

基于体光栅的可调谐线型腔双波长掺镱光纤激光器

白扬博 向望华 祖 鹏 师晓宙 张贵忠

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津大学教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300072)

摘要 论述了均匀加宽增益介质中利用净增益均衡原理同时输出双波长激光的可行性,使得双波长各自的损耗等于增益,抑制模式竞争,便可实现双波长输出。验证了上述原理,搭建的线型腔双波长掺镱光纤(YDF)激光器室温下可以实现单波长输出和双波长输出两种运转状态。单波长或者双波长输出时,转动体光栅角度,利用其分光谱和选波长的特性,均可使得波长分别在 1013~1078 nm 的范围内调谐。双波长同时输出时,其线宽分别约为 0.012 和 0.020 nm,最大和最小波长间隔约为 65.00 和 1.04 nm。双波长间隔较小时,双波长对彼此的抑制影响较间隔大时更为明显。双波长输出功率均衡稳定,最大输出功率可达 40.7 mW。输出双波长时,该激光器可用于光子混频和拍频产生太赫兹辐射;输出单波长时,由于其波长可调谐的特性,该激光器可用作光学相干层析(OCT)的调谐光源。

关键词 激光器;双波长;波长调谐;增益均衡;掺镱光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102004

Tunable Two Wavelengths Linear-Cavity Yb-Doped Fiber Laser Based on Volume Grating

Bai Yangbo Xiang Wanghua Zu Peng Shi Xiaozhou Zhang Guizhong

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract That homogeneously broadened fiber laser, which can output two wavelengths simultaneously, is demonstrated by using net gain equalization method which makes each wavelength's loss equals to gain in order to suppress mode competition. This linear-cavity Yb-doped fiber (YDF) laser realizes simultaneously single wavelength and two wavelengths stable output with linewidth of 0.012 and 0.020 nm respectively at room temperature. Each of the two wavelengths can be tuned approximately from 1013 to 1078 nm by the spectra separation and characteristics of selected wavelengths. The maximum and minimum wavelength spaces are 65.00 and 1.04 nm. The suppression effect to each other is stronger with smaller wavelength spacing. The output power of each wavelength equilibrates with the total maximum output power is 40.7 mW. This tunable two wavelengths laser can generate THz based on the beat frequency and also can be used as the optical source of optical coherence tomography (OCT) due to its tunable wavelength.

Key words lasers; two wavelengths; tunable wavelength; gain equalization; Yb-doped fiber

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3600; 140.3615

1 引 言

双波长激光可应用于激光光谱学、激光遥感遥测、光电对抗、激光显示、非线性光学频率变换以及激光医学等领域^[1~6]。目前,双波长光纤激光器因

输出光束质量高、散热性能好、转换效率高、结构紧凑、可靠性强等优势,成为研究热点。

近年来,主要通过增益均衡^[7]和偏振烧孔^[8~10]等方式实现均匀加宽增益介质中模式竞争的抑制和

收稿日期: 2011-06-15; **收到修改稿日期**: 2011-07-28

作者简介: 白扬博(1985—),女,博士研究生,主要从事超短脉冲光纤激光器 and 高速光通信等方面的研究。

E-mail: byb19852004@yahoo.com.cn

导师简介: 向望华(1947—),男,教授,博士生导师,主要从事超快激光与光通信技术等方面的研究。

E-mail: whxiang@tju.edu.cn

双波长激光的输出。Liu 等^[11]利用刻写在光敏保偏掺铒光纤末端的光纤布拉格光栅在线型腔光纤激光器中同时输出双波长,但双波长均不可调谐。徐攀课题组^[12]利用增益均衡法通过电可变光衰减器使环形腔光纤激光器同时输出双波长,但仅一路激光可进行波长调谐。Minyong Jeon 等^[13]对在环形腔光纤激光器两个支路上的光纤布拉格光栅分别施加不同应力实现双波长激光调谐,但双波长最大间隔仅为 9.6 nm。王钦华课题组^[14]利用偏振烧孔效应在掺铒光纤(YDF)激光器中稳定地输出单线偏振的双波长,调谐范围 1003.1~1080.7 nm,但全部器件均需使用保偏器件。

本实验全部器件均采用非保偏器件,搭建的线型腔掺铒光纤激光器可以输出单波长激光,也可以利用增益平衡方法实现双波长同时输出。无论单波长还是双波长输出,利用体光栅分光谱和选波长的特性,调整体光栅角度,均可实现各个波长的单独控制调谐,波长调谐范围为 1013~1078 nm。输出双波长时,该激光器可用于基于光子混频的太赫兹辐射的产生和检测技术,通过双波长的拍频来产生和

