

# 光纤环光谱传递函数\*

杨亚培 刘永智

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

**摘 要** 根据部分相干光理论, 得到了光纤环光谱传递函数。并分析了光纤环光学长度、耦合输出系数、损耗对光纤环光谱传递函数的作用。

**关键词** 光纤环, 光谱, 传递函数。

## 1 引 言

在光纤激光器、滤波器、光纤谐振腔、光放大等方面, 光纤环有重要的应用价值<sup>[1~5]</sup>。Stokes 等人<sup>[6]</sup>对光纤环自由光谱范围、延迟时间作了分析; Ioannidias<sup>[7]</sup>对光学环的动态响应、相位调制器产生的相位偏移进行了研究; Urguhart<sup>[8]</sup>对横向耦合光纤环谐振腔的输出光强、精细常数、峰值透过率进行了分析; Zhang<sup>[9, 10]</sup>用等效模型和变换矩阵方法, 分析了复合光纤环谐振腔的输出光强度。本文应用部分相干光理论, 导出了光纤环的光谱传递函数STF( $\nu$ )。并就光纤环光学长度、耦合输出系数以及损耗对 STF( $\nu$ )的作用进行了分析讨论。与上述已发表的对光纤环性能分析文章相比较, STF( $\nu$ )函数直接描述了光纤环对输入光场光谱的作用, 即描述了光纤环的相干性。

## 2 光谱传递函数

光纤环如图 1 所示, 设光纤环的入射光场为  $E_i \exp(-i2\pi\nu t)$ , 光纤环的光场耦合系数为  $p$ , 光场单程损耗因子为  $\alpha$ , 则环形  $n$  圈的输出光场  $E_n$  为

$$E_n = \exp(-\alpha n)p(1-p)^n E_i \exp[-j2\pi\nu(t - \frac{nl}{c})], \quad (1)$$

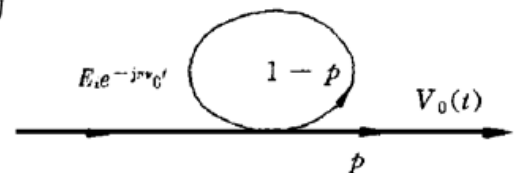


Fig. 1 Schematic of optic fiber ring

式中,  $E_i$  为入射光场振幅,  $l$  为光纤环光学长度;  $c$  为真空中的光速。光纤环的输出光场为

$$V_o(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-\alpha n)p(1-p)^n E_i \exp[-j2\pi\nu(t - \frac{nl}{c})] \quad (2)$$

根据光场自相关函数的定义<sup>[11]</sup>, 光纤环输出光场的自相关函数

\* 电子科技大学宽带传输与通信系统技术国家重点实验室开放基金资助。

收稿日期: 1998-06-22; 收到修改稿日期: 1998-10-13

$$\Gamma_o(t) = \langle V_o(t + \tau) V_o^*(t) \rangle = \sum_{n, m=0}^{\infty} p^2 (1-p)^{n+m} \exp[-\alpha(n+m)] \{E_i \exp[-j2\pi\nu_0(t - \frac{nl}{c} + \tau)]\} \times \{E_i^* \exp[j2\pi\nu_0(t - \frac{ml}{c})]\}, \quad (3)$$

式中,  $\langle \rangle$  表示时间平均:  $\langle V_o(t + \tau) V_o^*(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T V_o(t + \tau) V_o^*(t) dt$ 。利用此积分式的平移性<sup>[12]</sup>, 可得

$$\{E_i \exp[-j2\pi\nu_0(t - \frac{nl}{c} + \tau)]\} \{E_i^* \exp[j2\pi\nu_0(t - \frac{ml}{c})]\} = \Gamma_i(\tau - \frac{(n-m)l}{c}), \quad (4)$$

式中,  $\Gamma_i(\tau)$  为入射光场自相干函数。根据部分相干光理论<sup>[11]</sup>, 光场的光谱密度函数与其自相关函数互为傅里叶变换, 所以, 光纤环输出光场的光谱密度函数  $G_o(\nu)$  为

$$G_o(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_o(\tau) \exp(j2\pi\nu\tau) d\tau = p^2 \sum_{n, m=0}^{\infty} (1-p)^{n+m} \exp[-\alpha(n+m)] \exp[j2\pi\nu \frac{(n-m)l}{c}] \times \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_i(\tau) \exp(j2\pi\nu\tau) d\tau \quad (5)$$

