

太赫兹波光谱特性分析

康胜武^{1,2} 汪继平¹ 刘侃¹ 张新宇¹ 谢长生³ 张天序¹

¹ 华中科技大学图像识别与人工智能研究所多谱信息处理重点实验室, 湖北 武汉 430074
² 武汉工业学院, 湖北 武汉 430023
³ 武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074

摘要 目前太赫兹技术的研究主要集中在它的产生、探测机理研究上。由于太赫兹波处于微波和可见光之间的频率范围,已有的微波和光波理论是否能适用于太赫兹波或者具有某些共同的特性仍需实验验证。通过实验分析验证了太赫兹波在空气介质中在垂直于传播方向的平面内场振幅是服从高斯函数分布的,测量给出了太赫兹波的能量分布图。根据测试数据推导出太赫兹波在空气介质中能量衰减公式,利用法布里-珀罗(F-P)干涉仪原理设计出太赫兹波长仪,对美国 Corehent 公司 SIFIR-50 THz 太赫兹激光器发射的 1~3 THz 波长进行了测量。讨论分析了远场发射角、光束入射角度、机械振动、温度波动和折射率 n 波动等相关因素对测量精度的影响。

关键词 测量;法布里-珀罗干涉仪;波长仪;精度分析;太赫兹波

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0612001

Analysis of the Spectral Characters of Terahertz-Wave

Kang Shengwu^{1,2} Wang Jiping¹ Liu Kan¹ Zhang Xinyu¹
Xie Changsheng³ Zhang Tianxu¹

¹ Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence,
Multi-spectral Information Processing Technologies National Defence Science and Technology Laboratory,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China
³ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract At present, terahertz technology research mainly concentrates in its generation and detection mechanism. As the terahertz-wave being in the frequency range between microwave and visible light, whether the microwave and optical theory is applicable to terahertz-wave or has some common characteristic is to be studied. Analyzing and verifying the terahertz-wave field amplitude obeys the Gaussian distribution in the receiving plane perpendicular to the direction of propagation in the air medium by experiment; measurement brings forward energy distribution chart of terahertz wave in the air medium; the energy attenuation formulas of terahertz wave is deduced on the basis of the experimental data; the terahertz wavelength apparatus is designed using the Fabry-Perot (F-P) interferometer theory; the wavelength of emitted wave between 1~3 THz is measured from the SIFIR-50 THz laser of American Corehent Company. The related factors affecting the measurement precision including far-field divergence angle, the beam incident angle, mechanical vibration, temperature fluctuation and the refractive index fluctuation is analyzed at last.

Key words measurement; Fabry-Perot interferometer; wavelength apparatus; precision analysis; terahertz-wave

OCIS codes 120.4800; 120.2230; 120.4640; 120.3688

收稿日期: 2011-10-26; 收到修改稿日期: 2012-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61176052, 60736010, 60777003)和华中科技大学校基金(2011TS154)资助课题。

作者简介: 康胜武(1973—),男,博士研究生,主要从事光电器件研究、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: kangshw@sina.com

导师简介: 张新宇(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事微纳光电器件制作等方面的研究。

E-mail: x_yzhang@yahoo.com.cn

1 引 言

太赫兹波通常是指频率范围在 0.1~10.0 THz 之间(1 THz=10¹² Hz, 对应波数为 33.3 cm⁻¹, 能量为 4.1 meV, 波长为 300 μm)介于毫米波与红外光之间相当宽范围的电磁辐射区域。太赫兹辐射作为电磁波谱上新开发的一个频率窗口, 由于其独特的性质, 使得它在物理、化学、生物医学、通信、雷达和安全检查等各方面都有广阔的应用前景^[1~7]。世界上有越来越多的科研工作者逐渐加入到这个研究领域中来。目前太赫兹技术的研究情况主要是集中在它的产生、探测机理研究上, 由于太赫兹波处于微波和可见光之间的频率范围, 现有的微波和光波理论是否能适用于太赫兹波或者具有某些共同的特性, 这些都是有待研究的问题。

在可见光波段, 激光器出射光束可用高斯函数近似描述, 在太赫兹波段这一特性是否存立仍需要加以验证, 因为太赫兹波在空气中传播时大气中的水气对其具有很强的吸收导致它的传播距离相当有

