

文章编号: 0258-7025(2010)04-0934-05

基于偏振滤波原理的宽可调谐掺 Yb³⁺ 环形 光纤激光器

唐毅 康智慧 姜立运 杜杉 戴振文

(吉林大学物理学院相干光与原子分子光谱教育部重点实验室(筹), 吉林 长春 130021)

摘要 以 973 nm 半导体激光器(LD)为抽运源,高掺杂浓度 Yb³⁺ 光纤为增益介质,构建了一套环形腔光纤激光器,通过调整腔内由普通光纤和偏振器件构成的偏振态滤波器,得到连续调谐宽度 24 nm(1030~1054 nm)、激光阈值为 49 mW 的激光输出。通过对部分腔体光纤施加均匀应力的方法较大地扩展了激光器的调谐范围,实现了宽达 57 nm(1021~1078 nm)的可调谐激光输出。与文献报道的基于偏振滤波原理的其他可调谐 Yb³⁺ 光纤激光器相比,构建的激光器实现了更大范围的可调谐性。

关键词 光纤光学;光纤激光器;可调谐;偏振滤波;掺 Yb³⁺ 光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.0934

Tunable Yb³⁺-Doped Fiber Ring Laser Based on the Principle of Polarization Filter

Tang Yi Kang Zhihui Jiang Liyun Du Shan Dai Zhenwen

(Key Laboratory of Coherent Light, Atomic and Molecular Spectroscopy, Ministry of Education,
College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China)

Abstract A ring-cavity fiber laser using a 973-nm laser diode (LD) as pump source and a highly Yb³⁺-doped fiber as gain medium is built. A laser output with a continuously-tunable width of 24 nm (1030~1054 nm) and a threshold power of 49 mW is obtained by tuning the intra-cavity polarization filter, which is made of a common fiber and some polarization elements. Moreover, we significantly expand the tunable range to 57 nm (1021~1078 nm) by introducing uniform stress in a part of cavity fiber. Compared with other tunable Yb³⁺-doped fiber lasers on the principle of polarization filter, this laser system has realized a much wider tunable width.

Key words fiber optics; fiber laser; tunability; polarization filter; Yb³⁺-doped fiber

1 引言

掺 Yb³⁺ 光纤激光器吸收和增益带宽很宽,可以采用不同波长的抽运源在 970~1200 nm 波段获得激光,在光纤通信、光纤传感系统和现代光谱技术领域具有重要的应用价值,所以近年来以掺 Yb³⁺ 光纤作为增益介质的可调谐光纤激光器成为研究的热点。人们提出了很多调谐方案,其中以光滤波器调谐为主。目前可调谐光纤激光器中使用的可调谐光滤波器有旋转光栅^[1]、法-珀(F-P)标准具^[2]、声光滤

波器^[3]、电调液晶标准具^[4]、光纤光栅^[5]等,调谐范围从几纳米到几十纳米。但是这些调谐器件(除光纤光栅外)结构复杂,插入损耗大,不便于实际应用,而目前商品化的光纤光栅仅适用于通信波段,1030 nm 波段的光纤光栅需要定做,且价格昂贵。

本文以主偏振态理论为基础,利用光纤和偏振器件构成一种偏振态滤波器,研究以 Yb³⁺ 光纤为工作介质的可调谐环形光纤激光器。基于同样原理的可调谐光纤激光器研究已有一些报道^[6~8],本文则

收稿日期:2009-06-02;收到修改稿日期:2009-09-04

基金项目:新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0302)和吉林大学研究生创新基金(20080202)资助课题。

作者简介:唐毅(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail:thinkbefore@163.com

导师简介:戴振文(1969—),男,博士,教授,主要从事新型激光机理与激光器方面的研究。

E-mail:dai@jlu.edu.cn(通信联系人)