考虑到入射光场自相关函数  $\Gamma_i(\tau)$  与其光谱密度函数  $G_i(\nu)$  同样也互为傅里叶变换, 得

$$G_o(\nu) = \{p^2 \sum_{n, m=0}^{\infty} (1-p)^{n+m} \exp[-\alpha(n+m)] \exp[j2\pi\nu \frac{(n-m)l}{c}]\} G_i(\nu) \quad (6)$$

由于  $n, m$  取值的性质相同, 所以, 对于  $n = m$  的项相加的结果, 使  $\exp[j2\pi\nu \frac{(m-n)l}{c}]$  项为 2; 对于  $n \neq m$  的项, 在  $(n+m)$  为某一值时,  $(n-m)$  与  $(m-n)$  相等的项(如  $n = 3, m = 2$  的项与  $n = 2, m = 3$  的项)相加的结果, 使得  $\exp[j2\pi\nu \frac{(m-n)l}{c}]$  变为  $2 \cos [2\pi\nu \frac{(m-n)l}{c}]$ 。所以, (6) 式可以写成:

$$G_o(\nu) = \{ \sum_{n=0}^{\infty} p^2 (1-p)^{2n} \exp(-2\alpha n) + 2 \sum_{j=1}^{\infty} [ \sum_{n=0}^{\infty} p^2 (1-p)^{2n+j} \times \exp[-\alpha(2n+j)] \cos(2\pi j l/c) ] \} G_i(\nu) \quad (7)$$

其中, 第一项为(6)式中  $n = m$  的项之和, 第二项为(6)式中  $n \neq m$  即  $|n-m| > 1$  的项之和, 并设  $j = |n-m|$ 。再设:

$$G_o(\nu) = \text{STF}(\nu) G_i(\nu) \quad (8)$$

$$\text{STF}(\nu) = \sum_{n=0}^{\infty} p^2 (1-p)^{2n} \exp(-2\alpha n) + 2 \sum_{j=1}^{\infty} \{ \sum_{n=0}^{\infty} p^2 (1-p)^{2n+j} \times \exp[-\alpha(2n+j)] \cos(2\pi j l/c) \} \quad (9)$$

STF( $\nu$ ) 即为光纤环光谱传递函数, 它决定光纤环的相干性质, 描述了光纤环对于入射光场光谱的作用。

由于  $p, (1-p), \exp(-\alpha)$  取值范围均为  $[0, 1]$ , 根据级数公式<sup>[13]</sup>

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n = \frac{1}{1-x}, \quad |x| < 1 \tag{10}$$

(9)式光谱传递函数可以进一步化简为

$$\text{STF}(\nu) = \frac{p^2}{1 - \exp(-2\alpha)(1-p)^2} \left[ 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (1-p)^j \exp(-2\alpha j) \cos \frac{2\pi j l}{c} \right] \tag{11}$$

### 3 光谱传递函数 STF (ν) 分析

#### 3.1 无损耗的情形

图 2 是无损耗时的光谱传递函数曲线。从图 2 可看出,  $l$  相等的曲线的透过峰间隔相等。这一点也可从分析 STF (ν) 的极值看到: 光纤环的光学长度  $l$  一定时, 当频率  $\nu = \nu_0$  满足

$$\omega l / c = k, \quad (k \text{ 为整数}) \tag{12}$$

时,  $j$  无论取何值,  $\cos(2\pi j l / c) = 1$ , 此时, STF (ν) 取最大值  $\text{STF}_{\max}$ 。而且利用(10)式, 容易证明  $\alpha = 0$  时,  $\text{STF}_{\max} = 1$ 。可见,  $\nu_0$  为光谱传递函数透过峰值处频率。由(12)式可得透过峰值频率间隔为

