

文章编号: 0253-2239(2007)11-2003-5

# 单偏振控制器环形腔光纤激光器实验研究\*

申民常<sup>1</sup> 徐文成<sup>1</sup> 陈伟成<sup>1</sup> 宋方<sup>1</sup> 冯杰<sup>2</sup> 刘颂豪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华南师范大学信息光电子科技学院光子信息技术广东省高校重点实验室, 广州 510006)  
(<sup>2</sup> 华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

**摘要:** 理论分析了非线性偏振旋转环形腔作为类饱和可吸收体获得脉冲的物理机理。在光纤环形腔结构中, 采用单个偏振控制器实现了非线性偏振旋转锁模, 直接获得了脉冲宽度为 131 fs 的超短脉冲输出。实验中, 采用性能稳定的 976 nm 半导体二极管激光器作为抽运源, 使用高掺杂浓度的 Er<sup>3+</sup> 光纤为增益介质, 通过调节偏振控制器, 获得了光谱谱宽(3 dB 带宽处)为 23.5 nm 的稳定锁模脉冲输出。脉冲中心波长为 1535.9 nm, 平均功率为 5.91 mW, 脉冲重复率为 11.20 MHz。

**关键词:** 光纤激光器; 锁模脉冲; 光纤环形腔; 非线性偏振旋转; 脉冲整形

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Experimental Study of Fiber Ring Laser with Single Polarization Controller

Shen Minchang<sup>1</sup> Xu Wencheng<sup>1</sup> Chen Weicheng<sup>1</sup> Song Fang<sup>1</sup> Feng Jie<sup>2</sup> Liu Songhao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information & Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006)  
(<sup>2</sup> School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006)

**Abstract:** Physical mechanism of using nonlinear polarization rotation as saturable absorber to obtain pulse is analyzed theoretically. Experimental study of improved femtosecond fiber ring laser is reported. A fiber ring laser with highly Er<sup>3+</sup>-doped fiber as gain medium is demonstrated, 976 nm laser diode (LD) laser is used as pump source, and in the fiber ring cavity, nonlinear polarization rotation mode-locking is realized by adopting single polarization controller. By tuning polarization controller, stable mode-locked pulses centered at 1535.9 nm with 23.5 nm bandwidth at 3 dB, 131 fs duration and an average output power as high as 5.91 mW are successfully obtained at the repetition rate of 11.20 MHz.

**Key words:** fiber laser; mode-locked pulse; fiber ring cavity; nonlinear polarization rotation; pulse shaping

## 1 引言

超短脉冲光源在超快光学、光纤传感、光信息处理、医疗以及光通信等领域具有重要的应用价值。掺稀土光纤为增益介质的锁模光纤激光器相比于常规激光系统, 在结构紧凑性、散热、光束质量、体积以及与现有系统的兼容性等方面具有显著的优势, 是激光器小型化、集成化的一个重要方向。近年来, 人们对光纤激光器进行了广泛的研究, 已经在掺

Nd<sup>3+</sup>、Pr<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup> 等光纤中获得了飞秒脉冲输出。实现光纤激光器的锁模机理主要有主动锁模、被动锁模以及混合锁模<sup>[1~10]</sup>。主动锁模是在激光腔内加入主动调制器, 由于调制器改变了激光腔的全光纤结构, 加上调制器调制功能(调制带宽)有限, 因此限制了超短脉冲的进一步窄化。被动锁模是利用光纤和腔内元器件的非线性效应实现脉冲锁模的。其中, 被动非线性偏振旋转锁模激光

\* 广东省自然科学基金(04010397)资助课题。

作者简介: 申民常(1981-), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要从事非线性光纤光学、光纤放大器与激光器等方面的研究。  
E-mail: smcabc.com@163.com

导师简介: 徐文成(1965-), 男, 安徽人, 博士生导师, 主要从事非线性光纤光学、光纤放大器与激光器等方面的研究。  
E-mail: gt@scnu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-26; 收到修改稿日期: 2007-05-28