通过使用光纤螺旋管对腔体光纤施加应力的办法,使激光调谐宽度得到大幅度提高。

2 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示,整个掺 Yb³⁺ 环形光纤激光器是由高掺杂浓度的掺 Yb³⁺ 光纤,偏振无关光隔离器(isolator),2 个光纤准直器(collimator),1 个 980 nm/1060 nm 波分复用器(WDM),2 个 λ/4 波片(QWP),1 个 λ/2 波片(HWP)和 1 个偏振分光棱镜(PBS)组成。抽运源为中心输出波长 973 nm 的激光二极管(LD),最大输出功率约为 350 mW。抽运光经 WDM 耦合进入掺 Yb³⁺ 光纤。根据生产商提供的性能参数可知,掺 Yb³⁺ 光纤对 975 nm 的吸收为 250 dB/m,数值孔径(NA)为 0.11。由于光纤掺杂浓度很高,所以使用较短的光纤就可以实现激光输出,同时有利于提高激光器的斜率效率,降低阈值功率^[9]。实验中采用的 Yb³⁺ 光纤长度为 74 cm,整个腔长约 7 m。偏振无关型光纤隔离器的隔离度大于 30 dB,回波损耗大于 55 dB,保证激光在环形腔中单向传输。

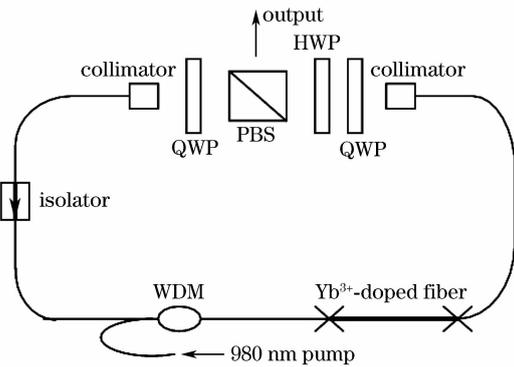


图 1 可调谐掺 Yb³⁺ 环形光纤激光器装置图

Fig. 1 Schematic diagram of tunable Yb³⁺-doped ring fiber laser

不同偏振态的激光通过检偏器时,会经历不同的偏振损耗。在模式竞争的作用下,激光器的输出中心波长会根据增益与损耗的平衡关系发生相应改变。对任意一个没有偏振相关损耗的单模光纤传输系统而言,都存在两对特殊的相互正交的偏振态,分别称为输入主偏振态和输出主偏振态。当不同频率的信号光以输入主偏振态入射时,则会以输出主偏振态形式输出,从而保持偏振态不变。其他入射情况则可按这对正交偏振主态进行分解,进而确定光纤系统偏振态随频率演变的特性。

环形腔的等效模型如图 2 所示,其中 P1 和 P2

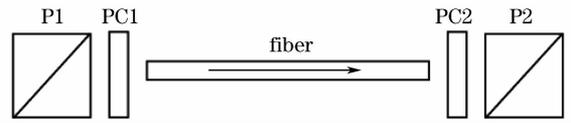


图 2 环形腔的等效模型图

Fig. 2 Equivalent diagram of circular cavity

等效于 PBS 棱镜,PC1 等效于图 1 中左侧的 λ/4 波片,PC2 等效于右侧的 λ/2 和 λ/4 波片,PC1 和 PC2 之间为腔体光纤。PC1 和 PC2 既是偏振态控制器件,同时也是该结构的调谐装置,P1 和 P2 同时起到起偏和检偏的作用。

偏振控制器 PC1 可以控制信号光进入光纤的偏振矢量取向角及其相位,从 P1 出射的线偏振光透过 PC1 后场振幅可表示为

$$\mathbf{E}_{\text{in}}(\omega) = A_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{in}} \exp(i\phi_x) \\ \sin \theta_{\text{in}} \exp(i\phi_y) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 A_0 为信号光幅度; θ_{in} 为偏振矢量取向角; ϕ_x, ϕ_y 分别为水平与垂直偏振分量的相位。当透过 PC1 的光依次通过腔体光纤、偏振控制器 PC2 和检偏器 P2 后,形成的输出光场将变为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{P} \mathbf{T}_{\text{PC2}} \mathbf{T}_{\text{F}} \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{T}_{\text{F}}, \mathbf{T}_{\text{PC2}}$ 和 \mathbf{P} 分别为腔体光纤、偏振控制器 PC2 和检偏器的偏振变换 Jones 矩阵。对于 PC2 变换,其 Jones 矩阵为^[10]

