9.2 \text{ mm}$, $\phi 10.5 \text{ mm}$

为 33.2%。当抽运能量密度为 500 mJ/cm²时,光-光转换效率计算结果如图 7 所示。可以看出,当抽运光斑尺寸为 9.2 mm 时,相应于抽运能量的最大光-光转换效率为 26.5%。受实验条件限制,本实验未测试 Fe²⁺:ZnSe 激光光谱,参考文献[9]可知,室温条件下, HF 激光抽运的 Fe:ZnSe 激光中心波长约为 4.3 μm。

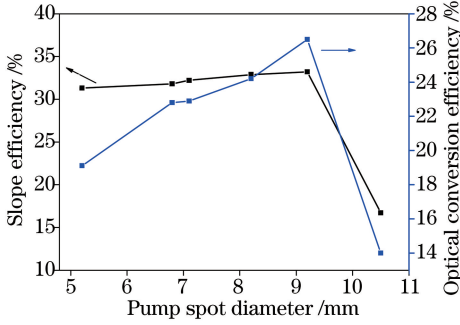


图 7 Fe²⁺:ZnSe 激光效率随抽运尺寸的变化关系
Fig. 7 Slope efficiency of Fe²⁺:ZnSe laser versus pump spot diameter

实验中采用响应时间小于 2 ns,带宽大于 500 MHz 的 HgCdTe 光电探测器对激光脉冲波形进行测试,测得的 HF 激光与 Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲波形如图 8 所示。HF 激光脉冲 FWHM 约为 100 ns。Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲延迟于抽运激光,随着抽运激光能量的不断注入,Fe²⁺:ZnSe 激光逐渐积累上能级粒子数,当达到粒子数反转条件后,在增益开关效应下,Fe²⁺:ZnSe 激光迅速形成振荡并输出纳秒量级的超短脉冲尖峰,尖峰脉宽为 5 ns,Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲尖峰时刻与 HF 抽运激光脉冲峰值时刻一致。在增益开关效应下 Fe²⁺:ZnSe 激光消耗了大量的反转粒子数,但此时 HF 抽运激光并未停止,Fe²⁺:ZnSe 激光出现了显著的弛豫振荡现象,其脉冲拖尾结束时刻与 HF 激光脉冲结束时刻一致。总体上,Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲波形为陡尖峰加较长的拖尾,拖尾宽度约为 80 ns。

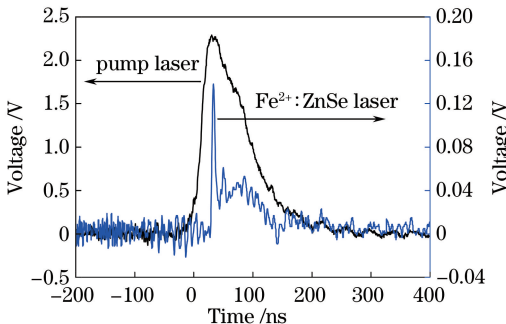


图 8 抽运激光与 Fe²⁺:ZnSe 激光的脉冲波形
Fig. 8 Pulse waveforms of pump laser and Fe²⁺:ZnSe laser

从 Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲波形陡峭的前沿可进一步推断出其具有较大的激光增益,不加任何限制措施时,其横向激光寄生振荡将消耗大量的激光增益,从而显著影响 Fe²⁺:ZnSe 激光输出性能。

图 9 所示为 Fe²⁺:ZnSe 激光不同输出能量时的脉冲波形。可以看出,随着输出(抽运)能量的增大,输出脉冲激光前沿尖峰的峰值越高,拖尾弛豫振荡现象越明显,拖尾激光强度越高。该实验结果还表明,进一步提升抽运激光能量或采用更短脉冲宽度的抽运光有望消除 Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲拖尾。

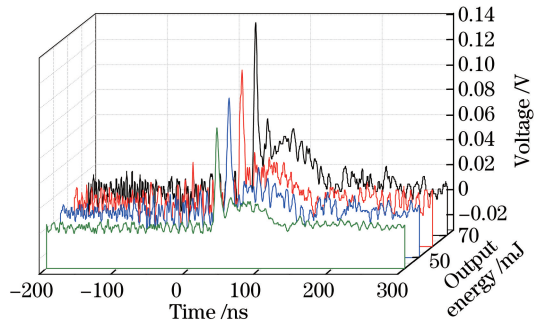


图 9 不同输出能量时的 Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲波形
Fig. 9 Pulse waveforms of Fe²⁺:ZnSe lasers with different output energies

