

基于腔内电光调制的染料激光频率噪声压制

刘 芳^{1,3} 王 春^{1,3} 李刘锋^{1,2} 陈李生^{1,2}

¹ 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071

² 中国科学院原子频标重点实验室, 湖北 武汉 430071; ³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用 Pound-Drever-Hall 锁频方法对连续波可调谐染料激光器的频率噪声进行了压制。设计和组装了一种小型腔内电光调制器作为快速频率调整的执行机构。详细讨论了腔内电光调制器的设计参数并给出了两种常用电光晶体的机械谐振的测量结果。以该电光调制器和激光腔镜上的压电陶瓷作为频率反馈控制的执行机构将染料激光锁定在一个法布里-珀罗腔上。当只采用压电陶瓷时激光频率噪声在 100 Hz 附近被降低了 3 个数量级, 进一步加入电光调制控制环路后, 在 100 Hz 到 50 kHz 范围内激光频率噪声能进一步减小 4/5。经过频率噪声的压制后激光光谱线宽从自由运转时的 2.2 MHz 降低到了 10 kHz。

关键词 信号处理; 激光稳频; 电光调制; 染料激光器; 激光光谱

中图分类号 TN248.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0517001

Frequency Noise Suppression of a Dye Laser Based on Intracavity Electro-Optic Modulator

Liu Fang^{1,3} Wang Chun^{1,3} Li Liufeng^{1,2} Chen Lisheng^{1,2}

¹ Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

² Laboratory of Atomic Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The frequency noise of a continuous-wave tunable dye laser is suppressed by using the Pound-Drever-Hall frequency locking method. To cope with relatively large high-frequency components in the dye laser frequency noise, a compact intracavity electro-optic modulator that serves as a fast frequency actuator is designed and assembled. The design parameters of the modulator are discussed in detail and the experimental data on the mechanical resonances of two commonly used electro-optic crystals are given. The dye laser is locked to a Fabry-Perot cavity by using the intracavity electro-optic modulator and piezoelectric transducers installed on the cavity mirrors. With only piezoelectric actuators the laser frequency noise is reduced by three orders of magnitude at 100 Hz and the noise is further suppressed by four-fifths from 100 Hz to 50 kHz with a combination of piezoelectric actuators and the intracavity electro-optic modulator. With the suppression of frequency noise implemented, the 2.2 MHz free-running laser linewidth is reduced to 10 kHz.

Key words signal processing; laser frequency stabilization; electro-optic modulation; dye laser; laser spectroscopy

OCIS codes 250.4110; 140.2050; 140.3425

1 引 言

连续波染料激光器的波长调谐范围宽,且位于可见光波段,在激光光谱测量和光频率标准等方面有很多的应用^[1~3]。以若丹明 6G (R6G)为增益介

质的染料激光器,其波长范围为 550~600 nm,处于碘分子 B←X 吸收光谱波段,可用于探测相应的旋转和超精细光谱^[4~7]。以微纳米材料为载体,将原子或分子填充进载体的纳米孔道内构成的新型样品

收稿日期: 2012-12-26; **收到修改稿日期**: 2013-01-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB821303)和国家自然科学基金(11235004)资助课题。

作者简介: 刘 芳(1985—),女,博士研究生,主要从事激光物理方面的研究。E-mail: liufang@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 陈李生(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光稳频和精密光谱测量等方面的研究。

E-mail: lchen@wipm.ac.cn(通信联系人)

逐渐引起了人们较大兴趣,例如将碘分子填充到沸石($\text{AlPO}_4\text{-11}$)晶体孔道构成的 $\text{I}_2\text{-AEL}$ 样品^[8~10],以及碳纳米管中填充镧原子^[11]等等。采用染料激光探测 $\text{I}_2\text{-AEL}$ 样品中碘分子的超精细光谱,可以研究纳米孔道中碘分子的能级变化。