$$\mathbf{T}_{\text{PC2}} = \begin{bmatrix} t \exp(-i\beta) & i \sqrt{1-t^2} \exp(-i\alpha) \\ i \sqrt{1-t^2} \exp(i\alpha) & t \exp(i\beta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 t 为 PC2 的透射率, α 和 β 分别为两个波片快轴与实验坐标系水平轴的夹角。检偏器的 Jones 矩阵为

$$\mathbf{P}(\theta_p) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_p & \cos \theta_p \sin \theta_p \\ \cos \theta_p \sin \theta_p & \sin^2 \theta_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 θ_p 为在实验室坐标系中的偏振取向角。

对于腔体光纤,采用主偏振态方法进行分析,其偏振变换 Jones 矩阵为^[11]

$$\mathbf{T}_{\text{F}} = \mathbf{S}^{-1} \times \begin{bmatrix} \exp[i\Delta\phi^+(\omega, \omega_0)] & 0 \\ 0 & \exp[i\Delta\phi^-(\omega, \omega_0)] \end{bmatrix} \mathbf{S}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\phi^\pm(\omega, \omega_0)$ 代表输出偏振矢量 $\mathbf{V}_\pm^\pm(\omega)$ 相对于输入主偏振态矢量 $\mathbf{e}_\pm^\pm(\omega_0)$ 的相位差, \mathbf{S} 为实验室坐标系到主偏振态坐标系的变换矩阵。所以整个偏振态滤波器的透射频谱可表示为

$$T = \frac{|\mathbf{E}_{\text{out}}|^2}{|\mathbf{E}_{\text{in}}|^2} = |\mathbf{P} \mathbf{T}_{\text{PC2}} \mathbf{T}_{\text{F}}|^2, \quad (6)$$

经过进一步推导,可以得到滤波器中心波长与信号光波长及它的两个偏振分量的相位差 $\Delta\phi$ 满足关系^[12]

$$\lambda_c = \lambda_0 + \frac{\lambda_0^2}{2\pi\Delta nL} [2n\pi - \Delta\beta(\lambda_0)L + \Delta\phi],$$

$$(n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (7)$$

式中 $\Delta\phi = \phi_x - \phi_y$, $\Delta\beta(\lambda_0) = \Delta\beta_x(\lambda_0) - \Delta\beta_y(\lambda_0)$ 为偏振模色散, $\Delta n = n_x - n_y$ 为光纤的双折射系数, λ_0 约为 1030 nm。由(7)式可知,激光的调谐作用主要取决于从 PC1 出来的信号光进入光纤时两偏振分量相位差 $\Delta\phi$, 所以改变 PC1 的方位角即可实现调谐, 激光调谐的实现就是基于这个原理。

3 实验结果及分析

实验过程中,将 973 nm 抽运光功率保持在 224 mW,使用光谱分析仪对掺 Yb^{3+} 环形光纤激光器输出激光的波长和强度进行了监测。光谱仪型号为 Anritsu MS9710C,视频带宽设为 1 kHz,为便于展示光谱图,采集光谱时分辨率设为 0.5 nm,而测量激光线宽时分辨率设为 0.05 nm。通过调整 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片的方位角,调谐输出波长,可以获得波长在 1030~1054 nm 范围内连续可调谐的激光输出,调谐宽度达 24 nm。激光强度随波长的变化如图 3 所示,为避免光谱仪损伤,测量时仅将很小一部分激光由光纤跳线导入光谱分析仪。在调节波片的过程中,发现图 1 中左侧的 $\lambda/4$ 波片主要起调谐波长的作用,而 $\lambda/2$ 波片则主要起调节激光输出功率的作用。在同一抽运功率下,激光线宽随波长的变化不大,线宽波动值小于 0.01 nm。调谐过程中发现输出功率随着波长向长波方向调谐而减小,这是因为 Yb^{3+} 光纤的增益曲线并不是平坦的,最大增益在 1030 nm 附近,两侧的增益是递减的。短波方向没

