

长波红外 CdSe 光参量振荡器

魏磊^{1,2,4*}, 李宝⁴, 陈国⁴, 方聪⁴, 韩隆⁴, 苑利钢⁴, 吴德成¹, 倪友保³, 王英俭¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 长波红外波段的激光在大气中能够低损耗传输,这就使得长波红外激光具有广泛应用的天然优势,其中长波红外激光可用作红外光电对抗光源,特别是随着长波红外探测器的发展,其对相应波段的对抗光源的需求与日俱增。为此设计并搭建波长为 2.05 μm Ho:YLF 激光来泵浦长波 CdSe 光参量振荡器的实验装置,该装置可以输出峰值波长为 12.5 μm 的高重复长波红外激光。激光器在重复频率 5 kHz 情况下的平均功率最高达 526 mW, Ho:YLF 激光到长波光的光光转换效率为 1.46%,斜效率为 23.4%,激光单脉冲宽度为 24.4 ns,单脉冲能量为 0.1 mJ,单脉冲峰值功率为 4.3 kW, X 方向的光束质量因子为 4.3, Y 方向的光束质量因子为 3.2。

关键词 激光光学; 长波红外; Ho:YLF; CdSe; 光参量振荡器

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2401004

1 引言

长波红外波段(8~15 μm)又称为红外窗口,该波段的激光在大气中能够低损耗传输,这就使得长波红外激光具有广泛应用的天然优势。第一,长波红外激光光谱中涵盖了多种气体的特征吸收谱,因此可以用于痕量气体探测^[1],而该波段的激光在呼吸系统医疗检测^[2]和化合物探测^[3]等方面的实际应用引起了产业界的关注。第二,由于长波红外激光在大气中的分子吸收系数和米散射系数均较小,因此具备更强的穿透雾霾的能力,再加上较快的激光调制速度,该波段的激光可作为自由空间光通信的信息载体^[4]。第三,长波红外激光可用作红外光电对抗光源^[5],特别是随着长波红外探测器的发展,其对相应波段的对抗光源的需求与日俱增。

长波红外光源的产生方式有多种手段:CO₂ 激光器可实现百瓦级的高功率输出,但输出波长截止于 11 μm 左右;量子级联激光器能够输出宽波段的

激光,且最长波长可达 300 μm 以上,但峰值功率太低。以光参量振荡器(OPO)为代表的非线性波长变换技术,其输出的激光可兼具高功率、宽光谱和长波长的特点,特别是通过调节 OPO 晶体的切割角度可以实现对输出激光波长的实时调谐。长波波段的 OPO 中,最常用的晶体当属磷锗锌(ZnGeP₂ 或 ZGP),但该晶体的透光波长截止于 12 μm 左右^[6]。从实际应用效果上看,当输出波长超过 10 μm 时,激光的转换效率将大幅度下降,这限制了 ZGP 晶体在更长波长的激光器上应用,为此促使研究人员将目光转向硒化镉(CdSe)晶体,这是因为 CdSe 晶体的透光波长更长。

截至目前,激光技术领域中的研究人员在基于 CdSe 晶体的非线性波长变换技术的研究上已经开展了一些工作。2003 年,英国南安普顿大学光电研究中心的 Watson 等^[7]将周期极化铌酸锂(PPLN)激光器作为光源,同步泵浦单谐振的 CdSe OPO 可以获得可调谐的长波激光,调谐范围为 9.1~9.7 μm ,

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-08-06; 录用日期: 2021-08-17

基金项目: 中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金

通信作者: *weilei2006@163.com

激光功率为 70 mW。2005 年,美国相干公司的 Zakel 等^[8]将 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 作为光源来泵浦内腔 CdSe OPO 以产生中波和长波激光,两个波段的激光的总功率达到 2 W,通过调节泵浦源的波长可以实现长波激光在 $8.2\sim 8.5\ \mu\text{m}$ 之间快速调谐。2018 年,中国电子科技集团公司的 Wang 等^[9]基于波长为 $2.05\ \mu\text{m}$ 的光源、尺寸为 $6\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 44\ \text{mm}$ 的 CdSe 晶体和 OPO,获得了功率为 320 mW 的长波脉冲激光,光光转换效率为 1.77%,重复频率为 5 kHz。2020 年,哈尔滨工业大学的 Chen 等^[10]以波长为 $2.58\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 连续光作为种子源,以波长为 $2.09\ \mu\text{m}$ 的 Ho:YAG 脉冲激光作为光源,使用两个光源来泵浦 CdSe OPO 环形激光器,可以获得功率为 802 mW 的长波激光,峰值波长为 $11.01\ \mu\text{m}$,脉冲重复频率为 1 kHz,光光转换效率为 4.4%,斜效率为 23.3%,光束质量因子分别为 1.23(X 方向)和 1.12(Y 方向)。