限, 太赫兹波在空气介质中的传播特性尚不清楚, 本文通过实验分析验证了太赫兹波的场分布特性, 给出了太赫兹波在空气介质中传播的能量衰减公式, 根据可见光波段中的法布里-珀罗(F-P)干涉仪原理设计出太赫兹波长仪, 通过该波长仪测量出 1~3 THz 波长, 并分析了影响测量精度的相关因素。

2 实验及分析

实验中采用的太赫兹光源是 Coherent 公司的 SIFIR-50 THz 激光器, 可产生连续的太赫兹波, 频率范围为 0.2~7.0 THz, 结构框图如图 1 所示。成像探测器采用的是 Spiricon 公司的高性能热释电面阵 PPY-III-C-A, 像素 124 pixel×124 pixel, 成像有效区域 12.4 mm×12.4 mm, 响应范围 1.06~3000 μm。太赫兹激光功率计探头和激光计探头分别采用 Scientech 公司的 H410 和 AC2500, 测量数量级为毫瓦, 精确度 0.1 mW。

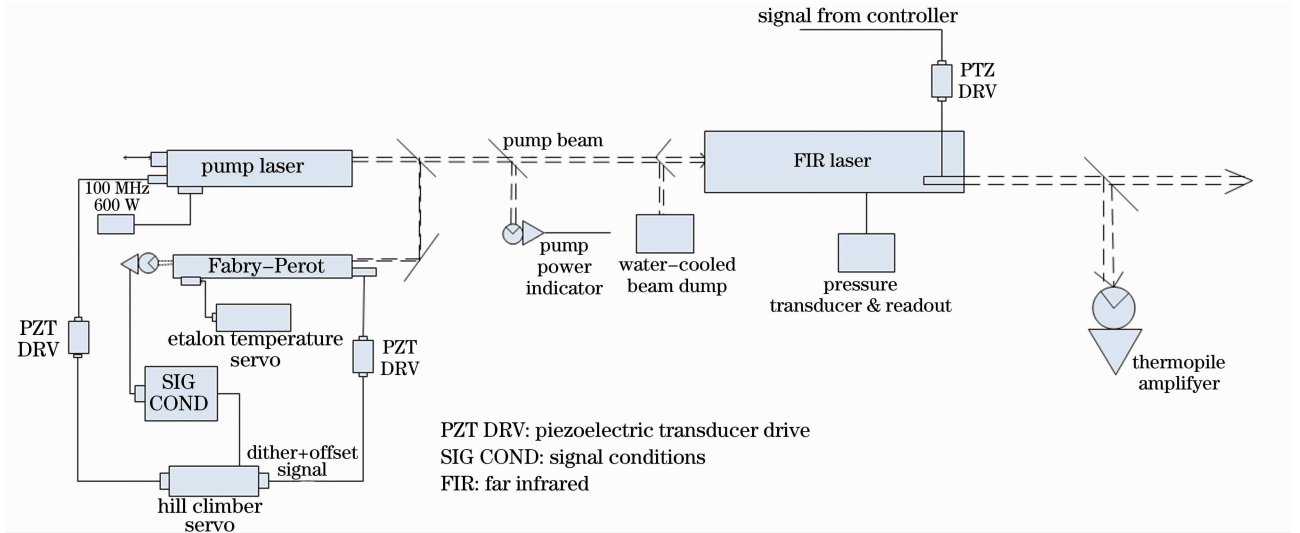


图 1 SIFIR-50 THz 激光器结构框图

Fig. 1 Block diagram of SIFIR-50 THz laser

2.1 场分布特性

设从激光器出射的太赫兹光束服从高斯分布, 在自由空间中沿 z 轴传输的高斯光束为^[8]

$$E(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R}\right) - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 c 为常数因子,

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}, \\ f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}, \quad k = 2\pi/\lambda, R = R(z) = z[1 + (f/z)^2],$$

ω_0 为高斯光束的腰斑半径, 为高斯光束的共焦参数, $R(z)$ 和 $\omega(z)$ 分别为沿传播轴距离束腰中心 z 处的高斯光束等相位面的曲率半径和光斑半径。