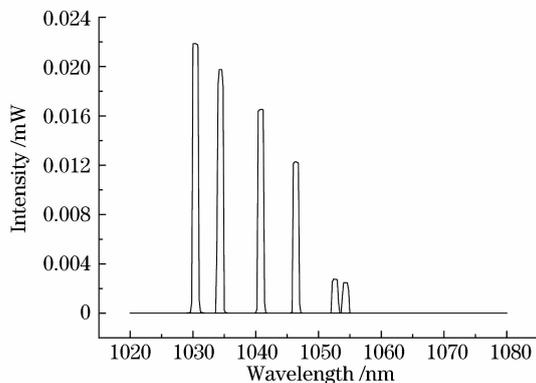


图 3 光纤激光器连续调谐输出光谱

Fig. 3 Tunable output spectrum of fiber laser

有激光输出主要与滤波器的滤波特性有关。

为了扩展激光器的调谐范围,尝试在环形腔中对部分光纤施加应力来影响偏振模式,将长度约为 7 m 的 1060-XP 型光纤缠绕在直径 34 mm 的圆柱形模具上,制成光纤螺线管,将其联入环形腔中,如图 4 所示。同样在 224 mW 抽运功率下,通过调节由波片组成的偏振控制器的方位角,可以实现波长区间在 1021~1078 nm,宽度达 57 nm 的可调谐激光输出。缠绕在圆柱形模具上的光纤会承受一定的应力,并比较均匀地分布在光纤上,使光纤具有某种规则的双折射特征的分布,其光学性能相当于双折射光纤^[13]。当振荡光经过光纤螺线管时,由于应力双折射所导致的偏振模色散要明显高于普通光纤,通过调节图 4 左侧的 $\lambda/4$ 波片,振荡光的两个偏振分量间可以获得更大的相位差 $\Delta\phi$ 。由(7)式可知,如果 $\Delta\phi$ 可取的最大值增加则可以获得更宽的波长调谐范围。本实验正是基于此原理来实现调谐范围的拓展。目前 1030 nm 波段的双折射光纤十分昂贵,甚至需要定制,而本方案可以得到很好的效果并且经济实用,可见这项研究工作有利于降低可调谐光纤激光器的成本。

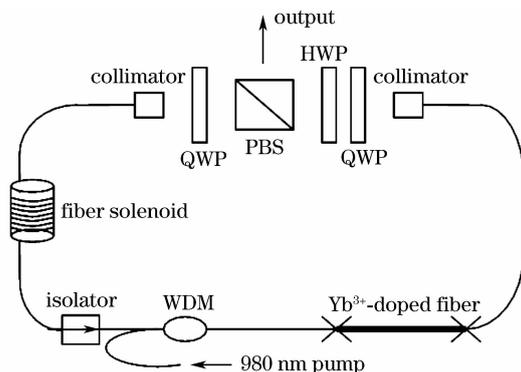


图 4 加入光纤螺线管后的激光器装置图

Fig. 4 Schematic diagram of laser added fiber sleeve

观察发现,光纤螺线管的加入对输出激光的线宽并没有明显影响,但激光线宽会随着抽运功率增大而变宽,这是由于大的抽运功率会使更多纵模起振。在抽运功率低于 325 mW 的情况下,激光线宽在 0.03~0.1 nm 之间。光谱分析仪测得的激光强度随波长的变化如图 5 所示。可以看出,输出功率随波长呈“W”型变化,该现象是由 Yb^{3+} 光纤的增益特性和偏振滤波器的滤波特性共同决定的,进一步的解释需要细致的关于偏振滤波器光损耗特性的理论研究。