器<sup>[7~10]</sup>由于其结构简单,起振阈值低,易于实现自启动被动锁模,产生宽度极窄的飞秒量级脉冲,因此常被用来产生锁模脉冲。1992年,V. J. Matsas等<sup>[4]</sup>在环形腔内利用非线性偏振旋转技术获得了1.5 ps的超短脉冲,同年,K. Tamura等<sup>[5]</sup>报道了直接从光纤激光器中获得了重复率为42 MHz、脉冲宽度为452 fs的超短脉冲输出。1993年,K. Tamura等<sup>[6]</sup>在环形腔内通过改变光纤色散组合(色散管理)获得了脉宽77 fs、重复速率45 MHz的稳定锁模脉冲输出;2005年Axel Ruehl等<sup>[7]</sup>报道了利用拉曼集总放大技术在掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤环形腔中获得了脉宽为64 fs、重复率为108 MHz的自相似脉冲输出。90年代以来,国内也在光纤激光器方面取得了不少的进展。1999年,刘东峰、陈国夫等<sup>[8]</sup>报道了自起振阈值为15 mW、脉宽269 fs、重复率为21.37 MHz的稳定锁模脉冲;王肇颖等<sup>[9]</sup>利用非线性偏振旋转锁模技术在掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤激光器获得了脉冲宽度为1.5 ps的自启动锁模脉冲输出;2005电子科技大学的研究小组<sup>[10]</sup>报道了采用由掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤构成的集总放大器作为增益介质,获得了谱线宽度为18 nm、脉冲宽度约200 fs的锁模脉冲。

到目前为止,国内外报道的利用非线性偏振旋转锁模技术实现飞秒量级超短脉冲输出中<sup>[4~10]</sup>,其光纤环形腔结构都采用两个偏振控制器。本实验中,在光纤环形腔中只采用单个偏振控制器,同样实现了非线性偏振旋转锁模,直接获得了脉冲宽度为131 fs的稳定锁模脉冲输出。

## 2 实验装置及原理

自起振被动锁模掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤环形腔实验装置如图1所示,激光腔内主要由掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤,常规1550单模光纤,偏振灵敏光纤隔离器(ISO),起偏器(Polarizer),偏振控制器(PC),980 nm/1550 nm波分复用器(WDM),输出耦合器(Coupler)等组成。抽运源采用高稳定性带尾纤的半导体二极管激光器(LD),其中心波长为976 nm,最大输出功率是400 mW。二极管激光器抽运光通过980 nm/1550 nm波分复用器耦合进入环形腔。增益介质掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤长度为2.5 m,数值孔径为0.22,截止波长小于950 nm,对980 nm的模场半径和吸收系数分别为 $3.9 \mu\text{m}$ 和12.5 dB/m。偏振控制器是利用光纤弹光效应改变光纤中的双折射,以控制光纤中光波的偏振态。其作用可以等效为 $1/4$ 波片与 $1/2$ 波片组合,其中 $1/4$ 波片可以起到补偿光纤中模式双折射

的作用, $1/2$ 波片用来控制光纤中光波的偏振方位角。偏振灵敏隔离器是特别定制的起偏器和隔离器组合。起偏器用以对不同强度的光强滤波,隔离器可以保证环形腔内的光单向运转,消除了腔内后向散射光波。后向散射易造成谐振腔内模式谱的不均匀而阻止自起振,因此隔离器可以使激光器实现自起振。输出耦合器的耦合比为90:10,其中10%为输出端口。整个激光器全部采用全光纤器件,腔的总长度约为18.5 m。实验中同时采用Anritsu MS9710C光谱分析仪、Tektronix示波器、FR-103XL自相关仪对输出脉冲特性进行同步测量。

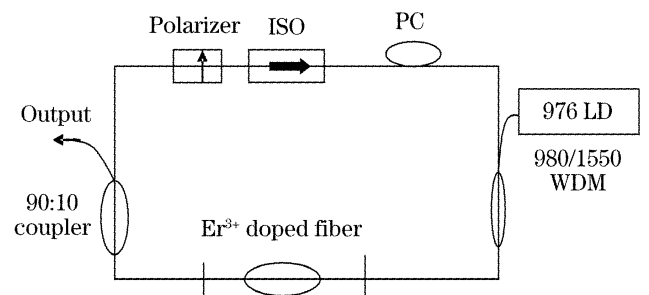


图1 环形腔锁模激光器实验原理图

Fig. 1 Experimental setup of mode-locking ring fiber laser

光纤环形腔内的非线性效应(自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM))所引起的非线性双折射和光纤内模式双折射(线性双折射)对激光锁模具有重要的作用。为了解释光纤双折射对激光锁模的贡献,可以把环形腔的锁模原理简化为图2的模型。此模型包括了低双折射光纤、偏振控制器件、滤波器件(起偏器)等,简化后的模型可以用脉冲整形效应<sup>[11~13]</sup>来解释脉冲锁模机理。