$$\Delta\nu = c/l \tag{13}$$

此  $\Delta\nu$  就是光纤环的自由光谱范围, 它与光纤环长度成反比。从图 2 还可以看出, 无损耗时, STF (ν) 曲线的最小值随着  $p$  的增加而增加;  $p$  越小, STF (ν) 曲线的透过峰的锐度(尖锐程度) 就越好。设透过峰半峰值全宽度为  $\Delta\nu_{1/2}$ , 其定义为

$$\frac{1}{2} [\text{STF}(\nu)_{\max} - \text{STF}(\nu)_{\min}] = \frac{p^2}{1 - \exp(-2\alpha)(1-p)^2} \times \left\{ 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (1-p)^j \exp(-2\alpha j) \cos \left( 2\pi \frac{\Delta\nu_{1/2}}{2} \frac{j l}{c} \right) \right\}. \tag{14}$$

图 3 是  $\alpha = 0$  时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随着光纤环光学长度  $l$  变化的曲线。从图 3 看到, 在  $p$  一定时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随着  $l$  增加而减小, 而且  $l < 20$  m 时, 这种减小的趋势明显。

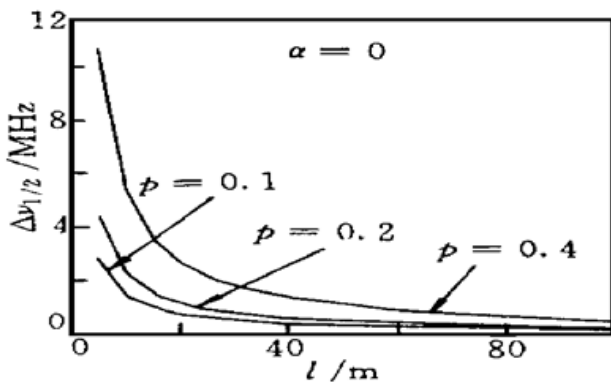


Fig.3 Bandwidth of the spectrum-transmission function as a function of the optical lengths with different output couple coefficients, and without loss of optic fiber ring

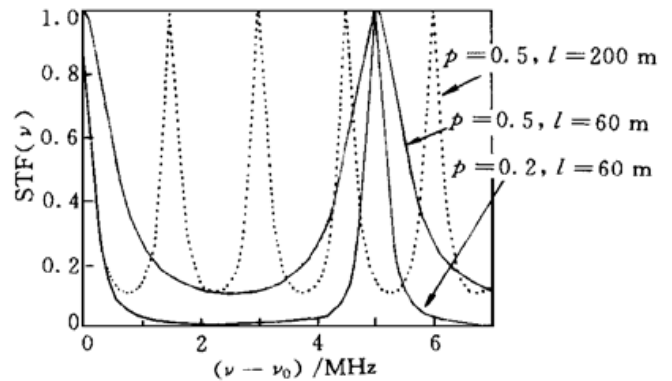


Fig.2 Curves of the spectrum-transmission function with different optical lengths, different output couple coefficients, and without loss of optical fiber ring

图 4 是  $\alpha = 0$  时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随着光纤环耦合输出系数  $p$  的变化曲线。从图 4 看到,  $l$  一定时,  $\Delta\nu_{1/2}$  随着  $p$  的增加而增加。

图 5 是  $\alpha = 0$  时,  $p$  取较大的值时的 STF (ν) 曲线。可见, 当  $p$  取值在 0.83 附近时, 曲线的最小值约为 0.5, 透过峰的锐度大大下降, 光谱传递函数作用, 即光纤环的相干性下降。若  $p$  进一步增加, STF (ν) 趋于等于 1 的直线, 此时的光纤环对入射场光谱已没什么作用, 入射光场的光谱成份几乎可以无选择地透过, 光纤环也没什么