本文选用 CdSe 晶体作为长波激光材料,以 $2.05\ \mu\text{m}$ 波长的掺钬氟化钇锂(Ho:YLF)脉冲激光来泵浦 CdSe OPO,可以获得长波红外激光的输出。经过测量可知,激光的峰值波长为 $12.5\ \mu\text{m}$,在 5 kHz 的频率处平均功率为 526 mW,脉冲宽度为 24.4 ns, X 方向的光束质量因子为 4.3, Y 方向的光束质量因子为 3.2。另外,通过对 CdSe 晶体角度的调谐可以实现激光的输出波长达到最大值,即 $12.8\ \mu\text{m}$ 。

2 实验装置

长波红外激光器的结构如图 1 所示,其中 IC 和 OC 分别为 CdSe OPO 的输入镜和输出镜。首先使

用输出波长为 $1.94\ \mu\text{m}$ 的 Tm:YAP 连续激光来泵浦 Ho:YLF 激光器,并通过声光调 Q 的方式来获得波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的脉冲激光,再以此为光源来泵浦 CdSe OPO,从而输出长波激光。Tm:YAP 激光的参数:额定输出功率为 78 W; X 方向和 Y 方向的光束质量因子分别为 2.4 和 2.3。Tm:YAP 激光经过平凸形聚焦镜后会聚并进入由 M 2 镜、Ho:YLF 晶体、声光 Q 开关和 M 3 镜组成的 $2\ \mu\text{m}$ 激光器中,谐振腔为直线型、双凹稳定腔结构。谐振腔中反射镜 M 2 的镀膜层可以对 $1.94\ \mu\text{m}$ 的激光实现高透射,可以对 $2.04\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 的激光实现高反射;谐振腔中输出镜 M 3 的镀膜层对于 $1.9\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 激光的透射率为 30%; Ho:YLF 晶体中掺杂摩尔分数为 1.5% 的 Ho^{3+} ,沿着 c 轴向切割,晶体外形为圆柱体,端面为平面,规格为 $\Phi 6\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ 。经过实测可知, Ho:YLF 晶体对于 $1.94\ \mu\text{m}$ 激光的透射率不超过 6%,因此尽管输出镜 M 3 可以对 $1.94\ \mu\text{m}$ 的激光实现反射,但返回至 Tm:YAP 激光器腔内的功率并不高,为此不会导致激光器损伤;声光 Q 开关晶体对于 $2\ \mu\text{m}$ 激光的实测透过率大于 98%,有效通光孔径超过 $2\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$,衍射效率大于 80%, Q 开关驱动器的驱动功率为 40 W,调制信号的重复频率可调范围为 $1\sim 25\ \text{kHz}$ 。平面双色镜 M 4 与 M 6 参数一致,所镀膜层均为 $1.94\ \mu\text{m}$ 的高透膜层(入射角为 45°),膜层可以对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的光高反射, M 4 和 M 6 与 $2\ \mu\text{m}$ 激光光路呈 45° 。M 3 输出的激光经过 M 4 后发生 90° 偏转,偏转光的绝大部分为 Ho:YLF 脉冲激光,这些激光经过平凸透镜 M 5 会聚和 M 6 镜反射后进入由 M 7、M 8 和 CdSe