检测太赫兹辐射^[15];输出单波长时,因其波长可连续调谐的特性,可用作光学相干层析(OCT)的调谐光源^[16]。

2 实验装置与原理

2.1 实验装置

该线型腔掺铒双波长光纤激光器由平面全反镜(HR)、准直器、输出耦合器、隔离器(ISO)、掺铒光纤、976 nm 激光二极管(LD)、976/1064 nm 波分复用(WDM)、全光纤激光分束器(LBS)和体光栅组成,如图 1 所示。上述器件中心工作波长均为 1060 nm,非保偏器件。其中,在 975 nm 处单模 YDF 的纤芯吸收系数为 250 dB/m,长度为 1 m。两块体光栅线密度均为 1200 line/mm,分别处于光腔 1 和光腔 2 内用作腔镜。全光纤激光分束器的分光比为 3 dB,光能够双向通过该器件。输出耦合器的输出耦合比为 10%。LD 最大功率达 500 mW。隔离器防止激光反馈至抽运源或者光谱仪(OSA)损坏仪器。

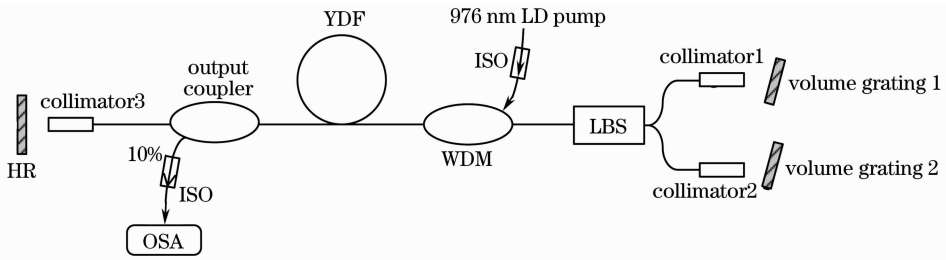


图 1 线型腔掺铒光纤激光器结构图

Fig. 1 Structure diagram of linear-cavity YDF laser

该激光器具有单波长输出和双波长输出两种运转状态。仅使光腔 1 或者光腔 2 振荡,便可输出单波长;使光腔 1 和光腔 2 同时振荡并使得各自的增益等于损耗,便可同时输出双波长。无论何种运转状态,利用体光栅的分光谱和选波长的特性可以实现波长各自的连续调谐。当沿着垂直光栅线方向调节体光栅至适当角度,从准直器出射的光经体光栅后的正一级光谱返回到腔内振荡形成激光。细调体光栅可使正一级光谱中的各波长成分依次反馈回光腔实现波长连续调谐。当沿着光栅线方向调节体光栅时,实质是调节所在支路的激光损耗。

2.2 实验原理

掺铒光纤室温下以均匀加宽为主,会产生模式竞争。本文利用增益均衡法,即是通过分别调整双波长的损耗,使得双波长各自的增益等于损耗,可保

证该激光器同时输出双波长。另一方面, Yb^{3+} 被 980 nm 激光抽运时,发射光谱在 1030 nm 处存在一个峰值,其发射截面覆盖很宽的光谱范围,理论上保证掺铒光纤激光器能够实现几十个纳米的波长调谐。

λ_1 和 λ_2 激光若要达到稳定振荡,必须满足

$$g_{\lambda_i} \times L = G_{\text{th}}(\lambda_i) = \delta_{\lambda_i}, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中 g_{λ_i} 为 λ_i 的增益系数, L 为掺铒光纤长度, $G_{\text{th}}(\lambda_i)$ 为 λ_i 的阈值单程增益, δ_{λ_i} 为 λ_i 在腔内的单程损耗。

由实验装置图 1,两个激光腔共用同一段掺铒光纤作为增益介质。调节两块体光栅,即调节 λ_1 和 λ_2 分别在两个激光腔的损耗和阈值增益,可以实现 λ_1 和 λ_2 同时振荡。如图 2 所示,曲线代表两个激光腔共用的掺铒光纤的增益曲线。当 λ_1 和 λ_2 为非强

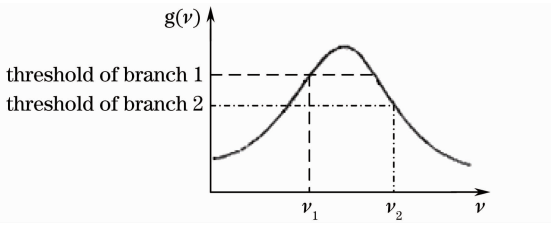


图 2 室温下掺镱光纤的增益曲线

Fig. 2 Gain curve of Yb-doped fiber at room temperature
光时,调节两块体光栅,使得支路 1 和支路 2 的阈值增益水平分离,并且 λ_1 和 λ_2 的增益分别等于各自腔内的阈值增益,此状态可一定程度上抑制均匀展宽增益介质中的模式竞争,使得 λ_1 和 λ_2 两个波长同时

稳定振荡并输出激光。

3 实验结果与讨论

3.1 单波长输出

3.1.1 单波长的连续调谐

实验利用输出耦合器以 10% 比例输出激光并送入 Anritsu MS9001A 型光谱仪测量光谱,分辨率 0.1 nm。仅使光腔 1 或者光腔 2 振荡时,该激光器为单波长长输出运转模式,调节对应体光栅的角度,单波长的连续调谐范围为 1013~1078 nm,调谐范围达 65 nm,如图 3(a)~(d)所示。