加入光纤螺线管前后的激光输出功率与抽运光

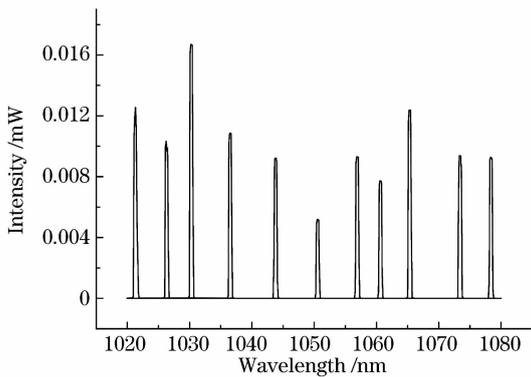


图 5 加入光纤螺线管后光纤激光器连续调谐输出光谱

Fig. 5 Tunable output spectrum of fiber laser added fiber solenoid

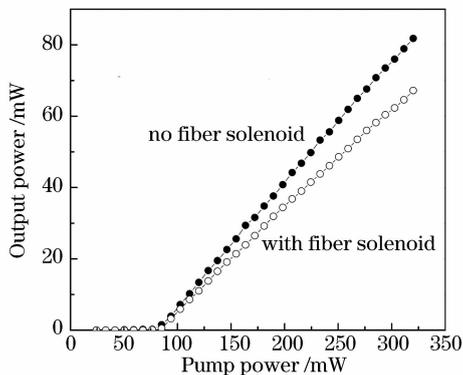


图 6 1030 nm 激光输出功率与抽运功率的关系

Fig. 6 Output power of 1030 nm as a function of pump power

功率的关系曲线如图 6 所示,光功率数值是由功率计(COHERENT LM-10 HTD)在 1030 nm 输出时测量的。实验测得传统结构的激光器阈值抽运功率为 49 mW,联入光纤螺线管后的阈值抽运功率为 75 mW。图 6 表明,加入光纤螺线管后激光器的斜率效率有所降低,从 35% 降低到 28%。其主要原因是光纤螺线管的弯曲带来附加的振荡光传输损耗^[14],这种损耗可以通过适当改变光纤螺线管的直径来降低。图 7 给出无光纤螺线管时的 1030 nm 激光在 30 min 内的输出稳定性曲线,计算得出不稳定度为 0.11%。实验还发现,光纤螺线管的使用对激光器的输出稳定性没有影响。可见搭建的光纤激光器的稳定性很好,这主要得益于稳定的抽运源和稳固的光路结构,光纤环形腔结构的采用使得热效应对腔模的影响较小,实验中功率在毫瓦量级,自然散热即可保持输出稳定。

研究的激光器中,存在的腔内损耗主要有:腔内各器件的插入损耗、部分链路法兰盘链接带来的链接损耗以及采用空间光路带来的耦合损耗等。可以

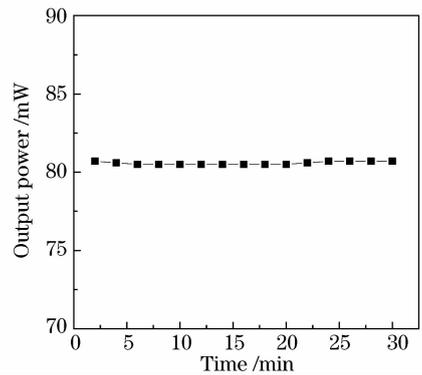


图 7 1030 nm 激光的输出功率稳定性

Fig. 7 Stability of the output power of 1030 nm laser

肯定,采用全熔接连接和选用插入损耗更小的元器件,可有效减小熔接损耗和插入损耗。如果同时进一步优化掺 Yb³⁺ 光纤的长度,这种激光器的输出功率可以得到进一步提高。