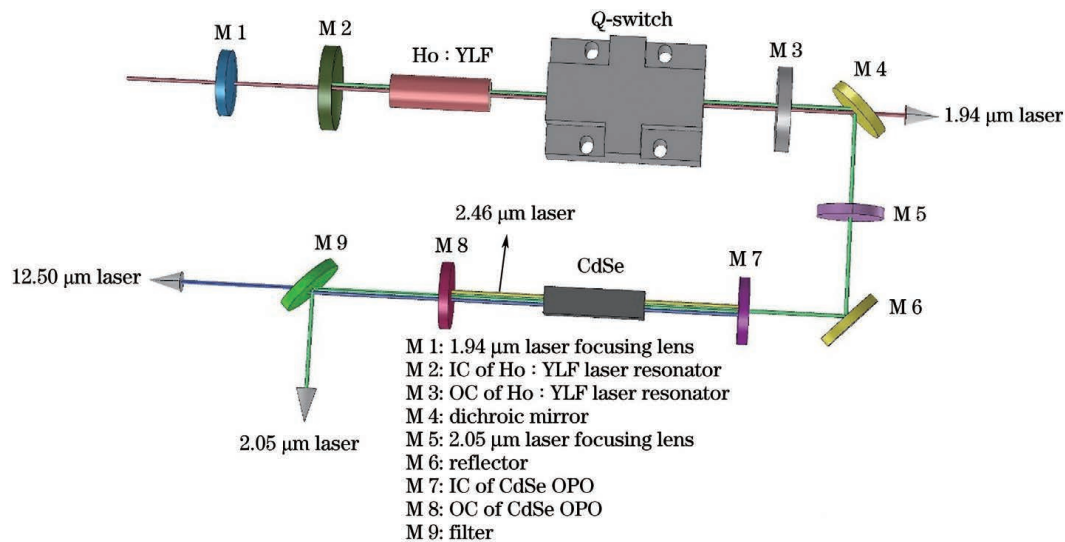


图 1 长波红外激光器的结构

Fig. 1 Structure of long-wave infrared laser

晶体组成的长波 OPO 系统中。OPO 谐振腔为平平腔,谐振方式为单谐振。OPO 中后镜 M 7 所镀的膜层对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的光高透,对 $2.4\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 波段的光高反,对 $10\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段的光高反;OPO 中前镜 M 8 所镀的膜层对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的光高透,对 $2.4\ \mu\text{m}\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 波段的光高反,对 $10\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段的光高透。CdSe 晶体的尺寸为 $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$,按 67.1° 的相位匹配角对其进行切割,晶体双端面镀有 $2\ \mu\text{m}$ 、 $2.4\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 和 $10\sim 13\ \mu\text{m}$ 三波段的高透膜层。

实验装置中的产热元件有 Ho:YLF 晶体、Q 开关和 CdSe 晶体,装置运行的过程中采取了 $(18\pm 5)^\circ\text{C}$ 的水冷循环控温方案,另外还采用 Ho:YLF 晶体和 CdSe 晶体,两个晶体均由厚度为 $0.1\ \text{mm}$ 的铜片包裹,这可以使夹持晶体的紫铜热沉与晶体之间实现良好的传热效果;Q 开关置于紫铜热沉上,二者的接触面上覆有铜片;所有紫铜热沉的安装面均镀金,内部水道均为微通道结构,上述措施均可保证实现最佳的散热效果。

3 方案分析

3.1 CdSe 晶体的特性

作为一种具有六方结构的 II-VI 族半导体材料,CdSe 晶体是直接跃迁型宽带隙结构,晶体的有效非线性系数约为 $18\ \text{pm/V}$,小于 ZGP 晶体的有效非线性系数 ($75\ \text{pm/V}$),但其吸收系数小 ($\alpha' < 0.1\ \text{cm}^{-1}$)^[11],透光范围宽 ($0.75\sim 25.00\ \mu\text{m}$),这有利于输出更长波长的激光,CdSe 单晶如图 2 所示。不仅如此,CdSe 晶体的机械性能较好^[12],比如其热导率为 $0.06\ \text{W}/(\text{cm}\cdot\text{K})$ ($25\ ^\circ\text{C}$),比热容为 $0.49\ \text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$,a 轴和 c 轴方向上的热膨胀系数 $\alpha_1 = 6.26 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$ 和 $\alpha_3 = 4.28 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$ 。此外,CdSe 晶体的双折射系数大,双光子吸收系数小,

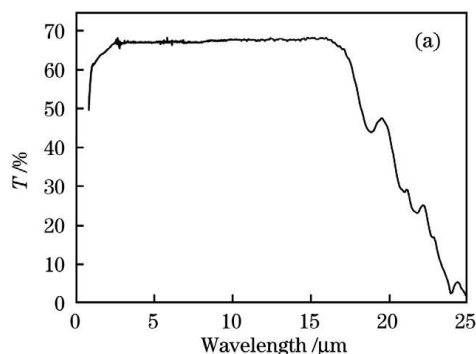


图 4 CdSe 晶体(长度为 $50\ \text{mm}$)在不同情况下的透射光谱。(a)晶体镀膜前;(b)晶体镀膜后

Fig. 4 Transmission spectra of CdSe crystal (length is $50\ \text{mm}$) under different conditions. (a) Before crystal coating;

(b) after crystal coating



图 2 CdSe 单晶的实物图

Fig. 2 Physical view of CdSe single crystal

所以适合非线性频率的变换。从综合性能上来讲,CdSe 晶体可在 $12\ \mu\text{m}$ 以上的红外激光波段取代 ZGP 晶体,而且具有实现工程化应用的巨大潜力。

针对上述实验装置中采用的 CdSe 晶体,研究人员测试了该晶体的吸收系数,测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看到,在 $2\sim 17\ \mu\text{m}$ 波段内,CdSe 晶体的吸收系数小于 $0.02\ \text{cm}^{-1}$ 且保持稳定;吸收系数从 $17.5\ \mu\text{m}$ 波长开始基本呈线性增大,在 $20\ \mu\text{m}$ 波长以后超过了 $0.1\ \text{cm}^{-1}$ 。从以上数据可以推断,对于 CdSe 晶体而言,当波长大于 $17.5\ \mu\text{m}$ 时,激光输出效果会显著变差。