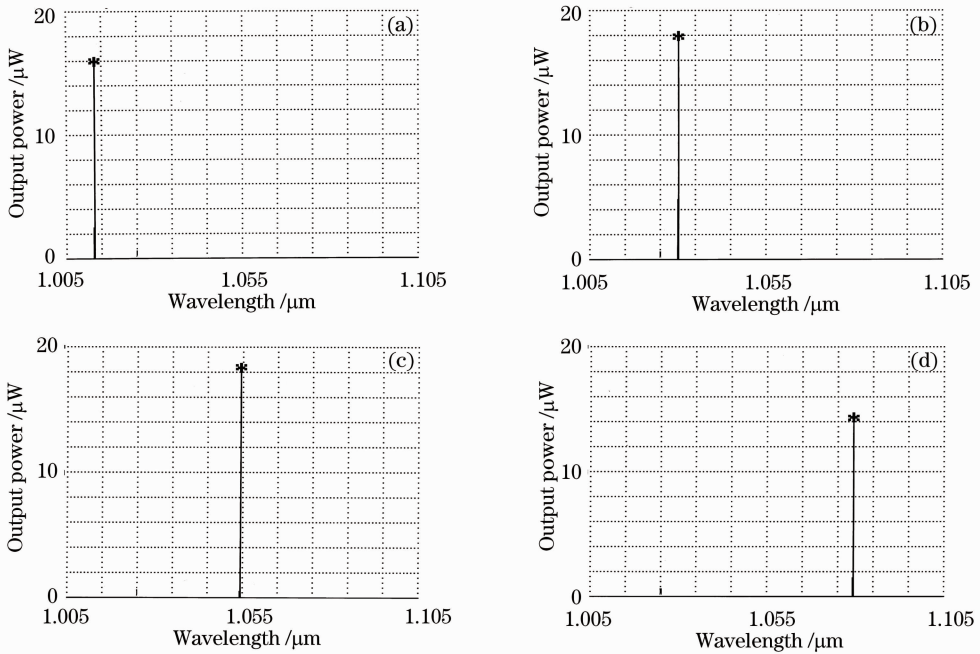


图 3 单波长调谐光谱图。(a) $\lambda=1013$ nm; (b) $\lambda=1030$ nm; (c) $\lambda=1054$ nm; (d) $\lambda=1079$ nm

Fig. 3 Spectra of tunable single wavelength. (a) $\lambda=1013$ nm; (b) $\lambda=1030$ nm; (c) $\lambda=1054$ nm; (d) $\lambda=1079$ nm

3.1.2 单波长的阈值抽运功率

单波长输出时,分别测定在 1018, 1028, 1038, 1048, 1058, 1068 和 1078 nm 处的阈值抽运功率 P_p^{th} ,如图 4 所示。其中,实线代表 P_p^{th} 曲线,呈开口向上的抛物线形状,当 $\lambda=1033$ nm 时, P_p^{th} 最小;虚线代表实验所用 YDF 的荧光谱,呈开口向下的抛物线形状。由图 4 可见, λ 从 1018 nm 向长波长方向调谐至 1033 nm 时, YDF 荧光谱中相应波长处的增益系数逐渐增高,其 P_p^{th} 逐渐变小; λ 从 1033 nm 调谐至 1078 nm 时,随着增益系数降低, P_p^{th} 逐渐变大。说明单波长的 P_p^{th} 与 YDF 的增益系数呈负相关。

3.1.3 单波长的输出功率

如图 5 所示,单波长激光的输出功率随抽运功

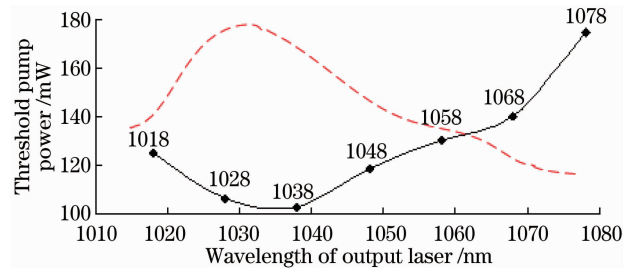


图 4 单波长的阈值抽运功率曲线图,虚线代表掺镱光纤的荧光谱

Fig. 4 P_p^{th} curve of single wavelength with dashed line representing fluorescence spectra of YDF
率 P_p 升高而变化,7 条曲线分别是调谐至 1018, 1028, 1038, 1048, 1058, 1068 和 1078 nm 处时在

同 P_p 下的功率曲线。在相同抽运功率下,各波长功率由高到低排序大致为:1028 和 1038, 1048, 1058, 1068 和 1018, 1078 nm。这是由于 YDF 荧光谱的峰值位于约 1031.5, 1028 和 1038 nm 处的增益系数较高,由此处向短波长和长波长方向延伸,各波长增益系数逐渐降低。说明在相同抽运功率下,各波长中阈值抽运功率较低的那个波长更加容易起振。