相干性可言。

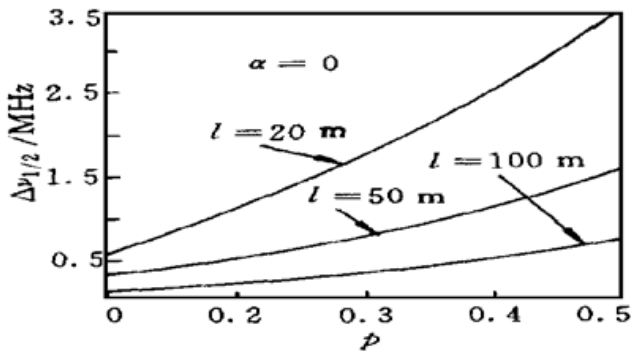


Fig.4 Bandwidth of the spectrum-transmission function as a function of the output couple coefficients with different the optic lengths, and without loss of optic fiber ring

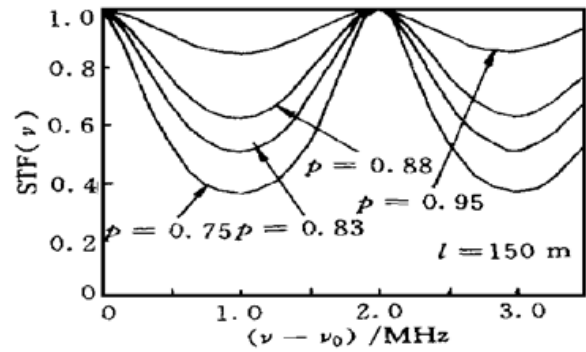


Fig.5 Curves of the spectrum-transmission function with different big output couple coefficients, and without loss of optic fiber ring

### 3.2 有损耗的情形

图 6 是存在损耗时的 STF (ν) 曲线, 可以看出, 图中 α= 0.1 的峰值已比无损耗 α= 0 时峰值 1 显著降低。同时峰值宽度随着损耗的增加而变大, 光纤环的相干性明显变坏。

图 7、图 8 所示的是存在损耗时, Δν½ 随着光纤环光学长度 l、光纤环耦合输出系数 p 的变化曲线。从图 7、图 8 两组曲线可以看到, Δν½ 随着损耗的增加而变大。从图 7 看到, p 一定、l 较小(< 20 m) 时, Δν½ 随着损耗而变大的趋势严重。从图 8 看到, l 一定时, α= 0 的 Δν½ 曲线与 α= 0.05 的 Δν½ 曲线相差不; 但是, 与 α= 0.2 的 Δν½ 曲线与 α= 0.4 的 Δν½ 曲线相差较大。l 取其他值, 得到的不同 α 对应的 Δν½ 随 p 的变化曲线形状相同。从图 8 还可看到, α= 0.4 的 Δν½ 曲线, 在 p 增大时, 向上的趋势出现加快。

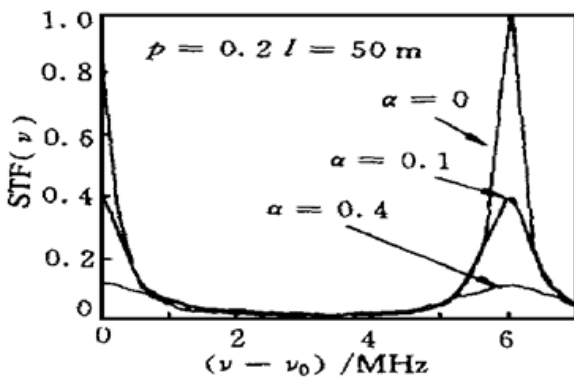


Fig.6 Curves of the spectrum-transmission function with different loss coefficients of optical fiber ring

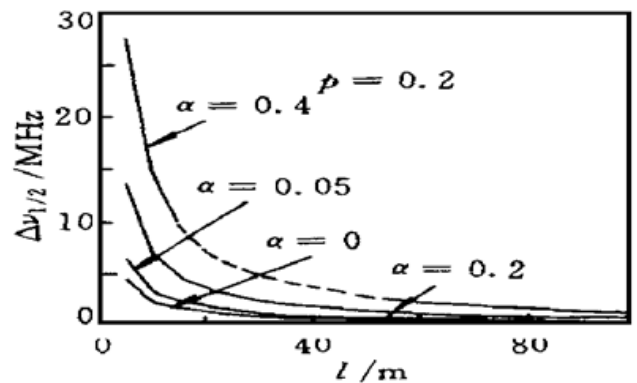


Fig.7 Bandwidth Δν½ of the spectrum-transmission function as a function of the optical length with different loss coefficient α of optical fiber ring