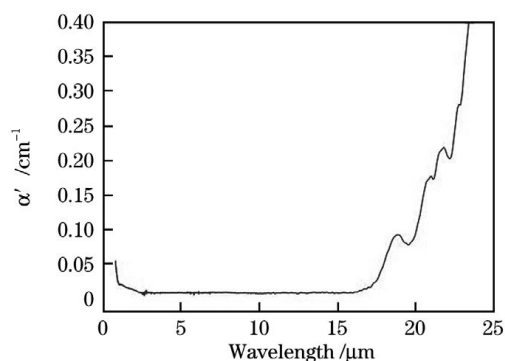
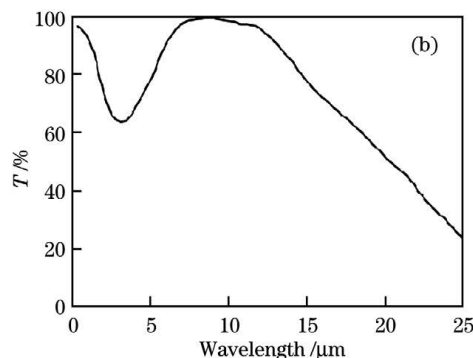


图 3 CdSe 晶体的吸收系数曲线

Fig. 3 Absorption coefficient curve of CdSe crystal

研究人员测试了实验装置中所用的 CdSe 晶体在镀膜前(精抛)和镀膜后的透过率 T ,结果如图 4 所



示,其中图 4(a)的结论与图 3 一致。从图 4 可以看到,CdSe 晶体所镀的膜层包括 $2\ \mu\text{m}$ 、 $2.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $10\sim 13\ \mu\text{m}$ 三个波段的增透膜,由于受材料所限,镀膜工艺难度极高,镀膜后的 CdSe 晶体的透过率在 $14\ \mu\text{m}$ 以后明显下降,因此为充分发挥 CdSe 晶体的优势,未来应提升该晶体材料的镀膜水平。

3.2 CdSe 晶体相位匹配参数的设计

作为一种正单轴非线性晶体,CdSe 晶体实现相位匹配的方式包括温度相位匹配和角度相位匹配,其中后者在现实中更常用,因为改变晶体的相位匹配角能够实现大范围的波长调谐。对于完成加工和镀膜的 CdSe 晶体,通过旋转晶体来改变 OPO 泵浦光进入晶体的入射角,可以实现对相位匹配角的调节。因此,CdSe 晶体相位匹配参数设计的第一步是推导输出波长随晶体相位匹配角的变化关系。

OPO 参量光在 CdSe 晶体内的折射率遵循椭圆公式^[13],表达式为

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_c^2}, \quad (1)$$

式中: θ 为光轴和晶体主轴之间的夹角; n_o 为 CdSe 晶体内垂直光轴方向的折射率, n_c 为 CdSe 晶体内沿光轴方向的折射率。

CdSe 晶体的折射率与晶体温度有关,这也是 CdSe 晶体温度与相位匹配的基础,本文只关注室温下的角度相位匹配,室温下 CdSe 晶体对于 o 光和 e 光的折射率^[14]分别为

$$n_o^2 = 4.2243 + \frac{1.768 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 0.227} + \frac{3.12 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 3380}, \quad (2)$$

$$n_c^2 = 4.2009 + \frac{1.8875 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 0.2171} + \frac{3.6461 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 3629}, \quad (3)$$

式中: λ 为波长。CdSe 晶体内的三波相互作用过程遵循动量守恒和能量守恒公式,表达式为

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i, \quad (4)$$

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (5)$$

式中: ω 为光的频率; n 为光在介质内的折射率;下角标 p 代表泵浦光;下角标 s 代表信频光;下角标 i 代表闲频光。

对于给定的泵浦光波长,根据(1)~(5)式可以得到 CdSe 晶体的 I 类和 II 类相位匹配曲线。然而作为 6mm 正单轴晶类,CdSe 晶体在 I 类相位匹配过程中的有效非线性系数为零^[15],因此 CdSe 晶体的匹配方式采用 II 类相位匹配(o \rightarrow o+e),即泵浦光与信频光均为 o 光,闲频光为 e 光。实验装置中进入 CdSe OPO 谐振腔的 Ho:YLF 激光为竖直线

偏振光(o 光),即其电矢量的振动方向为竖直向, Ho:YLF 激光与 CdSe 光轴所组成的平面应为水平面,因此 CdSe 晶体与 Ho:YLF 晶体的位置关系如图 5 所示。

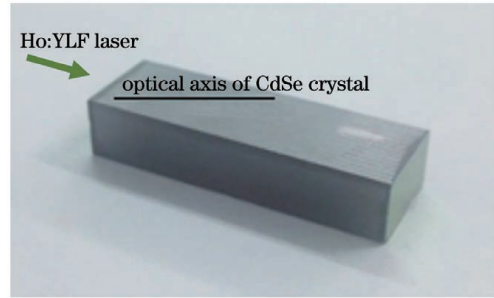


图 5 CdSe 晶体与 Ho:YLF 晶体的位置关系

Fig. 5 Position relationship between CdSe crystal and Ho:YLF crystal

当泵浦光波长为 $2.05\ \mu\text{m}$ 时,CdSe 晶体的 II 类相位匹配曲线如图 6 所示。从图 6 可以看到,根据目标输出波长在该曲线上对应的相位匹配角度可以确定晶体的加工角度,当相位匹配角分别为 65.3° 、 67.1° 和 70.5° 时,对应的输出波长分别为 14.0 、 12.5 、 $11.0\ \mu\text{m}$ 。另外,从图 6 可以看到,在 $15\ \mu\text{m}$ 波长以下,随着相位匹配角的增大,激光输出波长变短,量子效率增加,这有利于获得更高的光光转换效率。