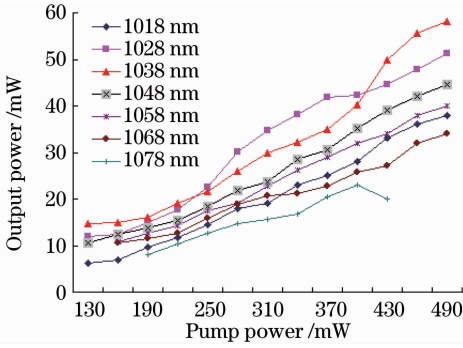


图 5 不同抽运功率下的单波长激光输出功率曲线

Fig. 5 Output power curve of single wavelength laser with different pump powers

图 5 中, 1018, 1028, 1038, 1048, 1058 和 1068 nm 这 6 条曲线, 输出功率随抽运功率增大呈线性增长。因实验所用 LD 输出功率有限, 未观察到饱和现象。单波长 1038 nm 的最高功率为 58.2 mW。此激光器斜率效率约 10.9%, 光-光转换效率约 12.1%, 这是由于在激光器中作为腔镜的体光栅, 其反射率较低所致。

图 5 中, 1078 nm 的功率在 P_p 为 400 mW 时最大, 而后随 P_p 升高而降低; 当 P_p 高于 430 mW 时, 1078 nm 激光消失。原因如下: 图 6 是 Yb^{3+} 室温下 Stark 分裂后的能级结构图。976 nm 激光抽运时, 该激光器系统可视为准四能级系统。由于掺镱光纤的热效应, 随着功率增大, 1078 nm 的量子亏损最大, 热效应相对较高。 Yb^{3+} 上能级的 Stark 分裂谱中, 粒子随温度按 Boltzman 分布, 相应粒子大量分布到 e 能级, 并且由于温度猝灭的影响, 随着温度升高, 晶格振动加剧, 从而使发光中心的晶格弛豫增强, 大量分布在 e 能级的粒子从 e 能级到 c 能级的无辐射跃迁几率增大, 发光效率降低, 导致 1078 nm 激光功率降低, 最终 1078 nm 激光消失。

3.2 双波长输出

3.2.1 双波长的连续调谐

双波长同时输出时, 测得 λ_1 和 λ_2 的可调谐范围分别为 1013~1078 nm, 调谐范围达 65 nm。 λ_1

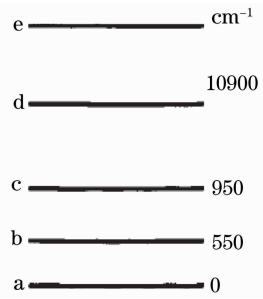


图 6 Yb^{3+} 室温下 Stark 分裂后的能级结构图

Fig. 6 Structural diagram of energy level of Yb^{3+} after Stark splitting at room temperature

和 λ_2 线宽分别为 0.012 和 0.020 nm, 双波长最大和最小波长间隔分别约为 65.00 和 1.04 nm, 如图 7 和图 8(a), (b) 所示。

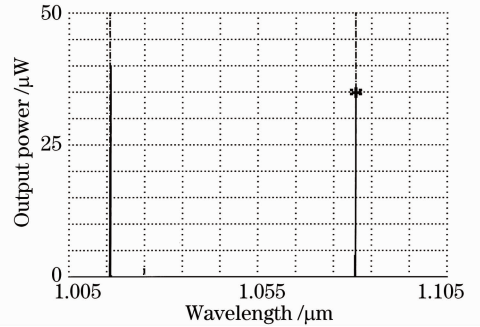


图 7 双波长最大波长间隔光谱图

Fig. 7 Spectrum of maximum wavelength spacing between two wavelengths

如图 9(a)~(d) 所示, 将 λ_1 固定于 1016 nm, 调节体光栅 2 使得 λ_2 从 1078 nm 逐渐向短波长方向调谐至 1013 nm。图 9(d) 中, λ_2 的波长比 λ_1 的短。

将 λ_2 固定于 1078 nm, 调节体光栅 1 使得 λ_1 从 1018 nm 逐渐向长波长方向连续调谐至 1049 nm, 如图 10(a)~(d) 所示。

3.2.2 双波长的阈值抽运功率

双波长同时输出时, 不同的 (λ_1, λ_2) 双波长对的阈值抽运功率 $P_p^{th}(\lambda_1, \lambda_2)$ 如图 11 所示。由图 11 和图 4 可知, 对于 (λ_1, λ_2) 双波长对, $P_p^{th}(\lambda_1, \lambda_2) > \max\{P_p^{th}(\lambda_1), P_p^{th}(\lambda_2)\}$ 。这是因为: 抽运功率必须大于 λ_1 或 λ_2 单独输出时的 P_p^{th} ; 为使双波长 λ_1 和 λ_2 同时输出, 需调节体光栅, 即对单独输出时振荡较强的那个波长激光施加一定损耗, 利用增益均衡法来抑制双波长模式竞争, 实现同时稳定输出。图 11 中, $P_p^{th}(1045 \text{ nm}, 1052 \text{ nm}) > P_p^{th}(1038 \text{ nm}, 1058 \text{ nm})$, 说明双波长间隔较小时, 双波长对彼此竞争的影响和抑制作用, 较之双波长间隔大时更为明显, 不易同时起振。