虽然可调谐连续波染料激光能够覆盖较宽的光谱范围,但该类激光有较高的频率噪声,这限制了其在精密激光光谱研究中的应用。自由运转下这类激光的线宽达到兆赫兹量级,而气相的碘分子超精细谱线的自然线宽在 50 kHz 量级,这就需要对激光器进行频率稳定,减小其频率噪声,提高光谱测量的分辨率。但连续波染料激光的腔内增益介质呈液体喷流状,其厚度容易受振动、气流等环境因素影响,且染料在循环过程中产生很多微小的气泡。这些都造成了激光的频率噪声大,且高频成分多,对锁频环路的控制带宽及锁频系统的稳定性要求较高。

采用 Pound-Drever-Hall(PDH)锁频方法^[12]对连续波染料激光器的频率噪声进行了压制。为了提高锁频环路的控制带宽,设计了一种小型腔内电光调制器(EOM),结合染料激光器腔内反射镜上安装的压电陶瓷(PZT)一起作为频率调整的执行机构^[13,14]。在 EOM 设计和验证中首先借助电光调幅的方法定量地测量和比较了两种电光晶体的机械谐振特性,选择了谐振较小的晶体。在结构上采用了一对晶体并合理安排两个晶体的取向,既降低了插入损耗和标准具效应,同时也避免了插入 EOM 后对腔内光线的偏移。采用这一高速腔内 EOM 对连续波染料激光进行了锁频实验,定量测量和分析了锁频前后激光的频率噪声,同时也根据频率噪声估算了激光的光谱线宽。

2 高速腔内电光调制器

由于染料激光器的频率噪声中高频分量较多,需要宽带反馈控制环路进行激光频率噪声压制。采用腔内 EOM 可以实现频率的高速调整,但晶体产生电光效应的同时也伴随着压电效应,使晶体出现机械谐振^[15,16]。这种谐振会使电光调制的幅频响应发生突变,引起环路振荡,从而限制控制环路带宽,影响锁频效果,因此要选用机械谐振少的电光晶体用于 EOM。利用电光幅度调制^[17]的方法定量分析了晶体的谐振特性^[16]。在电光晶体前后各加一个起偏器,就构成电光调幅器(EOAM)。给晶体上下电极加正弦信号对激光进行强度调制,调制后的激光由一个宽带光电探测器(PD)探测,改变调制信

号频率就可测量出电光调制的频率响应。

实验中对铌酸锂(LN)和磷酸钛氧钾(KTP)两种电光晶体进行了测量。图 1 分别为采用两种晶体进行电光调制的频率响应,其中对于 LN 晶体,在 400 kHz 下幅度响应曲线平坦,相移滞后小于 5° 。400 kHz 以上出现了谐振点,主要在 2、5、2、10 MHz 处,对应的相移超前或滞后较多,这些谐振点主要是晶体的压电效应导致的。KTP 晶体的谐振点较少,15 MHz 以下仅在 3.8 MHz 处出现一个较小的谐振点,滞后相移只有 21° (已扣除 PD 的相移)。因此采用谐振点少的 KTP 晶体用于腔内 EOM。

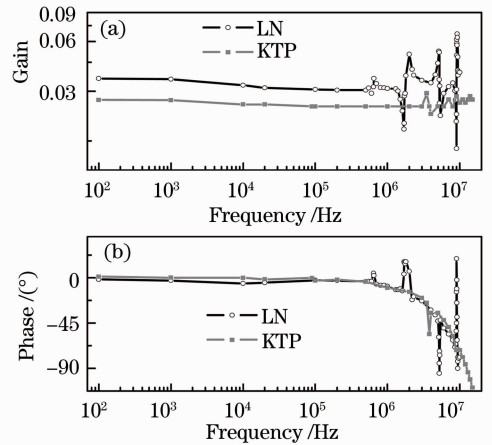


图 1 分别采用两种晶体进行电光调制的频率响应。

(a)幅度;(b)相位

Fig. 1 Frequency responses of the electro-optic modulation of two kinds of crystals. (a) Amplitude; (b) phase