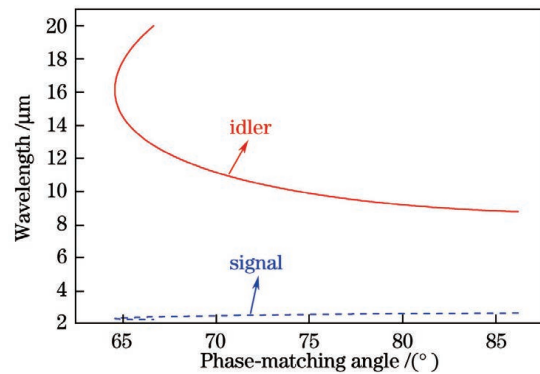


图 6 CdSe 晶体的 II 类相位匹配曲线

Fig. 6 Class II phase matching curves of CdSe crystal

除了激光输出波长,受到相位匹配角影响的另一个关键因素是 CdSe 晶体的有效非线性系数 d_{eff} , II 类相位匹配下 d_{eff} 与二阶极化张量中的 d_{15} 和相位匹配角的相关计算公式^[16]为

$$d_{\text{eff}} = d_{15} \times \sin\theta. \quad (6)$$

由(6)式可知,当相位匹配角 θ 在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间增大时,CdSe 晶体的有效非线性系数随之增大,光光转换效率将随之提高。综上所述,相位匹配角增大的效果就是长波激光的波长更短,效率更高。

4 实验结果及分析

4.1 激光输出功率

将功率为 78 W 的 $1.94 \mu\text{m}$ 激光全部注入 Ho:YLF 晶体中,能够产生平均功率为 40 W 的脉冲激光(频率为 5 kHz)。Ho:YLF 激光以 0° 入射角进入 CdSe 晶体中,逐渐增大 Ho:YLF 的激光功率,采用热释电激光功率计来测试长波激光的平均输出功率随 $2.05 \mu\text{m}$ 脉冲激光平均功率的变化关系,测试结果如图 7 所示。从图 7 可以看到,CdSe 激光的出光阈值所对应的泵浦功率为 14 W,逐渐增大 $2.05 \mu\text{m}$ 脉冲激光的功率至 20 W 左右,CdSe 激光的平均功率增长较缓,此后激光的输出功率基本呈线性增长,直至注入功率达 34 W 后,CdSe 激光的输出功率渐至饱和区域;当注入功率为 36 W 时,CdSe 激光的输出功率达到最大值,为 526 mW,此时 $2.05 \mu\text{m}$ 脉冲激光与 CdSe 激光的转换效率为 1.46%,斜效率为 23.4%。

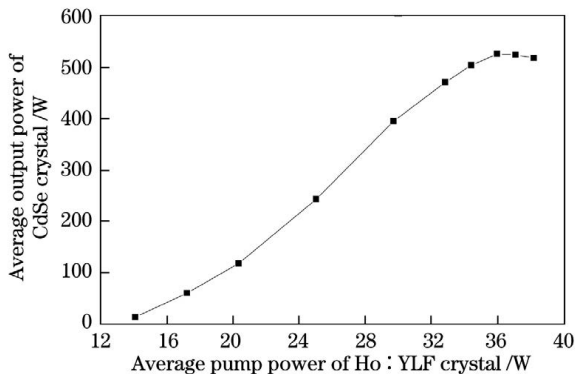


图 7 长波激光的输出功率与 $2.05 \mu\text{m}$ 脉冲激光的泵浦功率的关系

Fig. 7 Relationship between output power of long-wave laser and pump power of $2.05 \mu\text{m}$ pulse laser

CdSe 激光的输出功率饱和的主要原因来自 CdSe 晶体内部产生的废热,由于光光转换效率低,所以 CdSe 晶体内部产生了大量的废热,废热的影响如下。一是会使参量光的折射率发生变化,导致相位失配;二是会导致晶体的热透镜效应,使谐振腔失谐。

4.2 激光输出光谱

由于输出的平均功率最高值(526 mW)的区域接近功率饱和区域,为了避免测试激光输出光谱的过程中器件发生损伤,研究人员降低了注入的泵浦光功率,在长波激光输出功率为 504 mW 的情况下使用光栅光谱仪测试了 CdSe 激光的光谱,结果如图 8 所示,激光的输出峰值波长为 $12.52 \mu\text{m}$ 。根据