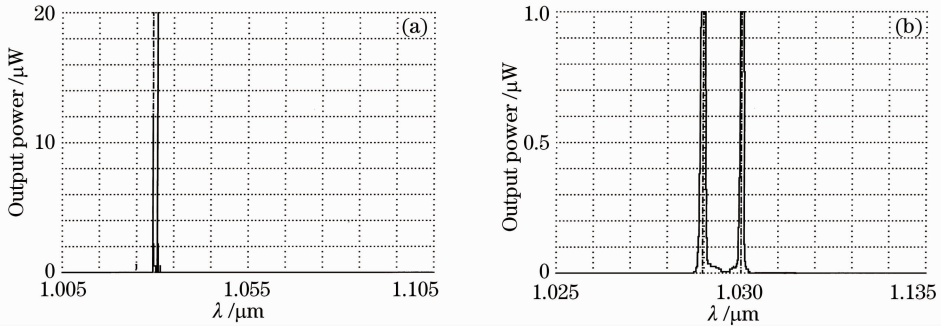


图 8 双波长最小波长间隔光谱图。(a)宽扫描范围光谱图;(b)细部扫描光谱图
Fig. 8 Spectra of the minimum wavelength spacing between two wavelengths. (a) Spectra with wide scanning range; (b) detail spectra

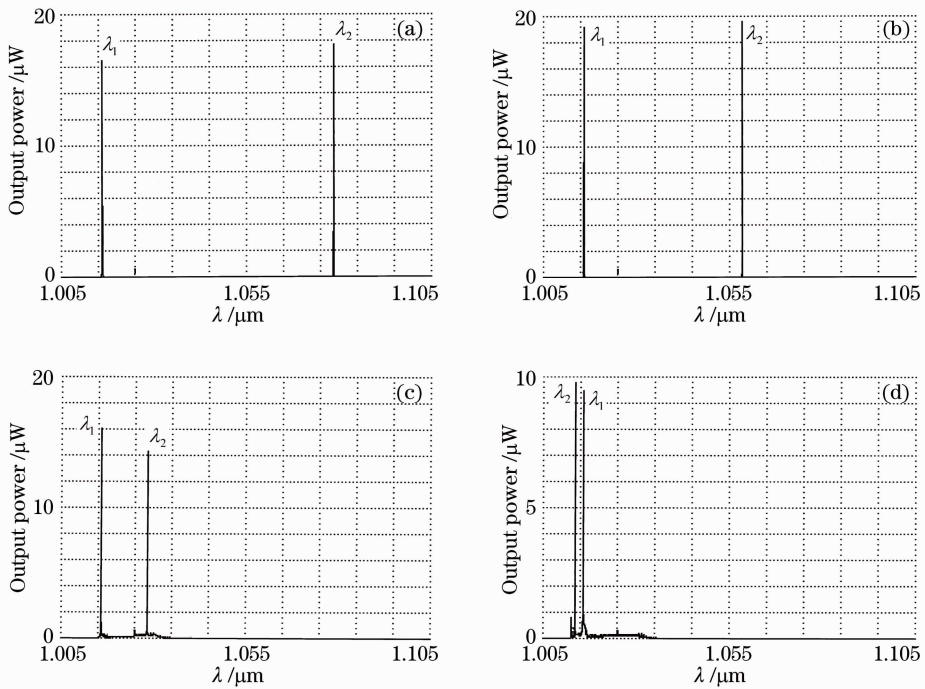


图 9 $\lambda_1 = 1015 \text{ nm}$ 时 λ_2 向短波长方向连续调谐光谱图。(a) $\lambda_2 = 1078 \text{ nm}$; (b) $\lambda_2 = 1058 \text{ nm}$;
(c) $\lambda_2 = 1028 \text{ nm}$; (d) $\lambda_2 = 1013 \text{ nm}$

Fig. 9 λ_2 is tuned from long wavelength to short wavelength when $\lambda_1 = 1015 \text{ nm}$. (a) $\lambda_2 = 1078 \text{ nm}$;
(b) $\lambda_2 = 1058 \text{ nm}$; (c) $\lambda_2 = 1028 \text{ nm}$; (d) $\lambda_2 = 1013 \text{ nm}$

3.2.3 双波长的输出总功率

不同的双波长对振荡时,需要重新调整体光栅对双波长施加的损耗以保证双波长同时输出。图 12 显示双波长对的功率随抽运功率 P_p 升高而变化。在相同 P_p 下,双波长对的输出功率按照由高到低大致排序为:(1038 nm, 1058 nm)、(1045 nm, 1052 nm)、(1028 nm, 1068 nm)、(1018 nm, 1078 nm)。形成这一排序的原因是:YDF 荧光谱呈开口向下的抛物线形,峰值处于 1031.5 nm 处,增益系数最高,由此处向短波长和长波长方向延伸增益系数逐渐降低。说明在相同 P_p 下,阈值抽运功

率较低的那组双波长对更加容易起振。

由图 5 和图 12 可知,每一组双波长的输出功率,小于在相同抽运功率 P_p 下两波长各自振荡的功率之和。双波长输出时斜率效率约 9.0%,光-光转换效率约 8.3%,比单波长输出时低。这是因为:在相同 P_p 下,YDF 中的反转粒子数相同;当单波长振荡时,调整体光栅使得损耗最小、输出功率最大,而双波长输出时,体光栅需要对两波长施加损耗以保证同时振荡。