4 结 论

利用普通光纤和偏振器件构造一种偏振态滤波器,用于环形腔 Yb³⁺ 光纤激光器,实现了可调谐宽度 24 nm 的窄线宽连续激光输出。提出了一种对部分腔体光纤施加应力的新方法,很大程度地拓宽了激光调谐范围,调谐宽度由 24 nm 增加到 57 nm。采用应力调谐措施后,激光斜率效率有所下降,所以下一步的工作重点是深入研究应力双折射效应对光纤激光器输出特性的影响,通过更多对比性实验并结合理论分析,探索在兼顾斜率效率的情况下获得宽可调谐性。

参 考 文 献

- 1 C. R. O'Coilain, R. J. Mears. Broadband tunable single frequency diode-pumped erbium doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2):124~126
- 2 C. Y. Chen, M. M. Choy, M. J. Andrejco. A widely tunable erbium-doped fiber laser pumped at 532 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(1):18~20
- 3 D. A. Smith, M. W. Maeda, J. Johnson. Acoustically tuned erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6):387~389
- 4 M. W. Maeda, J. S. Patel, D. A. Smith. An electronically tunable fiber laser with a liquid-crystal etalon filter as the wavelength-tuning element [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(11):787~789
- 5 D. Liu, N. Q. Ngo, G. Ning. Tunable microwave photonic notch filter using a dual-wavelength fiber laser with phase modulation [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(1):240~248
- 6 Xiu Jiang, Xin Li, Sui Zhan *et al.*. Widely tunable Yb³⁺-doped laser with all fiber structure [J]. *Optik.*, 2007, **118**(12):575~578
- 7 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Meng Hongyun *et al.*. Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser operating in

- L-band [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):677~679
 杨石泉,赵春柳,蒙红云等. 工作在L波段的可调谐环形腔掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):677~679
- 8 He Hucheng, Yang Lingzhen, Wang Yuncai. C-band wavelength tunable erbium doped fiber laser with polarization control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1597~1600
 贺虎成,杨玲珍,王云才. 偏振控制C波段波长可调谐掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1597~1600
- 9 C. Barnard, P. Myslinski, J. Chrostowski *et al.*. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8):1817~1830
- 10 Herman A. Haus. Mode-locking of lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6):1173~1185
- 11 Nir Friedman, Avishay Eyal. The use of the principal states of polarization to describe tunability in a fiber laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(5):642~648
- 12 Zhao Deshuang, Liu Yongzhi, Wang Bingzhong *et al.*. Theoretical analysis of polarization-based tunable fiber filter [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(9):690~692
 赵德双,刘永智,王秉中等. 偏振态调谐光纤滤波器的主偏振态分析[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9):690~692
- 13 Xiao Lei, Guo Yubin, Zhang Jiansheng *et al.*. Tunable L-band ring erbium-doped fiber laser [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6):445~448
 肖磊,郭玉彬,张健生等. L-波段可调谐环形掺铒光纤激光器[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(6):445~448
- 14 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 4~5
 廖延彪. *光纤光学* [M]. 北京:清华大学出版社, 2001. 4~5

· 广 告 ·



全球专业的激光晶体和非线性光学晶体制造商



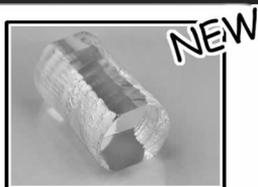
CIOE2010
第十二届
中国国际光电博览会

2010年9月6-9日 深圳会展中心

欢迎光临我们的展位: 1号馆411号

磁光晶体系列

铽镱石榴石 (TGG)



BBO Q-开关

BBO 普克尔盒的应用

- 1、高重复频率DPSS中Q-开关的理想选择
- 2、用于高重复频率再生放大系统的控制
- 3、腔倒空系统
- 4、削波



Q开关驱动源



超长 Nd:YVO₄ 晶体



光学产品

产品系列

1. 非线性光学晶体
2. 激光晶体
3. 绿光、蓝光晶体组件
4. 声光和电光晶体
5. 双折射晶体
6. 闪烁晶体
7. 激光光学产品
8. 通讯光学产品
9. 红外光学产品
10. Q-开关、温控炉等