在设计腔内 EOM 时如何降低其插入损耗是非常关键的,此外晶体两个端面产生的寄生标准具效应容易导致激光振荡不稳定,发生跳模。设计光束以布儒斯特角($i_B = 60.67^\circ$)入射到晶体内部,通过减小端面反射来减小腔内损耗,同时斜入射能较大程度地避免标准具效应造成的激光器不稳定。然而光束以布儒斯特角入射晶体使得出射光相对入射光发生平移,进而导致激光器不出光,于是在腔内插入第二块晶体以补偿光束平移,即腔内 EOM 是由一对具有布儒斯特角的电光晶体构成的,具体结构如图 2 所示。设计时还考虑到以下 2 个因素:1) 晶体尺寸。当腔内光阑小于 4 mm 时,光斑边缘被挡住因而增加了腔内损耗,使得腔内的激光无法起振;但另一方面要增强电光调制效应,要求加电场方向的晶体尺寸尽量小,于是取晶体高度为 4 mm。2) 偏振方向与电场方向。晶体内部激光偏振方向平行于晶体 Y 轴,两块晶体的 Z 轴呈反向平行,所加电场与 Z 轴同向,即两晶体的电场为反向平行。如果两晶

体的电场方向为同向,则晶体导致的频率变化幅度相等而符号相反,调制效应正好相互抵消。

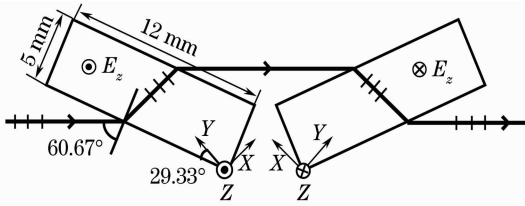


图 2 采用两个 KTP 晶体的腔内 EOM 的设计图
Fig.2 Design diagram of the intracavity EOM using two KTP crystals

图 2 中两块晶体的尺寸均为 12 mm×5 mm×4 mm,切割方向为 29.33°-Z cut,即晶体通光端面平行于 Z 轴,且与 Y 轴夹角为 29.33°。该 EOM 可产生的折射率变化为 $\Delta n = 2.2 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}$,引入激光频率变化 $\Delta \nu = 131 \text{ kHz/V}$ 。

3 实验装置

窄线宽染料激光采用 PDH 锁频方法^[12],将激光频率锁定在法布里-珀罗(F-P)腔的一个谐振峰上,实现对激光频率噪声的压制。实验中染料激光器为单模连续波运转激光器(型号:DYE-SF-07),其结构如图 3(a)所示。腔镜 M₁~M₆ 构成环形激光腔,双折射滤波片(BF)、薄标准具(E₁)和厚标准具(E₂)用于激光模式选择及单模运转。腔内电光晶

体 EOM1 放置于薄标准具 E₁ 和染料喷嘴之间。M_p 为抽运镜,BP 为布儒斯特窗,FR 为旋光器,PZT1 为小尺寸快速压电陶瓷,PZT2-1,2,3 为慢速大伸长量压电陶瓷。染料激光的抽运激光器为半导体抽运固体激光器(型号:Verdi-V5),波长为 532 nm。染料激光的增益介质为 R6G,对应的波长调谐范围为 550~600 nm。激光器频率无跳模连续调谐的范围为 30 GHz,出射光为水平偏振,在 5 W 抽运的情况下最大输出功率为 150 mW。图 3(b)为染料激光稳频系统结构图。研制了锁频用的 F-P 腔,该腔为水平腔,采用平凹腔结构,腔镜的介质膜反射率为 99.5%,腔长为 15 cm,自由光谱区为 1 GHz,谐振峰线宽约为 1 MHz,细度为 1006。图中 PL 为偏振片,PBS 为偏振分光片,PD 为光电探测器,LO 为本振,DBM 为双平衡混频器,LPF 为环路滤波器。F-P 腔被放置在真空室中。为了减小由温度波动造成的腔长变化,对真空室外壁进行了控温。腔外电光调制器 EOM2(采用 LN 晶体自制)用来进行激光相位调制,调制频率为 10 MHz,调制指数为 0.4。经相位调制后的激光被注入到 F-P 腔中,腔的耦合效率为 75%(对应腔内模式 TEM₀₀)。F-P 腔的反射光被一个高速光电探测器 PD 探测,PD 输出经混频器解调后得到误差信号。该信号分别送至 PZT 和 EOM 反馈环路进行激光频率噪声的压制。