双波长功率随抽运功率升高呈线性增长,由于抽运源输出功率有限,本实验未能观察到饱和现象。所

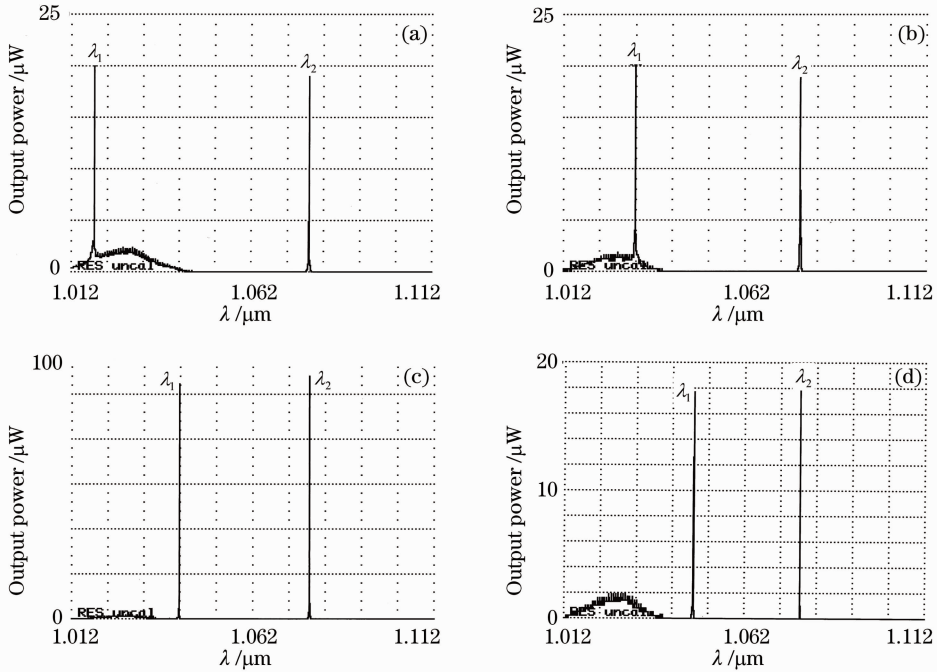


图 10 λ_2 固定于 1078 nm, λ_1 向长波长方向连续调谐光谱图。(a) $\lambda_1 = 1018$ nm;
(b) $\lambda_1 = 1032$ nm; (c) $\lambda_1 = 1042$ nm; (d) $\lambda_1 = 1055$ nm

Fig. 10 λ_1 is tuned from short wavelength to long wavelength when $\lambda_2 = 1078$ nm. (a) $\lambda_1 = 1018$ nm;
(b) $\lambda_1 = 1032$ nm; (c) $\lambda_1 = 1042$ nm; (d) $\lambda_1 = 1055$ nm

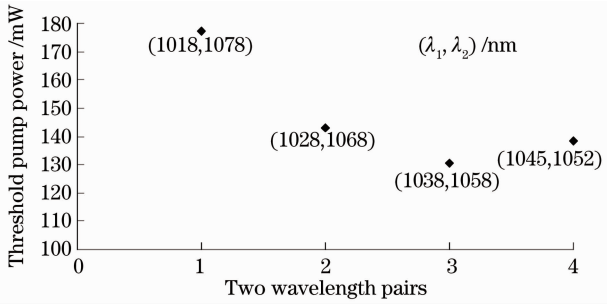


图 11 双波长对的阈值抽运功率

Fig. 11 Threshold pump power of different two wavelengths pair

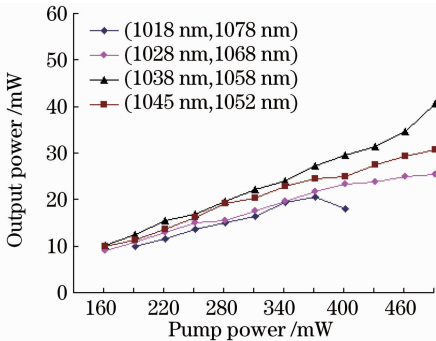


图 12 双波长对在不同抽运功率下的输出功率

Fig. 12 Output power of two wavelengths pair with different pump powers

测 4 组双波长对中, 输出功率最大值为 40.7 mW, 出

现在(1038 nm, 1058 nm)振荡时, 此时 P_p 为 490 mW。受 1078 nm 激光影响, 双波长对 (1018 nm, 1078 nm) 的功率, 在 P_p 为 370 mW 时达到最大值, 随着 P_p 继续升高, 此双波长对的功率逐渐降低, 当 P_p 高于 400 mW 时, 1078 nm 激光消失。

3.2.4 双波长的输出功率比例

双波长对 (1018 nm, 1078 nm) 输出时, 测得处于各抽运功率下, 1018 和 1078 nm 激光输出功率的比例, 如图 13 所示。抽运功率升高至 400 mW 时, 由于 1078 nm 激光功率降低, 导致其输出功率所占比例下降。