5 结 论

设计了一种中红外室温大能量 Fe²⁺:ZnSe 激光器实验装置,它采用了非链式脉冲 HF 激光端面正入射的抽运方式,运用布里奇曼法生长的大尺寸、体掺杂 Fe²⁺:ZnSe 激光晶体为增益介质,通过在腔内插入不同孔径的光阑有效地抑制了 Fe²⁺:ZnSe 激光横向寄生振荡,实现了 Fe²⁺:ZnSe 激光室温大能量输出,并对激光脉冲波形进行了测试。室温条件下,抽运光斑尺寸为 9.2 mm 时,获得的最大 Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲能量为 136 mJ,斜效率为 33.2%,相应于激光抽运能量的光-光转换效率为 26.5%,Fe²⁺:ZnSe 激光脉冲拖尾弛豫振荡现象明显。下一步,拟采用更大尺寸的 Fe²⁺:ZnSe 激光晶体,在有效抑制横向寄生振荡的基础上扩大抽运光斑尺寸,通过提升抽运激光注入能量来提升 Fe²⁺:ZnSe 激光输出性能。

参 考 文 献

[1] Adams J J, Bibeau C, Page R H, *et al.* 4.0-4.5 μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material[J]. Optics Letters, 1999, 24(23): 1720-1722.
[2] Schepler K L, Jeong Y, Jiang S B, *et al.* Focus issue introduction: advanced solid-state lasers (ASSL) 2014

- [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 8170-8178.
- [3] Sun X, Han L, Wang K Q. Progress in directly pumping of mid-infrared solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050007.
孙晓, 韩隆, 王克强. 直接抽运中红外固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050007.
- [4] Kozlovsky V I, Akimov V A, Frolov M P, *et al.* Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II-VI compound crystals grown from vapor phase[J]. Physics Status Solidi B, 2010, 247(6): 1553-1556.
- [5] Myoung N, Martyshkin D V, Fedorov V V, *et al.* Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe:ZnSe laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 94-96.
- [6] Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, *et al.* Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4- μm laser[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(12): 125001.
- [7] Velikanov S D, Danilov V P, Zakharov N G, *et al.* Fe²⁺:ZnSe laser pumped by a nonchain electric-discharge HF laser at room temperature[J]. Quantum Electronics, 2014, 44(2): 141-144.
- [8] Velikanov S D, Gavrishchuk E M, Zaretsky N A, *et al.* Repetitively pulsed Fe:ZnSe laser with an average output power of 20 W at room temperature of the polycrystalline active element[J]. Quantum Electronics, 2017, 47(4): 303-307.
- [9] Kong X Y, Ke C J, Hu C F, *et al.* 65 mJ Fe²⁺:ZnSe mid-infrared laser at room temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101011.
孔心怡, 柯常军, 胡呈峰, 等. 65 mJ 室温 Fe²⁺:ZnSe 中红外激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101011.
- [10] Pan Q K, Chen F, Xie J J, *et al.* Theoretical study of the characteristics of a continuous wave iron-doped ZnSe laser[J]. Laser Physics, 2018, 28(3): 035002.
- [11] Dormidonov A E, Firsov K N, Gavrishchuk E M, *et al.* High-efficiency room-temperature ZnSe:Fe²⁺ laser with a high pulsed radiation energy [J]. Applied Physics B, 2016, 122(8): 211.
- [12] Pan Q K, Xie J J, Ruan P, *et al.* Discharge parameters of non-chain pulsed DF laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0502009.
潘其坤, 谢冀江, 阮鹏, 等. 非链式脉冲 DF 激光器放电特性[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502009.
- [13] Tan G J, Xie J J, Pan Q K, *et al.* Design and experimental investigation on unstable resonator for non-chain pulsed DF laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0102004.
谭改娟, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式脉冲 DF 激光器非稳腔设计与实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102004.
- [14] Pan Q K, Xie J J, Shao C L, *et al.* High power electric-discharge non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0702001.
潘其坤, 谢冀江, 邵春雷, 等. 高功率放电引发非链式脉冲 DF 激光器 [J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702001.