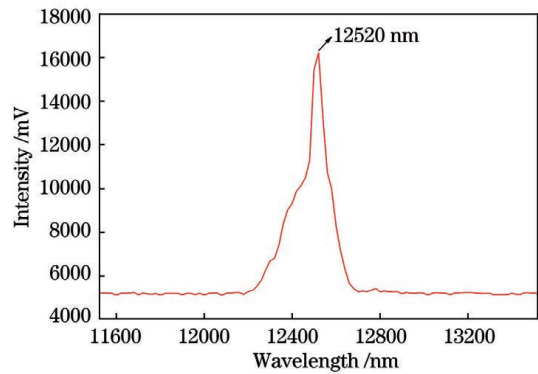


图 8 CdSe OPO 的输出光谱曲线

Fig. 8 Output spectral curve of CdSe OPO

图 6 中 CdSe 晶体的相位匹配曲线可知,若获得峰值波长大于 $12.52 \mu\text{m}$ 的长波激光,可采用减小相位匹配角度的方法来实现。

4.3 光束特性

研究人员使用热释电阵列相机对 CdSe 激光的光束特性进行测试,采用 GJB 5441-2005 固体激光器测试方法中的聚焦镜法来测试光束发散角、像方束腰直径以及像方束腰与聚焦镜的距离,然后计算光束质量因子 M^2 。相机采集的激光近场光斑图像如图 9 所示。计算得到,X 方向和 Y 方向的光束质量因子 M^2 值分别为 4.3 和 3.2。与 Y 方向相比,X 方向的光束质量明显差一些,原因在于为了获得更长的激光波长,在 X 方向对 CdSe 晶体的放置角度进行了调整。

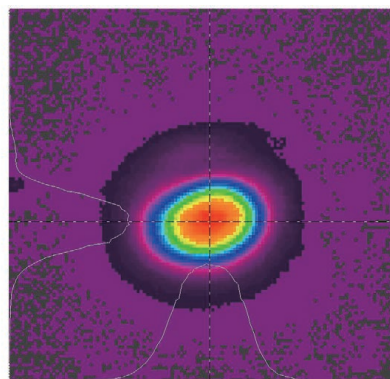


图 9 光斑分布图

Fig. 9 Spot distribution map

4.4 激光脉冲特性

通过长波光电探测器来采集 CdSe 激光的脉冲信号,激光脉冲波形如图 10 所示,脉冲光的重复频率与泵浦光一致,均为 5 kHz,脉冲宽度为 24.4 ns,激光的单脉冲能量为 0.1 mJ,峰值功率为 4.3 kW。

4.5 CdSe 晶体的角度调谐特性

为了得到 CdSe 晶体在角度调谐情况下的输出

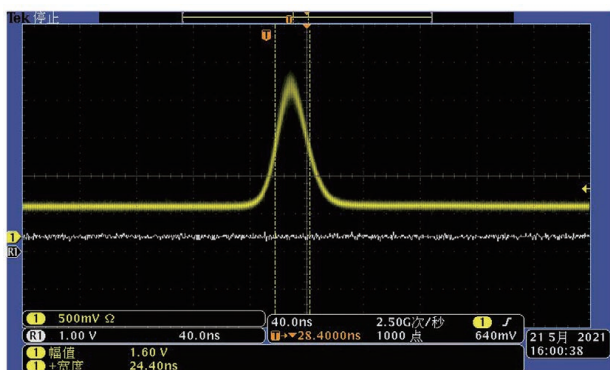


图 10 长波激光脉冲的波形

Fig. 10 Waveform of long-wave laser pulse

特性,研究人员在水平方向上旋转 CdSe 晶体以改变其相位匹配角($66.58^{\circ} \sim 67.97^{\circ}$),并测量不同相位匹配角下的输出功率和峰值波长,结果如图 11 所示。在调谐实验过程中,为了保护 CdSe 晶体,研究人员适当降低注入 OPO 中 Ho:YLF 泵浦光的功率,即降低至 29.7 W,而且在每次旋转 CdSe 晶体角度后重新调试 M 7 和 M 8,可以使 CdSe OPO 重新达到较佳的状态。

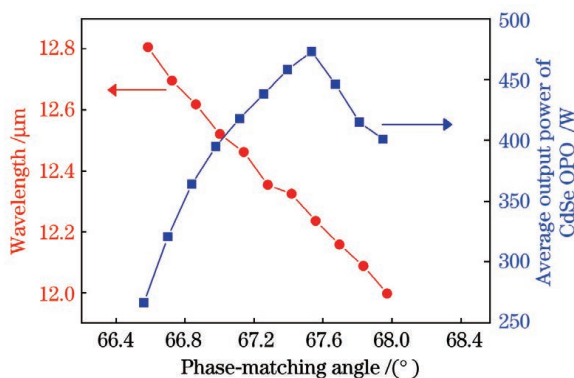


图 11 CdSe 激光的波长和平均功率与 CdSe 晶体相位匹配角度的关系

Fig. 11 Relationship among wavelength, average power of CdSe laser, and phase matching angle of CdSe crystal