由(11)式计算可知, 光谱传递函数 STF (ν) 的最大值 STF (ν) max、最小值 STF (ν) min 与光纤环光学长度 l 无关, 取决于 α 和 p。图 9 是在 p 取不同值时, STF (ν) max、STF (ν) min 随损耗因子 α 的变化曲线。从图 9 看到, 随着损耗的增加, STF (ν) max 在减小、STFA min 在增加, 最终两者趋于一致。STF (ν) max 的减小是损耗在光谱传递函数中的具体体现; 随着 α 的增加, STF (ν) 曲线趋于高度小于 1 直线, 这就是损耗引起光纤环相干性变坏的具体体现。对于 p 取较小的值, 如 p = 0.1, 损耗对 STF (ν) min 影响不大(p = 0.1 的 STF (ν) min 随 α 变化曲线几乎是一

条高度等于 0 的水平线, 即横轴), 但是,  $STF(\nu)_{\max}$  却随着损耗急剧减小。实际的光纤环损耗不可避免, 因此, 对于一定的损耗系数  $\alpha$ ,  $p$  值不宜过小, 否则  $STF(\nu)_{\max}$  会衰减得很厉害, 造成光谱传递函数透过峰峰值很小, 整个光纤环的插入损耗过大。因此, 在光纤环损耗一定时,  $p$  应根据  $\Delta\nu_{1/2}$  与  $STF(\nu)_{\max}$  综合考虑来选取。

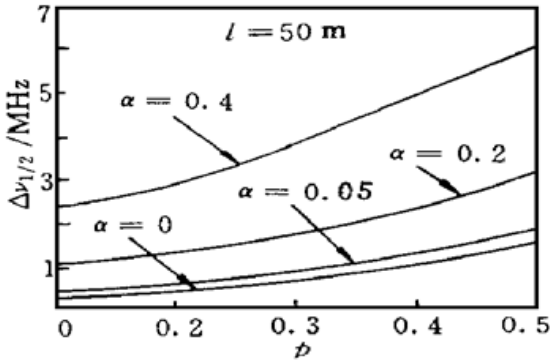


Fig. 8 Bandwidth  $\Delta\nu_{1/2}$  of the spectrum-transmission function as a function of the output couple coefficients with different loss coefficient  $\alpha$  of optical fiber ring

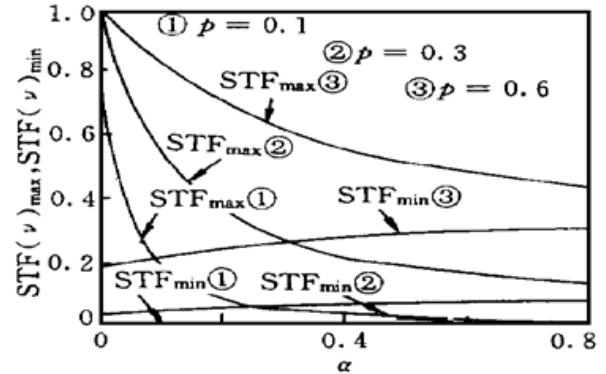


Fig. 9  $STF(\nu)_{\max}$  and  $STF(\nu)_{\min}$  of the spectrum-transmission function as functions of the loss coefficient  $\alpha$  with different output couple coefficients of optical fiber

**结 论** 本文根据部分相干光理论得到了光纤环的光谱传递函数  $STF(\nu)$ , 并就光纤环光学长度  $l$ 、耦合输出系数  $p$  以及损耗对  $STF(\nu)$  的作用进行了分析讨论。在一定的频率范围内尽量减少  $STF(\nu)$  透过峰的数目和减小  $STF(\nu)$  透过峰的宽度  $\Delta\nu_{1/2}$  就是将光谱能量集中在更少的频率成份上, 提高光纤环的相干性。减小  $l$  可以增大  $STF(\nu)$  透过峰间隔  $\Delta\nu$ 。但是, 由分析已知, 减小  $l$  对于减小  $STF(\nu)$  透过峰的谱宽度  $\Delta\nu_{1/2}$  是不利的。因此, 在满足一定的频率范围内透过峰的数目的前提下,  $l$  应尽可能的大, 以提高光纤环时间相干性。无损耗时, 减小  $p$  有利于减小  $\Delta\nu_{1/2}$ 。损耗对于  $STF(\nu)$  透过峰宽度、峰值透过率  $STF(\nu)_{\max}$  影响严重, 而且这些影响与  $l$ 、 $p$  密切相关。尽可能的减小损耗对保证  $STF(\nu)$  函数的品质 [ $\Delta\nu$ 、 $\Delta\nu_{1/2}$ 、 $STF(\nu)_{\max}$ ], 即保证光纤环的相干性是很重要的。