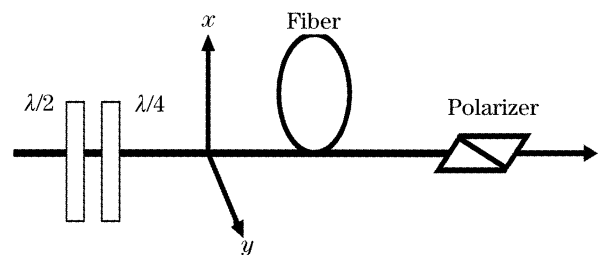


图2 简化的环形腔模型

Fig. 2 Simplified ring cavity model

经过偏振灵敏隔离器的线偏光经过偏振控制器后变为椭圆偏振光,椭圆偏振光可分解为两个正反方向旋转的圆偏振光,这两个圆偏振光在腔内传输,由于受到非线性双折射、模式双折射以及增益介质对不同光波的放大倍数不同,它们的合成矢量沿光纤不断旋转,当它们达到起偏器时,不同偏振态光波的透过率不同。经过偏振控制器的偏振光(功率为 $P_0$ )可以看成相互垂直的具有不同强度的偏振光

(沿光纤主轴  $x, y$ ), 其振幅分别为  $A_x = \sqrt{P_0} \cos \theta$ ,  $A_y = \sqrt{P_0} \sin \theta$  ( $\theta$  为偏振光和  $x$  轴的夹角)。具有不同强度的偏振光在光纤中传输时, 由于受到自相位调制、交叉相位调制、模式双折射的共同作用, 它们到达起偏器时会产生一定的相位差, 总的相位差可以近似表示为

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{NL} + \Delta\phi_L, \quad (1)$$

$$\Delta\phi_{NL} = \frac{2\pi L}{\lambda}(\Delta n_x - \Delta n_y) = \frac{\gamma P_0 L}{3} \cos(2\theta), \quad (2)$$

$$\Delta\phi_L = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_x - n_y), \quad (3)$$

其中  $\lambda$  为光波在真空中的波长,  $L$  为环形腔长度,  $n_x, n_y$  为腔内沿  $x$  轴、 $y$  轴的平均折射率,  $\gamma$  为非线性系数,  $\Delta n_x, \Delta n_y$  为由于非线性效应引起的相对折射率变化。这样, 透过起偏器(为了达到最好的脉冲整形效果假设起偏器方向和经过偏振控制器后光波的偏振方向正交)后的总光强<sup>[13]</sup>

$$P_t = P_0 \sin^2[(\phi_{NL} + \phi_L)/2] \sin^2(2\theta), \quad (4)$$

将(2)式和(3)式代入(4)式, 可以得到

$$P_t = P_0 \sin^2[\gamma P_0 L/6] \cos(2\theta) + 2\pi L(n_x - n_y)/\lambda \sin^2(2\theta), \quad (5)$$

从(5)式可以看出, 通过起偏器的光波不仅与光波强度有关, 而且与偏转角  $\theta$  关。由于光脉冲的中心和两翼光强不同, 因此它们到达起偏器时, 中心和两翼具有不同的透射率。调节偏振控制器(调节偏振角  $\theta$ ), 迫使脉冲的波峰经历大的透射率, 而前后沿经历小的透射率, 这种过程在环形环中来回运转, 从而使脉冲的前后沿光强越来越弱, 峰值光强越来越强, 最后形成稳定的短脉冲序列(锁模机理与可饱和吸收体作用类似)。这就是利用光纤的非线性偏振旋转效应产生短脉冲的锁模机理。因此, 在光纤环形腔中只采用单个偏振控制器就可以实现脉冲锁模, 产生超短脉冲输出。

### 3 实验结果和讨论

实验中, 当输入到环形腔内的抽运光功率达到激光器的锁模阈值时(约 18 mW), 调节偏振控制器就可以获得稳定的脉冲输出。激光器工作完全是自启动的, 不需要外界触发。图 3 是由 Tektronix 示波器中拍摄到的锁模脉冲序列图像, 其重复率为 11.20 MHz, 平均功率为 5.91 mW, 可以推断出单个脉冲的能量为 0.53 nJ。从输出脉冲波形图可以看出, 脉冲间隔相等, 幅度基本相同, 输出波形十分稳定。由于 P-N 结二极管响应速度的限制, 造成单