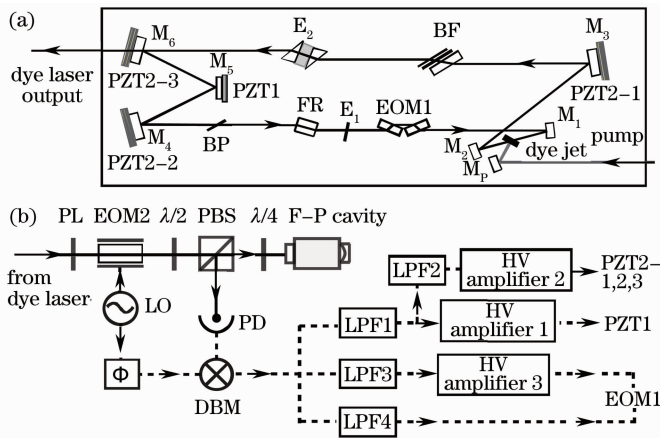


图 3 (a) 包含腔内 EOM 的环形染料激光器结构图; (b) 染料激光稳频系统结构图

Fig.3 (a) Structure of the ring dye laser with intracavity EOM; (b) structure of the frequency stabilization system of dye laser

染料激光稳频系统采用了 PZT 与 EOM 作为频率调整的执行机构,其在染料激光腔内的位置如图 3(a)示。其中 PZT 分为两种,一种是大尺寸的 PZT[图 3(a)中的 PZT2-1,2,3,分别位于腔镜 M₅、M₄、M₆ 上],其伸长量大,对应的频率调整的动态范

围达到 2 GHz,响应带宽约为 100 Hz,称为慢速 PZT。另一种是小尺寸 PZT[图 3(a)中的 PZT1,位于腔镜 M₅ 上],其响应带宽约为 10 kHz,称为快速 PZT。整个控制环路的结构如图 3(b)所示。LPF1 的输出经过高压放大后驱动 PZT1,主要用来压制

频率噪声中的中、低频分量。激光频率的大范围低速漂移是通过 PZT2 来补偿的。具体的方法是将 LPF1 的输出再送至 LPF2, 然后经高压放大去驱动 PZT2-1, 2, 3, 这样也可避免 PZT1 一路驱动信号出现饱和现象。高频噪声的压制是通过 EOM 环路实现的, 该部分也分为两路, 其中一路经高压放大加到晶体的上电极, 另一路经 LPF4 后直接加到晶体的下电极, 以扩展环路带宽。

4 实验结果

对染料激光进行稳频后, 测量了激光频率噪声谱。在混频器输出端口测量误差信号的噪声谱, 将其除以鉴频斜率后就得到激光频率噪声谱。在未锁定的情况下将激光频率调至光腔的一个谐振峰就可得到自由运转激光的频率噪声谱, 而激光频率远离谐振峰时就可以测量锁频系统的本底噪声(在这一测量中应注意避免高阶模式的干扰)。光腔振动导致的频率噪声远小于激光本身频率噪声, 因此可忽略不计。测量中激光波长为 578 nm, 入腔光功率为 130 μW , 误差信号峰峰值为 0.2 V, 对应的鉴频斜率为 1.8×10^{-7} V/Hz。分别采用傅里叶分析仪和频谱分析仪测量 100 kHz 以内和以上的噪声谱。

图 4 为自由运转激光和锁频环路内部测量得到的激光频率噪声。自由运转染料激光的频率噪声较大。当只采用 PZT 环路锁定激光时, 在 100 Hz 处环内噪声同自由运转时的噪声相比减小至约 1/1000。而在 10 kHz 以上由于控制环路的带宽限制, 对激光频率噪声没有压制效果。当联合使用 PZT 与 EOM 环路锁定激光时, 环内噪声在 0.1~50 kHz 的范围内进一步减小了约 4/5。锁频系统的本底噪声在 10 kHz 以上时较小, 但 10 kHz 以下