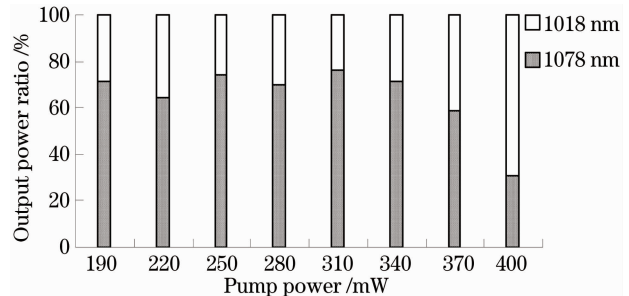


图 13 1018 和 1078 nm 激光在不同抽运功率下的输出功率比例

Fig. 13 Output power ratio of 1018 and 1078 nm laser with different pump powers

3.2.5 双波长的稳定性

图 14 是使用 Ando AQ-6315A 光谱仪以 10 s/次的频率扫描测得的双波长光谱图,分辨率 0.05 nm。其中图 (a) ~ (f) 分别为 (1016 nm, 1080 nm), (1018 nm, 1078 nm), (1028 nm, 1068 nm), (1038 nm, 1058 nm), (1045 nm, 1052 nm), (1029.5 nm, 1031.2 nm) 双波长对的重复扫描图;图(a)~(d)中横轴波长扫描范围为 1005~1090 nm,图(e)扫描范围缩

至 1040~1060 nm,图(f)扫描范围 1027~1035 nm。双波长间隔较大时,具有较好的稳定性,光谱图上看到的振幅的微小变化主要由温度、气流等环境扰动引起。图 14(f)中,双波长间隔较小,仅为 1.7 nm 时,双波长输出的稳定性变差,此时模式竞争对彼此的影响和抑制作用较为明显,外界条件的扰动容易打破增益均衡法所形成的平衡。因此,双波长同时输出时要求温度、气流、抽运功率等尽量恒定。

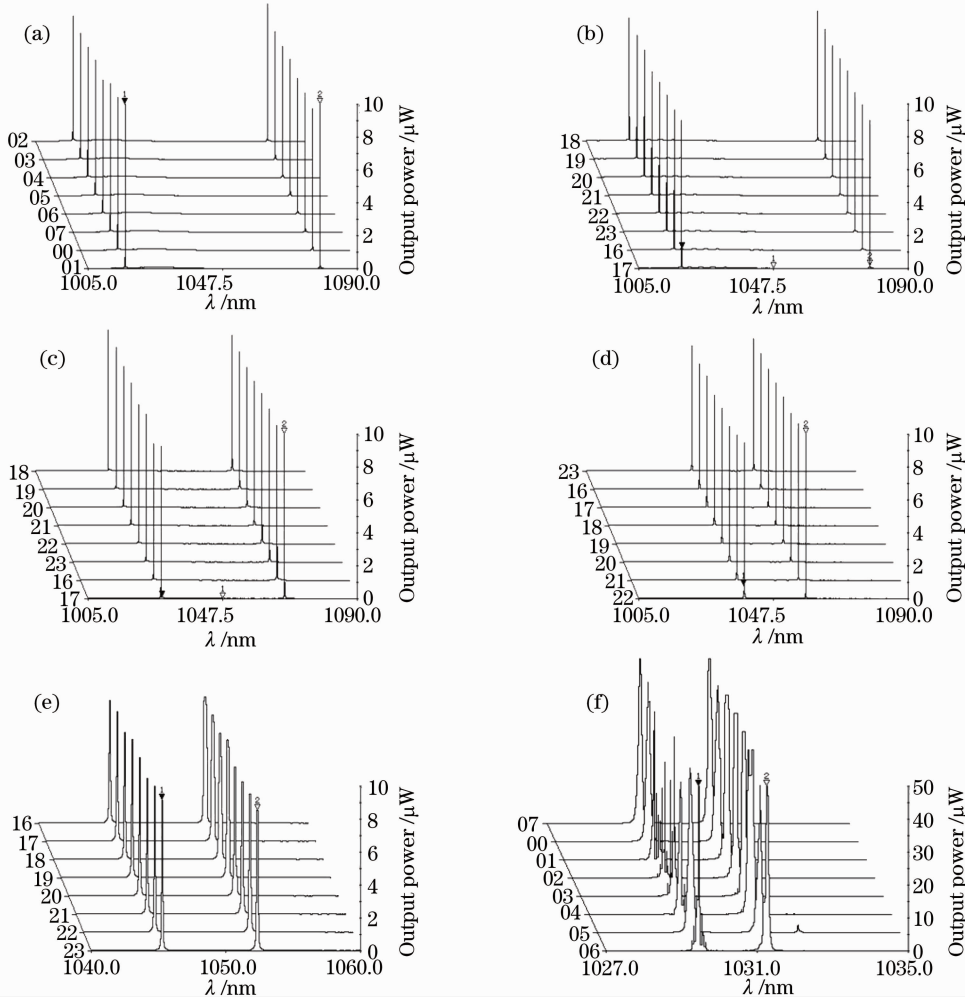


图 14 双波长输出的重复扫描光谱图。(a) (1016 nm, 1080 nm); (b) (1018 nm, 1078 nm); (c) (1028 nm, 1068 nm); (d) (1038 nm, 1058 nm); (e) (1045 nm, 1052 nm); (f) (1029.5 nm, 1031.2 nm)