光束在探测器接受平面上的光强可表示为

$$I = EE^* = \frac{c^2}{\omega_0^2 [1 + (z/f)^2]} \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right]. \quad (2)$$

因为在横截面上 z 为常数, 所以由上式可知光强分布应服从高斯函数 $\exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right]$ 规律, 振幅从中心向外平滑降落。实验中用光功率计测得

$\lambda = 214.58 \mu\text{m}$, 太赫兹波在轴线的不同位置光斑功率在横截面 xy 平面内的分布规律如图 2 所示。

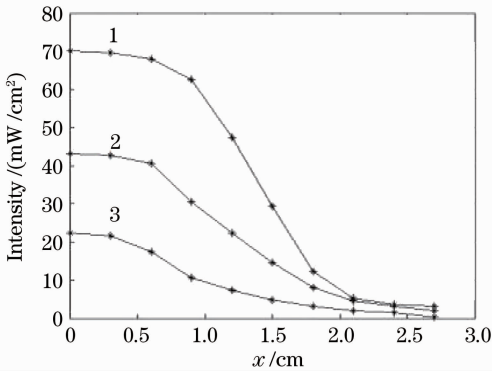


图 2 不同位置太赫兹波横截面的光强分布

Fig. 2 THz-wave intensity distribution in the cross section at different positions

图 2 中的曲线 1~3 分别为轴线上不同位置的横截面上太赫兹光强分布, 由图可验证太赫兹波在垂直于传播方向的平面内光强是近似服从高斯函数分布的, 在中心处振幅最大并向边沿平滑下降。

下面分析太赫兹波在空气介质中的衰减特性, 上面给出的光强分布公式并没有考虑太赫兹波在介质中的损耗。定义 $\beta(l)$ 为太赫兹波在介质中的功率衰减特征参量, 它主要和介质特性及传输距离有关, 则光功率分布可表示为

$$I(z) = I_0(z)\beta(l), \quad (3)$$

式中 $I_0(z)$ 为由 (2) 式得到 $z = z_0$ 的值, l 为太赫兹波在空气介质中的传输距离。

一般情况下太赫兹波的光子能量很低, 太赫兹辐射的强度比较弱, 很容易被外界信号所淹没, 而且在空气中衰减很快。图 3 和图 4 分别是实验测得

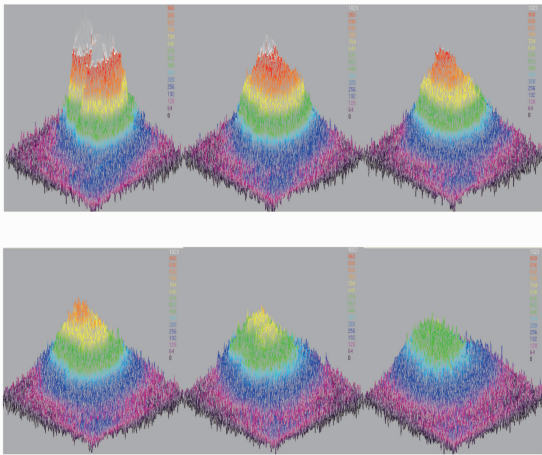


图 3 能量衰减 3D 图

Fig. 3 Three-dimensional diagram of energy attenuation

$\lambda = 214.58 \mu\text{m}$ 太赫兹波光功率在空气介质中随距离变化的衰减 3D 图和功率衰减图, 图 3 是用光束分析仪测得光斑能量分布的三维立体图, 子图分别是在光束传输 z 轴上依次递增 3 cm 的测量结果, 可以看出光斑中心处的能量随传输距离的增大而迅速衰减, 图 4 中的测试点是用光功率计在 z 轴方向上每隔 1 cm 处测得的光功率, 实线为拟合曲线。