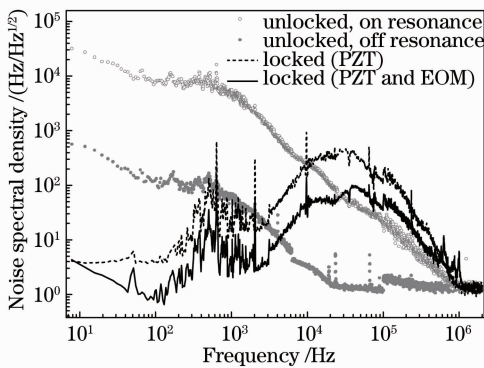


图 4 自由运转激光和锁频环路内部的激光频率噪声
Fig. 4 Frequency noises of free running laser and laser in frequency locking ring cavity

变大, 这主要是剩余幅度调制引起的^[18,19]。

实验发现激光波长及功率的变化对频率噪声没有影响。由于稳频系统采用了宽带镀膜光学器件(包括 F-P 腔的腔镜), 镀膜范围覆盖了激光器调谐范围(550~590 nm), 保证了在该波长范围内激光都可锁定在 F-P 腔上。将波长从 571.81 nm 调谐至 583.59 nm(调谐过程中保证入射 F-P 腔功率一定), 测量到的频率噪声谱没有变化。另外将激光功率从 130 μW 增加到 272 μW , 锁频后的激光频率特性没有改变。故可调谐染料激光器能实现宽波长范围及不同功率下的频率稳定。

为了分析稳频后的激光线宽, 在控制环路外测量了激光稳频后的频率噪声。这一测量是借助于另外一个高细度光学谐振腔完成的, 该光学谐振腔的细度为 7.5×10^4 , 谐振峰宽为 20 kHz, 自由光谱区为 1.5 GHz。与测量自由运转激光的频率噪声类似, 首先将稳频后的激光经相位调制后注入高细度光腔, 并调整激光频率使其位于腔的谐振峰中心, 腔反射信号经解调后即可用于频率噪声的测量。图 5 为稳频前后激光的频率噪声, 同时给出了自由运转下的频率噪声谱作为对比。通过激光的频率噪声谱可以计算出在一定测量时间下激光的光谱线宽^[20]。为了方便计算激光线宽, 对噪声谱做了近似, 如图 5 中两条直线 $e_1(f) = a_1/f$ 和 $e_2(f) = a_2/f^{1/2}$, 其中 $a_1 = 3.0 \times 10^6$ Hz^{3/2}, $a_2 = 1.9 \times 10^3$ Hz, 并假定测量时间为 100 ms。图 5 中阴影线和阴影标示出的区域分别表示出在激光自由运转和锁定两种情况下对线宽有贡献的那部分频率噪声谱。由频率噪声谱计算得到自由运转和稳频后激光的光谱线宽分别为 2.2 MHz 和 10 kHz。10 kHz 的光谱线宽已完全满足探测碘分子超精细光谱所需的分辨率。

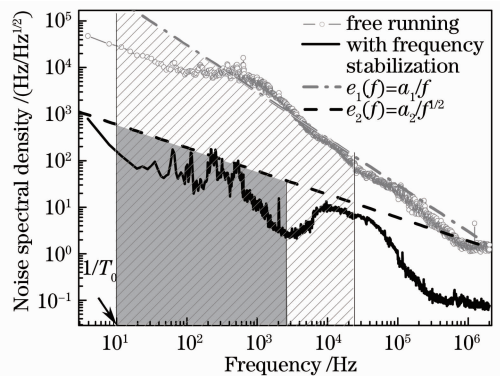


图 5 稳频前后激光的频率噪声
Fig. 5 Laser frequency noises with and without frequency stabilization