Fig. 14 Repeated scanning spectra of two wavelengths laser. (a) (1016 nm, 1080 nm); (b) (1018 nm, 1078 nm); (c) (1028 nm, 1068 nm); (d) (1038 nm, 1058 nm); (e) (1045 nm, 1052 nm); (f) (1029.5 nm, 1031.2 nm)

4 结 论

本实验利用增益平衡方法在线型腔掺镱光纤激光器中实现了单波长输出和双波长输出两种运转模式。体光栅起到线型腔的腔镜作用,并且利用其分光谱和选波长的特性实现了波长的单独控制调谐。双波长输出时,双波长均可在 1013~1078 nm 范围

内调谐,双波长最大和最小间隔分别约为 65.00 和 1.04 nm,双波长线宽分别为 0.012 和 0.020 nm。双波长最大输出功率 40.7 mW,光-光转换效率约 8.3%,斜率效率约 9.0%。实验证实,双波长彼此竞争的影响和抑制作用,随着双波长间隔变小而逐渐加强。该激光器输出双波长时,可应用于基于光子混频的太赫兹源技术,通过双波长的拍频产生太

赫兹辐射;输出单波长时,由于其波长连续调谐的特性,该激光器可用作 OCT 的调谐光源。

参 考 文 献

- 1 Wang Jiaxian, Zhang Juncheng, Su Peilin. Investigation on a compound resonator Nd:YVO₄ laser with dual-wavelength output and intracavity sum-frequency mixing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 1954~1958
王加贤, 张峻诚, 苏培林. Nd:YVO₄ 复合腔激光器双波长激光输出及腔内和频研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(12): 1954~1958
- 2 Wang Jiaxian, Lü Fengping, Su Yafei. Investigation on a compound resonator Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG laser with dual Q-switching operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 399~402
王加贤, 吕凤萍, 苏娅菲. 双调 Q 复合腔 Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 399~402
- 3 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581
张强, 姚建铨, 温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- 4 Ye Qing, Li Fuxin, Liu Yu *et al.*. Dual-wavelength optical coherence tomography system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041701
叶青, 李福新, 刘宇等. 双波长光学相干层析成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041701
- 5 Zhong Zhiqing, Liu Bo, Fan Aiyuan *et al.*. Two-wavelength Mie scattering lidar with two receivers[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(3): 173~178
钟志庆, 刘博, 范爱媛等. 双波长双视场米散射激光雷达[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(3): 173~178
- 6 Shen Hongyuan. Dual wavelength crystal lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(5): 334~346
沈鸿元. 双波长晶体激光器[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(5): 334~346
- 7 Y. Liu, X. Dong, P. Shum *et al.*. Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9293~9298
- 8 Z. Liu, Y. Liu, J. Du *et al.*. Switchable triple-wavelength erbium-doped fiber laser using a single fiber Bragg grating in polarization-maintaining fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **279**(1): 168~172
- 9 Jiang Mingshun, Meng Ling, Feng Dejun *et al.*. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on a polarization maintaining fiber Bragg grating [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010, **32**(6): 933~938
姜明顺, 孟玲, 冯德军等. 基于 PM-FBG 的可开关双波长掺铒光纤激光器[J]. *压电与声光*, 2010, **32**(6): 933~938
- 10 Li Yao, Feng Xinhuan, Sun Lei *et al.*. Dual-wavelength fiber laser based on polarisation hole-burning effect at room temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 173~175
李尧, 冯新焕, 孙磊等. 用偏振烧孔实现的室温双波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 173~175
- 11 Liu Zhiming, Li Jian. A novel dual-wavelength fiber laser based on photosensitive and polarization maintaining erbium-doped fiber [C]. Chengdu: Symposium on Photonics and Optoelectronic, 2010, 2010. 1~3
- 12 Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina *et al.*. Output power stability of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1347~1351
徐攀, 胡正良, 马丽娜等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1347~1351
- 13 M. Jeon, N. Kim, J. Shin *et al.*. Widely tunable dual-wavelength Er³⁺-doped fiber laser for tunable continuous-wave terahertz radiation [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12291~12297
- 14 Liu Dongfeng, Wang Chinhua. Single linearly polarized, widely and freely tunable two wavelengths Yb³⁺-doped fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(1): 98~103
- 15 Zheng Fanghua, Liu Huan, Li Xifu *et al.*. Simultaneous dual-wavelength quasi-continuous-wave laser-diode-end-pumped Nd:YAG laser for terahertz wave source[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 200~205
郑芳华, 刘欢, 李喜福等. 产生太赫兹辐射源的 Nd:YAG 双波长准连续激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 200~205
- 16 Li Yanjun. Novel All-Fiber Endoscopic Optical Coherence Tomography and Study on the Formation Mechanism of Long Period Fiber Gratings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. 17~18
李艳军. 全光纤 OCT 内窥镜技术及长周期光纤光栅形成机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. 17~18

栏目编辑: 宋梅梅