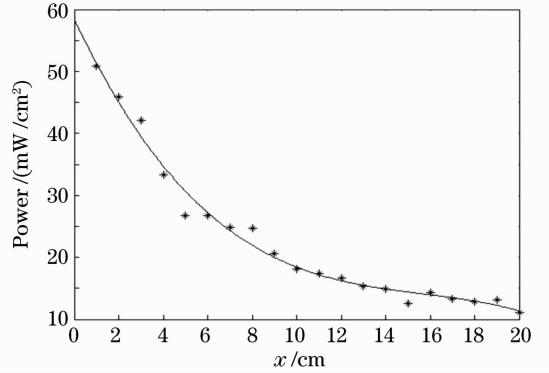


图 4 功率衰减图

Fig. 4 Power attenuation diagram

由图 4 中可知, 光束的光功率随距离的增大而平滑衰减, 为了得到最优的特征参量, 实验中分别对 7 组不同波长的太赫兹波进行了测量, 以下是对数据进行平均后的拟合曲线图如图 5 所示。

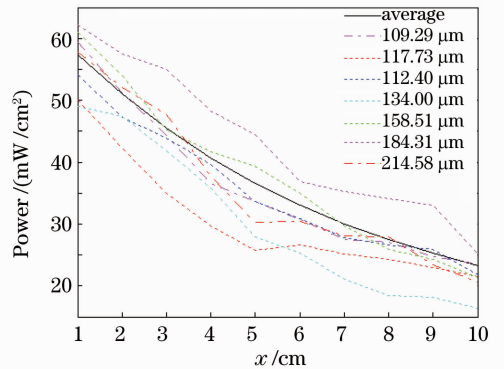


图 5 不同波长的太赫兹波光功率衰减图

Fig. 5 THz-wave power attenuation diagram of different wavelengths

图 5 中均值曲线方程为

$$\beta(l) = k(-2.01 \times 10^{-4} l^3 + 7.59 \times 10^{-3} l^2 - 1.2 \times 10^{-1} l + 1). \quad (4)$$

由此得到太赫兹波在空气介质中光功率的修正表达式为

$$I = \frac{kc^2}{\omega_0^2 [1 + (z/f)^2]} \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times (-2.01 \times 10^{-4} l^3 + 7.59 \times 10^{-3} l^2 - 1.2 \times 10^{-1} l + 1), \quad (5)$$

式中 z 为高斯光束束腰到 z 轴上某点的距离, l 为光束在腔外空气介质中的传输距离, k 为功率常系数, 随不同波长光束的光功率变化。

2.2 波长测量

在可见光波段通常采用 F-P 干涉仪来测量激光波长, F-P 干涉仪是分辨率极高的多光束干涉仪, 广泛应用在精细光谱结构研究和激光技术等领域^[8~15]。其原理是在两块平板玻璃上涂上高反射率涂层, 玻璃板相对面相互平行, 两玻璃板固定在金属滑道上且间距可调。入射光在相对两面上反复反射和折射后产生多束相干反射光和透射光, 投射光在焦平面上叠加形成干涉条纹。

干涉强度分布公式为^[16]

$$I_1 = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2(\alpha/2)}, \quad (6)$$

式中 I_0 为入射光强, R 为反射面的光强反射率, α 为相邻两相关光间的相位差。

考虑高斯光束以 θ 角斜入射 F-P 腔, 则透射光中相邻两光束的光程差为

$$\Delta L = 2hn \cos \theta, \quad (7)$$

式中 h 为腔的厚度, n 为腔内介质折射率, θ 为光束入射角。当 $2hn \cos \theta = k\lambda$, $k = 1, 2, 3, \dots$ 时, 出射光束出现干涉极大。反射率 R 愈高, 干涉极大就愈锐, F-P 干涉仪的反射率在 90% 以上。由于亮条纹极锐, 波长差极小的光谱也能分离, 故有极高的光谱分辨率。为便于测量波长, 取 $n = 1, \theta = 0$, 即高斯光束正入射处于空气介质的 F-P 腔端面, 则波长公式可表示为 $\lambda = 2h/k$ 。

利用此原理设计出太赫兹波长仪, 它把入射光通过斩波器转换为交流信号, 然后通过 F-P 干涉仪 (腔长调节范围 1~5 cm), 最后通过聚焦透镜汇聚到热释电探测器 (频率范围 0.02~3.00 THz, 动态范围 1 μm ~10 mW) 的探头上, 由探测器把光信号转换为正弦电信号, 探测器输出到示波器, 通过示波器上的波形特征及 F-P 干涉仪的调节值就可计算出太赫兹波长, 其结构和实物图分别如图 6 和 7 所示。