脉冲后沿拖着尾巴, 出现了基座。图 4 是由 Anritsu MS9710C 光谱分析仪测得的对应脉冲的光谱图, 脉冲的中心波长为 1535.97 nm, 3 dB 处带宽为 23.51 nm。从图中可以看到光谱具有非常平滑的轮廓, 而且没有观测到光谱边带效应<sup>[14]</sup>。光谱边带效应是由于光脉冲在环形腔内循环过程中, 受到铒光纤的增益放大、腔内元器件损耗和耦合输出损耗等因素的影响, 其峰值功率出现周期性的变化所产生的。光脉冲在循环过程中为了保持稳定的脉冲输出, 将自身的部分能量转化成色散波的形式辐射出去, 这些色散波在一定的条件下(位相匹配)会形成相干干涉, 在光谱上表现为频谱边带。实验中, 为了抑制光谱边带效应, 获得高抑制比的光谱, 一方面调节抽运光功率以使  $\text{Er}^{3+}$  光纤增益均匀, 另一方面将增益后的脉冲立即被耦合器耦合出腔外, 这样可以保证脉冲峰值功率不会在空间上形成较大幅度的周期性变化。实验中, 当抽运功率为 80 mW 时, 调节偏振控制器, 以使激光器的光谱谱宽最宽(23.5 nm), 此时没有观测到频谱边带现象(图 4)。说明了此条件下腔内光脉冲增益与损耗达到了适当的平衡。

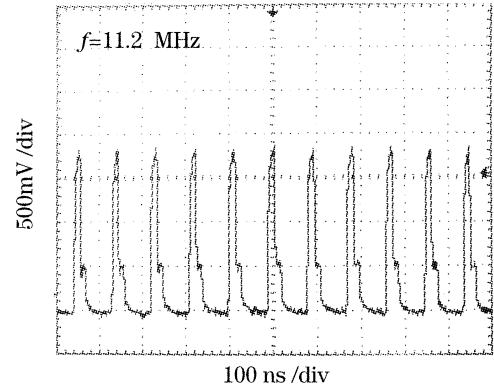


图 3 锁模脉冲序列

Fig. 3 Mode-locked pulse train

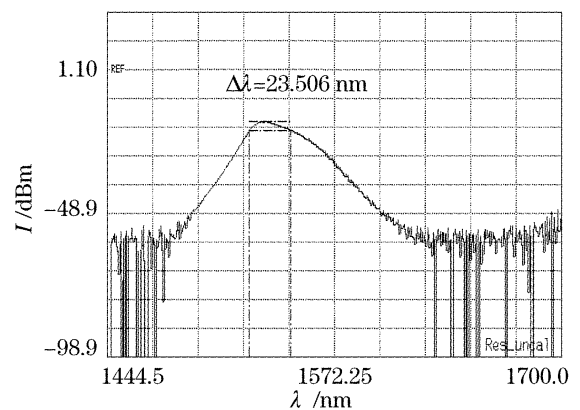


图 4 锁模脉冲对应的光谱图

Fig. 4 Spectrum corresponding to mode-locked pulse train  
为了测量输出脉冲的宽度, 将输出激光耦合到

FR-103XL 自相关仪中。图 5 是利用扫描二次谐波自相关仪测量锁模光脉冲的二次谐波自相关曲线。图中中间的曲线是根据自相关仪采集的数据绘制的图形, 右上角是从自相关仪上拍摄到的实际测量的曲线, 测得曲线的半峰全宽宽度  $T_{FWHM} = 131$  fs, 其时间宽度乘积为 0.389, 这个结果与双曲正割曲线的时间带宽积 0.315 比较接近, 因此可以认为激光器输出的是具有一定啁啾的孤子脉冲。

实验发现, 光纤中的双折射对锁模激光器的脉冲特性具有重要的影响。当抽运功率达到锁模阈值时, 保持抽运功率不变, 调节偏振控制器, 激光器光谱中心波长发生改变, 而且光谱谱宽也随着变化。图 6 是调节偏振控制器的旋钮, 在不同位置下得到的光谱