### 参 考 文 献

- [1] Okamura H, Iwatsuki K. A finesse-enhanced Er-doped fiber ring resonator. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11): 1554~ 1556
- [2] Park N, Dawson J W, Vahala K J. All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(19): 2369~ 2371
- [3] Okamura H, Iwatsuki K. Ultrahigh-finesse, bidirectional  $Er^{+}$ -doped fiber ring resonator. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 326~ 327
- [4] Paul T J, Swanson E A. Narrow-linewidth diode laser using a fiber-optic ring resonator. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1241~ 1243
- [5] Chew Y H, Tjhung T T, Mendis F V C. An optical filter of adjustable finesse using an amplified fiber ring resonator. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2): 364~ 370
- [6] Stokes L F, Chodorow M, Shaw H J. All-single-mode fiber resonator. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 288~ 290

- [7] Ioannidis Z K, Radmore P M, Giles I P. Dynamic response of an all-fiber-ring resonator. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5) : 422~ 424
- [8] Urquhart P. Transversely coupled fiber Fabry-Perot resonator: Theory. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3) : 456 ~ 463
- [9] Zhang Jianluo, Lit J W Y. Compound fiber ring resonator: Theory. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11** (6) : 1867~ 1873
- [10] Zhang Jianluo, Lit J W Y. All-fiber compound ring resonator with a ring filter. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(7) : 1256~ 1262
- [11] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press, 1980. 500, 503
- [12] 羊国光, 宋菲君. 高等物理光学, 合肥: 中国科技大学出版社, 1991. 255
- [13] 四川矿业学院数学教研组. 数学手册, 北京: 科学出版社, 1978. 231

## Spectrum-Transmission Function of Optic-Fiber Ring

Yang Yapei      Liu Yongzhi

(Department of Optoelectronic Technology,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

(Received 22 June 1998; revised 13 October 1998)

**Abstract** The spectrum-transmission function (STF) of optic-fiber ring is obtained with the theory of partially coherent light. The effects of the optical length, the output couple coefficient, and the loss on the STF of optic fiber ring are analyzed.

**Key words** optic fiber ring, spectrum, transmission function.

## 第十四届全国激光学术报告会在京郊举行

由中国电子学会量子电子学与光电子分会及中国光学学会激光专业委员会主办、天津大学激光与光电子研究所承办的第十四届全国激光学术报告会于1999年10月10日至13日在北京市郊平谷县举行。会议收到论文180余篇,约170名代表出席了会议,这是本世纪激光界的最后一次盛会。

会议由我国光学界前辈王大珩院士任名誉主席,光学学会副理事长周炳琨院士任主席并主持了开幕式。在开幕式上有十二位激光界的著名学者作特邀报告,内容包括二元光学应用,激光发展史,强激光技术,自适应光学,非线性光学晶体,频率变换技术,激光军用技术,激光产生分析,光生物学等,反映了我国激光界的最新成果。

会议设六个专题进行交流讨论。内容涉及(1) 二极管抽运激光器及固体激光技术;(2) 气体激光技术、光谱及光子离解;(3) 激光谐振腔、模、光束传输、整形、控制及测量;(4) 非线性光学频率变换;(5) 超短脉冲技术;(6) 激光应用。在交流的论文中,激光二极管抽运技术占了相当的数量,代表们对光束质量也颇感兴趣,并进行了专题讨论。

下届全国激光学术报告会将于2001年召开。

(培 夏)