测量过程中调节 F-P 干涉仪使示波器上的正弦信号量出现峰值, 记下这时干涉仪的起始位置量 x_1 , 继续调节干涉仪使示波器上连续出现 k 个正弦峰值量, 记下此时干涉仪的终止位置量 x_2 , 通过公式 $\lambda = 2(x_2 - x_1)/k$ 计算出太赫兹波长。

实验测得的 Coherent 公司太赫兹激光器发射

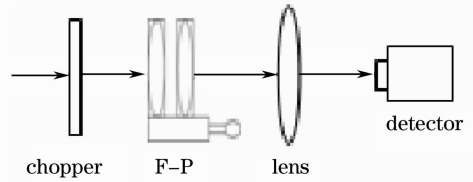


图 6 太赫兹波长仪结构图

Fig. 6 Structure diagram of THz-wave apparatus

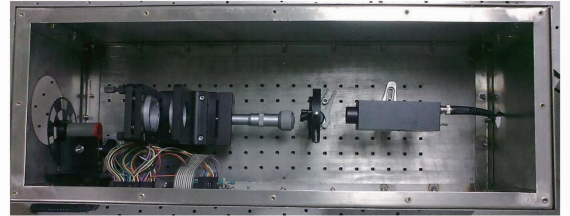


图 7 太赫兹波长仪实物图

Fig. 7 Physical diagram of THz-wave apparatus

的太赫兹波与用太赫兹波长仪测量的波长对照表如表 1 所示。

表 1 波长测量对照表

Table 1 Contrast table of wavelength measurement

| THz-laser wavelength / μm | THz-wavelength apparatus measurement / μm | Error / % |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------|
| 109.29 (2.74 THz) | 109.5 | 0.19 |
| 117.73 (2.55 THz) | 117.5 | 0.20 |
| 118.83 (2.52 THz) | 118.0 | 0.70 |
| 122.40 (2.45 THz) | 121.5 | 0.74 |
| 134.00 (2.24 THz) | 134.5 | 0.37 |
| 158.51 (1.89 THz) | 158.0 | 0.32 |
| 184.31 (1.63 THz) | 183.5 | 0.44 |

测量精度分析:

1) 远场发散角的影响

共焦腔的基模光束是依双曲线规律从腔的中心向外扩展的, 发散角为双曲线的两根渐近线之间的夹角:

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2\omega(z)}{z} = 2\sqrt{\frac{\lambda}{f\pi}}, \quad (8)$$

以 $\lambda = 184.31 \mu\text{m}$ 波长为例, 激光器 $f = 0.5 \text{ m}$, 则 $\theta_0 \approx 22 \times 10^{-3} \text{ rad}$, 发散角很小, 说明光束具有良好的方向性, 故测量中在一定距离内光束未经准直而近似为平行光处理对精度的影响是可以忽略的。

2) 光束入射角度的影响

如果光束小角度斜入射 F-P 腔, 即 $\theta \neq 0$, 对固定的 n, h , $d\lambda = -\frac{2hn}{k} \sin \theta d\theta$, 因 $\theta \approx 0$, 故 $\sin \theta \approx \theta \approx d\theta$, $d\lambda \approx -\frac{2hn}{k} d^2\theta$, 取 $\lambda = 109.29 \mu\text{m}$, 当 $\Delta\theta = 0.05^\circ$

时, $\Delta\lambda = 0.273 \mu\text{m}$, 造成测量误差为 0.25%。因为 F-P 干涉仪的孔径是有限的, 当入射光束有一定倾角时, 经多次折射反射后, 光束将超出孔径, 而且 h 越大误差越大, 所以在测量时要尽量保证光束正入射, 腔长 h 的调节范围不能太大, 一般 h 在 1~5 cm 量级。