图。光谱带宽从 11.75 nm 变化到 20.44 nm, 中心波长从 1.53  $\mu\text{m}$  到 1.60  $\mu\text{m}$  范围内可调。

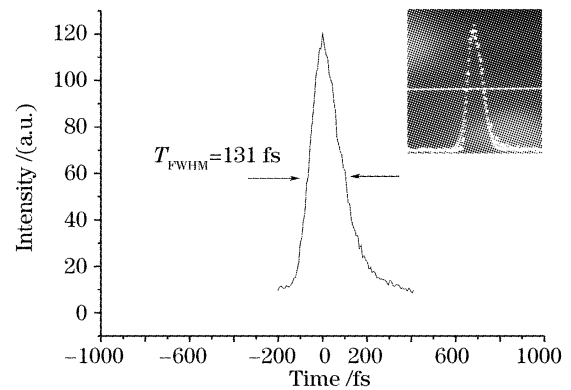


图 5 输出脉冲的自相关曲线

Fig. 5 Autocorrelation trace of pulse

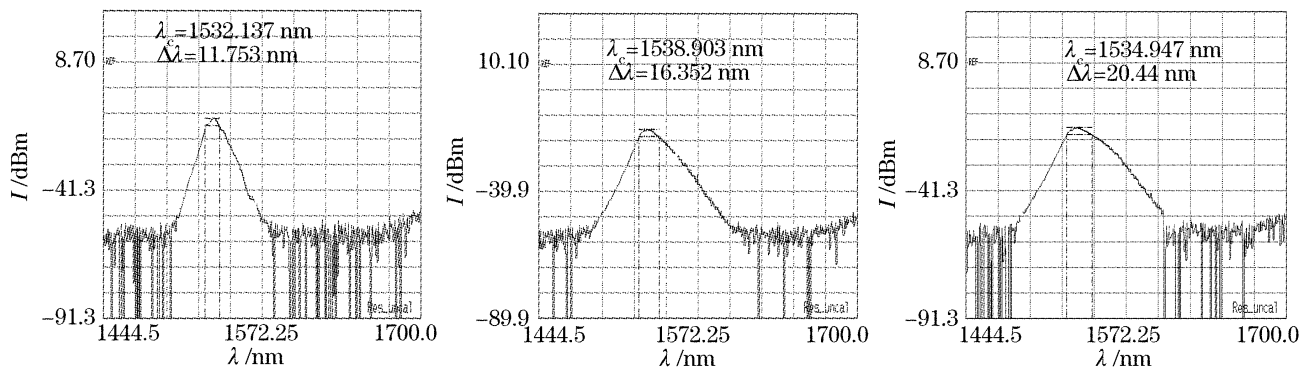


图 6 调节偏振控制器得到的不同输出特性的脉冲光谱

Fig. 6 Different spectrum output by tuning polarization controller

## 4 结 论

从理论上分析了光纤环形腔中采用单一偏振控制器实现脉冲锁模的原理。实验中, 通过调节单一偏振控制器获得了稳定的脉冲输出。脉冲的中心波长为 1535.97 nm 时, 3 dB 处光谱宽度为 23.51 nm, 脉冲的平均功率为 5.9 mW, 脉冲宽度为 131 fs, 重复率为 11.20 MHz。该环形腔与双偏振控制器环形腔相比, 腔内减少了一个偏振控制器, 减少了腔内损耗, 降低了激光器的起振阈值, 提高了激光器的斜率效率, 并且在实验中没有发现两种结构在激光锁模稳定性方面存在明显的差别, 两种结构的光纤激光器都能够长时间稳定工作。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Chunliu, Ma Ning, Dong Xinyong *et al.*. Wavelength tunable mode-locked fiber ring laser utilized by the dispersion of CFBG[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 822~824 (in Chinese)
- 赵春柳, 马 宁, 董新永等. 利用啁啾光纤光栅色散特性实现波长可调谐的主动锁模掺铒光纤环形腔激光器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 822~824