5 结 论

针对染料激光频率噪声高频成份较多的特点设计和验证了一种腔内 EOM, 该 EOM 具有体积小、插入损耗低、机械谐振小和响应速度快等优点。将腔内 EOM 与 PZT 相配合作为频率调整的执行机构, 并和伺服电路一起构成宽带频率反馈控制环路。通过测量稳频前后激光的频率噪声定量地分析了控制环路对激光频率噪声的压制效果。经过稳频后的染料激光其光谱线宽从 2.2 MHz 降至了 10 kHz (测量时间为 100 ms)。该类型腔内 EOM 同时也可用于很多类型的连续波激光, 如钛宝石激光器、外腔型半导体激光器等。下一步将用窄线宽可调谐激光探测放置于沸石纳米管道中的碘分子的超精细光谱, 并与自由态碘分子的消多普勒光谱进行比对。

参 考 文 献

- 1 B. C. Young, F. C. Cruz, W. M. Itano *et al.*. Visible lasers with subhertz linewidths[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(19): 3799~3802
- 2 J. Hough, D. Hils, M. D. Rayman *et al.*. Dye-laser frequency stabilization using optical resonators[J]. *Appl. Phys. B*, 1984, **33**(3): 179~185
- 3 J. Heimcke, S. A. Lee, J. L. Hall. Dye laser spectrometer for ultrahigh spectral resolution: design and performance[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(9): 1686~1694
- 4 J. Ye, L. S. Ma, J. L. Hall. Molecular iodine clock[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(27): 270801
- 5 A. Arie, S. Schiller, E. K. Gustafson *et al.*. Absolute frequency stabilization of diode-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17): 1204~1206
- 6 Zang Erjun, Cao Jianping, Li Ye *et al.*. 532 nm iodine molecular optical frequency standards[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 203~208
臧二军, 曹建平, 李 焯 等. 532 nm 碘分子光频标[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 203~208
- 7 L. S. Chen, W. Y. Cheng, J. Ye. Hyperfine interactions and perturbation effects in the $B0_{u}^{+} (^3\Pi_u)$ state of $^{127}\text{I}_2$ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(4): 820~832

- 8 J. P. Zhai, I. L. Li, S. C. Ruan *et al.*. Controlling the alignment of neutral iodine molecules in the elliptical channels of $\text{AlPO}_4\text{-11}$ crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(4): 043117
- 9 W. H. Guo, D. D. Wang, J. M. Hu *et al.*. Raman spectroscopy of iodine molecules trapped in zeolite crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(4): 043105
- 10 J. M. Hu, D. D. Wang, W. H. Guo *et al.*. Reversible control of the orientation of iodine molecules inside the $\text{AlPO}_4\text{-11}$ crystals [J]. *J. Phys. Chem.*, 2012, **116**(7): 4423~4430
- 11 D. J. Mann, M. D. Halls. Water alignment and proton conduction inside carbon nanotubes[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(19): 195503
- 12 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 13 D. D. Hudson, K. W. Holman, R. J. Jones *et al.*. Mode-locked fiber laser frequency-controlled with an intracavity electro-optic modulator[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2948~2950
- 14 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327
常冬霞, 刘 侠, 王 宇 等. 连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 323~327
- 15 M. Hyodo, K. S. Abedin, N. Onodera. Generation of millimeter-wave signals up to 70.5 GHz by heterodyning of two extended-cavity semiconductor lasers with an intracavity electro-optic crystal[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**(1): 159~169
- 16 F. Liu, C. Wang, L. F. Li *et al.*. Long-term and wideband laser intensity stabilization with an electro-optic amplitude modulator [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2013, **45**: 775~781
- 17 A. Yariv. *Quantum Electronics*[M]. New York: Wiley, 1989
- 18 Liufeng Li, Fang Liu, Chun Wang *et al.*. Measurement and control of residual amplitude modulation in optical phase modulation[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, **83**(4): 043111
- 19 Chen Yuhua, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Suppression of residual amplitude modulation in electro-optical phase modulators using Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1877~1882
陈玉华, 蒋燕义, 毕志毅 等. 利用法布里-珀罗腔抑制电光相位调制中的剩余幅度调整 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1877~1882
- 20 G. D. Domenico, S. Schilt, P. Thomann. Simple approach to the relation between laser frequency noise and laser line shape [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(25): 4801~4807

栏目编辑: 张 腾