3) 机械振动、温度波动等因素的影响

对正入射光束, 波长公式可简化为 $\lambda = 2hm/k$, 当机械振动造成 h 变化时, 测量误差可表示为 $\Delta\lambda/\lambda = \Delta h/h$, 对 $h = 5 \text{ cm}$ 的腔调节值, $\Delta h = 1 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda/\lambda = 0.002\%$, 为减小机械振动的影响, 激光器和测试平台最好用橡胶或海绵做衬底以达到减震效果。温度波动引起的 h 变化可表示为

$$\Delta h = \alpha h \Delta T, \quad (9)$$

因此 $\Delta\lambda/\lambda = \Delta h/h = \alpha \Delta T$, α 为 F-P 干涉仪支架材料的热膨胀系数, 所以要求选择膨胀系数小的材料做支架, 并且在测试时环境温度尽量保持恒温。

4) 折射率 n 波动的影响

在测量时是假设 F-P 腔内空气介质是均匀恒定的, 但介质折射率是会受到温度 T 、湿度 H 和气压 P 影响的, 即折射率为三者的函数 $n(T, H, P)$, 则

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial n}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial n}{\partial P} \Delta P, \quad (10)$$

因此 $\Delta\lambda/\lambda = c_T \Delta T + c_H \Delta H + c_P \Delta P$, 要减小测量误差必须减小 ΔT , ΔH 和 ΔP , 即减小温度、湿度和气压的波动, 故测量仪器最好密封以防空气流通造成折射率变化。

3 结 论

在波长测量中, 影响测量精度的因素很多, 但光束的入射角影响最大, 其次是机械振动, 由实验结果可看出测量波长的最大偏差控制在 1% 以内, 精度在容许的范围内, 证明用 F-P 干涉仪设计的太赫兹波长仪是适用可行的, 其结构简单, 操作方便。

参 考 文 献

1 P. Y. Han, J. Chen, H. W. Zhao *et al.*. Application of

- terahertz spectroscopy in security, chemistry and microscopy[C]. *Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis*, 2008
- 2 S. Wietzke, C. Jansen. Industrial applications of THz systems [C]. *SPIE*, 2009, **7385**: 738506
- 3 Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi *et al.*. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0111001
- 姚睿, 丁胜晖, 李琦等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0111001
- 4 S. Wietzke. Terahertz imaging; a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints[J]. *J. Eur. Opt. Soc.: Rap. Public.*, 2007, **2**: 07013
- 5 C. Otani, T. Taino, R. Nakano *et al.*. A broad-band THz radiation detector using a Nb-based superconducting tunnel junction [J]. *IEEE*, 2005, **15**(2): 591~594
- 6 P. Siegel. Terahertz technology [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 2002, **50**(3): 910~928
- 7 E. Pickwell, V. P. Wallace. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(17): 301~310
- 8 Orazio Svelto, David C. Hanna. Principles of Lasers (4th Edition)[M]. Milano: Springer, 2008
- 9 H. A. Safia, R. A. Tahtamouni, I. A. Aljarayesh *et al.*. Transmission of a Gaussian beam through a Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 3805~3811
- 10 E. Nichelatti, G. Salvetti. Spatial and spectral response of a Fabry-Perot interferometer illuminated by a Gaussian beam [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4703~4712
- 11 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang. Anovel extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
- 段德稳, 朱涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非半径光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- 12 Z. Huang, Y. Zhu, X. Chen *et al.*. Intrinsic Fabry-Pe/spl acute/rot fiber sensor for temperature and strain measurements [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2403~2405
- 13 T. K. Gangopadhyay, P. J. Henderson. Vibration: history and measurement with an extrinsic Fabry-Perot sensor with solid-state laser interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2471~2477
- 14 Chen Xianfeng, Fang Yuntuan, Shen Xiaoming *et al.*. Study on resonant modes of all-dielectric dual-cavity Fabry-Perot structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 546~550
- 陈宪锋, 方云团, 沈小明等. 全介质双腔法布里-珀罗结构的共振模研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 546~550
- 15 Dai Lihua, Wang Ming, Rong Hua. Study of a novel SU-8 fiber Fabry-Perot pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s105005
- 戴丽华, 王鸣, 戎华. 新型 SU-8 光纤法布里-珀罗压力传感器的设计仿真[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s105005
- 16 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005

栏目编辑: 何卓铭