- 2 Zhaoying Wang, Zhenhong Yu, Chunfeng Ge *et al.*. Figure-eight actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3): 128~130
- 3 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and mode locking Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1021~1024 (in Chinese)
- 甘 雨, 向望华, 周晓芳等. 被动调 Q 锁模掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1021~1024
- 4 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Selfstarting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
- 5 K. Tamura, H. A. Haus, E. P. Ippen. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24): 2226~2228
- 6 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1080~1082
- 7 Axel Ruehl, Holger Hundertmark, Dieter Wandt *et al.*. 0.7 W all-fiber erbium oscillator generating 64 fs wave breaking-free pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6305~6309
- 8 Liu Dongfeng, Cheng Guofu, Wang Xianhua *et al.*. Experimental study of self-started passive mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring soliton laser [J]. *Science in China (Series A)*, 1999, **29**(7): 656~661 (in Chinese)
- 刘东峰, 陈国夫, 王贤华. 自起振被动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤环形腔孤子激光器的实验研究 [J]. *中国科学(A 辑)*, 1999, **29**(7): 656~661

9 Wang Zhaoying, Wang Yongqiang, Lin Ran *et al.*. Self-starting passively mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber lasers [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(3): 295~298 (in Chinese)  
王肇颖,王永强,林冉等. 亚皮秒自起振被动锁模掺铒光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(3): 295~298

10 Zhao Deshuang, Liu Yongzhi, Wang Bingzhong *et al.*. High-energy femtosecond Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8): 922~925 (in Chinese)  
赵德双,刘永智,王秉中等. 高能飞秒脉冲掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(8): 922~925

11 R. H. Stolen, J. Botineau, A. Ashkin. Intensity discrimination

of optical pulses with birefringent fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(10): 512~514

12 R. H. Stolen, J. Botineau, A. Ashkin. Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(10): 512~514

13 M. Horowitz, Y. Barad, Y. Silberberg. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 799~781

14 S. M. J. Kelly. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(8): 806~807



## 中国科学院上海光学精密机械研究所第四届光学设计高级讲习班圆满谢幕

中国科学院上海光学精密机械研究所第四届光学设计高级讲习班于 2007 年 10 月 22~26 日在上海光机所如期举行。来自大族激光、宝钢集团、三洋光部品(惠州)有限公司、苏州一光仪器、成都光电所、西北核技术研究所、上海技术物理研究所、长春光机所、中国兵器工业 205 所、中科大、哈工大、华南师大、厦门大学、南昌大学等单位的 92 名从事应用光学和光机设计的学员参加了培训。

光学设计和光机设计等课程在国际光学界是非常重要的且非常实用的课程,在一些重要的国际学术会议如 SPIE 会议上,都经常举办此类讲习班,对光学企业面临的实际问题具有明显的针对性和一定的普适性,因此,此类讲习班一直深受各类企业和科研院所的欢迎。

在国内,上海光机所拥有一批以王之江院士领衔的高水准的光学工程专家队伍,在教学内容、设计实践等方面具有相当的权威性,对光学工程的发展和应用前景也有一定的前瞻性。自 2004 年以来,在王之江院士的倡导下,该所已连续举办四届光学设计高级讲习班,深受各界学员的欢迎。



讲习班师生合影

本届讲习班内容分为光学系统设计、光机系统设计、光学加工与检测技术、光学薄膜四个方向,分别由上海光机所的王之江院士及朱健强研究员、徐文东研究员、范正修研究员主讲。在教学内容上,本次讲习班除了讲授基础理论外,更注重设计实例的分析,研究的经验的分享,授课方式上则更注重学员与老师的互动。学员纷纷反映:经过此次培训,对我国目前的光学、光机设计有了整体了解和把握,受益匪浅。很多学员表示,此次讲习班不仅解决了工作、研究中遇到的众多难题,更多的是在几位专家身上学到了解决问题的方法。

讲习班也受到了相关光学设计软件公司的关注。如研发 CODE-V 光学设计软件的美商 Optical Eesearch Associates 公司总裁兼首席执行官 Robert S. Hilbert 介绍公司概况以及软件使用情况,ASAP 的软件代理商上海康世通信技术有限公司也邀请原厂工程师 Howard Huang L. 讲解了软件使用知识。

Robert S. Hilbert 和王涌天教授介绍 Code-V 软件

本次培训班由上海光机所人教处和光学期刊联合编辑部联合承办,根据学员的强烈要求,2008 年的光学设计高级讲习班仍将在 10 月份举办。在明年的讲习班课程中,主办方将安排 1~2 天的上机课程,而与软件公司联合举办的“第一届光学设计大赛”及“第一届光学设计论坛”将同期举行,欢迎广大光学设计工作者踊跃参与。

高福海