观察图 11 中 CdSe 激光的波长与相位匹配角的关系曲线可知,输出波长随着相位匹配角的减小而线性增大,与图 6 闲频光的特征基本相符。当相位匹配角调至 66.58° 时,输出波长达到 $12.8 \mu\text{m}$ 。结合前面的描述,当泵浦光以 0° 入射角进入 CdSe 晶体中时,相位匹配角为 67° ,输出波长为 $12.52 \mu\text{m}$,以此为起点开始旋转晶体,可以得到对激光输出功率产生影响的因素主要有两个,即长波激光的量子效率和晶体偏置所引起的晶体端面激光损耗。对于激光输出功率而言,第二个因素始终是不利的。当相

位匹配角减小时,输出功率降低,原因在于前述两个因素此时均会导致激光功率的下降;当相位匹配角增大时,输出功率随之增大,这是因为长波激光的量子效率升高抵消了由晶体偏置引起的激光损耗,当旋转晶体的相位匹配角至 67.5° 左右时,晶体偏置所引起的激光损耗开始占据上风,则输出功率开始下降。

5 结 论

本文提供了一种 $2.05 \mu\text{m}$ Ho:YLF 光源泵浦长波 CdSe 激光器的方案并进行了实验验证。采用水冷方式对激光器中产热的光学元件进行控温,获得了 $12.5 \mu\text{m}$ 的长波激光,在 5 kHz 频率处输出平均功率的最高值为 526 mW,光光转换效率为 1.46%,斜效率为 23.4%,激光的单脉冲宽度为 24.4 ns,单脉冲能量为 0.1 mJ,单脉冲峰值功率为 4.3 kW,X 方向的光束质量因子为 4.3,Y 方向的光束质量因子为 3.2,通过调谐 CdSe 晶体的相位匹配角可以实现激光波长达到最大值,即 $12.8 \mu\text{m}$ 。所得结果验证了通过 CdSe 晶体的非线性频率变换可以获得 $12 \mu\text{m}$ 以上长波激光,为实现更长波长的激光输出进行了有益的探索。

参 考 文 献

- [1] Sobanski N, Tuzson B, Scheidegger P, et al. Advances in high-precision NO_2 measurement by quantum cascade laser absorption spectroscopy [J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1222.
- [2] Kallenbach-Thieltges A, Großbereschkamp F, Jütte H, et al. Label-free, automated classification of microsatellite status in colorectal cancer by infrared imaging [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 10161.
- [3] Nasir E F, Sanders S T. Laser absorption tomography for ammonia measurement in diesel engine exhaust [J]. Applied Physics B, 2020, 126(11): 178.
- [4] Pang X D, Ozolins O, Zhang L, et al. Free-space communications enabled by quantum cascade lasers [J]. Physica Status Solidi (a), 2021, 218(3): 2000407.
- [5] Wei L, Wu D C, Liu D, et al. Long-wave infrared ZnGeP_2 optical parametric oscillator pumped by Ho:YLF laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0101002.
魏磊, 吴德成, 刘东, 等. Ho:YLF 激光泵浦的长波红外 ZnGeP_2 光参量振荡器 [J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0101002.
- [6] Nie H K, Ning J, Zhang B T, et al. Recent progress

- of optical-superlattice-based mid-infrared optical parametric oscillators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501008.
- 聂鸿坤, 宁建, 张百涛, 等. 光学超晶格中红外光参量振荡器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501008.
- [7] Watson M A, O'Connor M V, Shepherd D P, et al. Synchronously pumped CdSe optical parametric oscillator in the 9-10 μm region[J]. Optics Letters, 2003, 28(20): 1957-1959.
- [8] Zakel A, Wagner G J, Alford W J, et al. High-power, rapidly-tunable dual-band CdSe optical parametric oscillator [C] // Advanced Solid-State Photonics, February 6-9, 2005, Vienna, Austria. Washington, D.C.: OSA, 2005: MD5.
- [9] Wang J, Yuan L G, Zhang Y W, et al. Generation of 320 mW at 10.20 μm based on CdSe long-wave infrared crystal [J]. Journal of Crystal Growth, 2018, 491: 16-19.
- [10] Chen Y, Liu G, Yang C, et al. 1 W, 10.1 μm , CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection [J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 2119-2122.
- [11] Wu H X, Huang F, Ni Y B, et al. Growth and optical properties of mid- and far-IR nonlinear crystal material CdSe [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(6): 711-715.
- 吴海信, 黄飞, 倪友保, 等. 中远红外非线性晶体材料 CdSe 生长及光学性能研究 [J]. 量子电子学报, 2010, 27(6): 711-715.
- [12] Jia N, Wang S P, Tao X T. Research progress of mid- and far-infrared nonlinear optical crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(24): 244203.
- 贾宁, 王善朋, 陶绪堂. 中远红外非线性光学晶体研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(24): 244203.
- [13] Han L, Yuan L G, Chen G, et al. 26 W mid-infrared solid-state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0302004.
- 韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26W 中波红外固体激光器 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302004.
- [14] Bhar G C. Refractive index interpolation in phase-matching [J]. Applied Optics, 1976, 15(2): 305-307.
- [15] Zhang K C, Wang X M. Nonlinear optical crystal materials 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.
- [16] Midwinter J E, Warner J. The effects of phase matching method and of crystal symmetry on the polar dependence of third-order non-linear optical polarization [J]. British Journal of Applied Physics, 1965, 16(11): 1667-1674.

Long-Wave Infrared CdSe Optical Parametric Oscillator

Wei Lei^{1,2,4*}, Li Bao⁴, Chen Guo⁴, Fang Cong⁴, Han Long⁴, Yuan Ligang⁴, Wu Decheng¹, Ni Youbao³, Wang Yingjian¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch, Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Material, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴Key Laboratory of Science and Technology on Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract

Objective An 8–15- μm long-wave infrared (IR) laser has less transmission loss in the atmosphere; therefore, it can be used for gas detection, free-space optical communications and IR electro-optic confrontation. CO_2 and ZnGeP_2 optical parametric oscillator (OPO) lasers have been used to output long-wave lasers, although it is difficult to output lasers with wavelengths longer than 12 μm . Moreover, research on such lasers is inadequate. In this study, we design a CdSe OPO scheme and experimentally test its long-wave IR output. The results show that lasers with wavelength larger than 12 μm can be obtained by using CdSe OPO, which provides a solution for obtaining lasers with longer wavelengths.

Methods The scheme of the OPO-based long-wave IR laser pumped using a 2- μm laser is discussed, in which the selection of a non-linear long-wave IR crystal is included. In this scheme, the selected non-linear crystal is CdSe and

the selected pumping laser source is 2.05 μm Ho:YLF laser with a maximum output power of 40 W (frequency is 5 kHz). The two end faces of the CdSe crystal are polished and coated with an anti-reflection film at 2, 2.4–2.7 and 10–13 μm bands, which are the key processes for reducing the optical loss and risk of damage in the crystal. The resonator of the OPO is a flat cavity, and the resonant mode is a single-resonance OPO. The Ho:YLF laser is linearly polarised, which is helpful for CdSe OPOs to achieve a high optical-to-optical conversion efficiency. The Ho:YLF laser pulsed using an acousto-optic Q-switch is pumped via a Tm:YAP laser continuous wave with a 1.94- μm wavelength and 78-W maximum output power. The Q-switch and all crystals are wrapped in thin indium foils and placed in red copper heat sinks to collect the heat absorbed by them. During the experimental apparatus operation, there is water flow at 20 $^{\circ}\text{C}$ in all heat sinks and a microchannel structure for the water flow is indicated. Finally, the typical parameters of the long-wave IR laser are measured, including average power wavelength laser beam quality repetition rate and pulse duration.

Results and Discussions The laser experimental apparatus (corresponding to the above-mentioned scheme) output long-wave laser with a wavelength longer than 12 μm . The long-wave laser is generated when the 2.05- μm pulsed laser with a 14-W average power is injected. The maximum output power of the long-wave laser is 526 mW when the 2.05- μm pulsed laser with a 36-W average power is injected (Fig.7); therefore, the corresponding optical-to-optical conversion and slope efficiencies are up to 1.46% and 23.4%, respectively. A spectrum analyser is employed to measure the spectrum of the long-wave laser with 504-mW output power, and the peak wavelength is 12.52 μm (Fig.8). A charge-coupled device laser beam analyser is employed to measure the laser beam quality factor M^2 of the long-wave laser with 504-mW output power. The focussing lens method is used for the measurements. After the measurements, the M^2 factor is 4.3 and 3.2 in the X and Y directions, respectively (Fig.9). The pulse parameters, including 5-kHz repetition frequency and 24.4-ns pulse width (Fig.10), are measured using a photoelectric detector. After calculation, the energy of the single-pulse laser is 0.1 mJ and the peak power is 4.3 kW. Finally, the CdSe crystal is rotated to change the phase-matching angle, and the maximum wavelength is 12.8 μm (Fig.11).

Conclusions We verify that a CdSe OPO is feasible to realise a long-wave laser output. First, the phase-matching mode and the phase-matching angle of the CdSe crystal are analysed and designed according to the principle that the output laser wavelength of CdSe OPO corresponds to the phase-matching angle. Second, to realise a 12- μm laser, the CdSe crystal is processed according to the phase-matching angle. Third, an experimental apparatus is set up and the effect of the long-wave CdSe OPO laser is verified; the CdSe OPO laser is pumped using the 2.05- μm Ho:YLF pulsed laser to generate long-wave lasers with a wavelength longer than 12 μm . In the future, long-wave IR lasers with longer wavelengths can be achieved just by reducing the phase-matching angle of the CdSe crystal, such as changing the cutting or incident angle of the pump laser.

Key words laser optics; lasers long-wave infrared laser; Ho:YLF; CdSe; optical parametric oscillator

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3540; 140.3580