

文章编号: 1001-3806(2008)05-0513-04

## 烟幕对激光干扰效果的数值模拟研究

杨海林<sup>1,3</sup>, 牛燕雄<sup>1,2\*</sup>, 沈学举<sup>1</sup>, 武东生<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 姜 楠<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003; 2. 清华大学 精密仪器测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084; 3. 中国人民解放军 75150 部队, 衡阳 421131)

**摘要:** 为了实现烟幕对激光制导武器有效的干扰, 采用数值计算的方法, 以布格-朗伯定律为数学基础, 应用 Vander Hulst 近似计算方法, 推导出了不同烟幕微粒参量对不同入射激光的干扰效果。数值计算结果表明, 针对不同的激光波长, 存在一个最佳的烟幕微粒参量, 使对激光的干扰效果达到最佳。该研究对利用烟幕对激光制导武器实施有效干扰及干扰效果评估有重要的参考价值。

**关键词:** 激光光学; 烟幕干扰; 数值模拟; 消光系数

**中图分类号:** O648.18 **文献标识码:** A

### Simulation of effect of smoke screen interference on laser

YANG Hai-lin<sup>1,3</sup>, NIU Yan-xiong<sup>1,2</sup>, SHEN Xue-ju<sup>1</sup>, WU Dong-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, JIANG Nan<sup>1</sup>

(1. Department of Optics & Electrical Engineering Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003 China; 2. Key Laboratory of Precision Instrument and Testing Technology of Nation, Tsinghua University, Beijing 100084 China; 3. 75150 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Hengyang 421131, China)

**Abstract** By means of the approximate Vander Hulst numeration method based on Bouguer-Lambert law, the effect of the smoke screens with different particles on the interference of different wavelength lasers was calculated. Numeric simulation indicated there was an optimum smoke particle parameter for a certain laser wavelength in order to obtain the best laser interference results. The study is valuable for both the evaluation and efficient interference on laser guidance weapon.

**Key words** laser optics; smoke screen interference; numerical simulation; extinction coefficient

## 引 言

随着激光制导武器在军事上的广泛应用, 采取何种干扰手段来实施对入射激光的有效干扰问题备受人们关注, 而烟幕作为一种对激光制导武器干扰最实用的器材之一, 以其价格便宜、效率高、操作简单等优点得到了人们的广泛研究<sup>[1-3]</sup>。GE 等人<sup>[4]</sup>研究了烟幕干扰激光制导武器的机理, 从空间几何角度说明了水平烟幕和垂直烟幕配合使用可以更有效地干扰激光制导武器的攻击。SONG 等人<sup>[5]</sup>研究了原材料粒径对烟幕红外消光的影响。LU 等人<sup>[6]</sup>从理论和实验两个方面研究了红磷烟幕的红外消光作用。WANG 等人<sup>[7-8]</sup>研究了红磷、卤代有机化合物 (halogenated organic compound, HC) 和石墨烟幕对 CO<sub>2</sub> 激光器发射的 10.6 μm 激光的消光效果, 结果表明红磷烟幕对

10.6 μm 激光的消光作用以吸收效应为主, 其质量消光系数随浓度增加而下降, 石墨烟幕对 CO<sub>2</sub> 激光具有很好的消光作用, 而 HC 对该波长的激光几乎没有衰减作用。但是这些文献中仅仅研究了一种或几种烟幕对某单一波长激光的衰减作用。虽然 ZHONG<sup>[9]</sup>应用米氏散射理论对烟幕消光进行了数值模拟, 但计算中将烟幕颗粒近似为单分散系均匀球形, 并采用高斯正态分布来近似烟幕浓度分布, 使计算结果与实际有一定的偏差。

作者以布格-朗伯定律为数学基础, 采用 Vander Hulst 近似计算方法, 分别讨论了烟幕微粒粒径对烟幕的吸收因子、散射因子以及衰减因子的影响, 计算了不同烟幕微粒参量对不同入射激光的消光效果, 最终得出了相关结论。

## 1 理论模型

激光在烟幕中传输时, 因与烟幕微粒相互作用而受到削弱, 设光强为  $I(\lambda)$  的激光, 通过厚度为  $dx$  的烟幕后, 其光强变化为  $I(\lambda) + dI(\lambda)$ , 则有:

$$dI(\lambda) = -\mu(v, x) dx \quad (1)$$

式中,  $\mu(v, x)$  为烟幕的衰减系数,  $v = 2\pi rV/c$ ,  $V$  为入射

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20060400418)

作者简介: 杨海林 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电对抗技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: nyx@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2007-07-16 收到修改稿日期: 2007-10-08

激光的频率,  $r$  为烟幕微粒半径,  $c$  为激光在烟幕中的传输速率。求此方程有:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\int_{x_1}^{x_2} \mu(v, x) dx\right] \quad (2)$$

$L = x_2 - x_1$  为烟幕厚度。如果烟幕均匀, 则 (2) 式变为:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\mu(v)L] \quad (3)$$

此即为布格朗伯定律。指数中  $\mu(v)L = \tau(\lambda)$  称为烟幕的光学厚度。实验证明<sup>[10]</sup>: 当光被烟幕中的物质吸收时,  $\mu(v)$  与烟幕浓度  $C$  成正比。即:

$$\mu(v) = k(v, n)C \quad (4)$$

式中,  $k(v, n) = a(v, n) + \delta(v, n)$  为质量消光系数,  $a(v, n)$  为烟幕的吸收系数,  $\delta(v, n)$  为烟幕的散射系数。  $n = n_r - in_i$  为烟幕的复数折射率,  $n_r$  表征烟幕散射部分,  $n_i$  表征烟幕吸收部分。

烟幕对不同波长的激光消减也符合布格朗伯定律, 于是由 (3) 式便可以得出激光通过烟幕透过率。在实际作战中, 激光目标指示器发射的激光束是往返两次穿过烟幕, 回波信号才能被寻的器接收, 其穿过烟幕的路径长度就是单程路径的两倍。因此, 由 (3) 式、(4) 式便能得到激光光束通过战场烟幕的双程透过率的表达式为:

$$T_x = \exp[-2k(v, n)CL] = T_L^2 \quad (5)$$

对于一定浓度和厚度的烟幕, 只要知道烟幕的质量消光系数  $k(v, n)$  就能算出透过率  $T_x$ 。

众所周知, 烟幕微粒的粒径总有一个分布, 典型的有对数分布、正态分布、威布尔分布和洛森-莱姆莱尔分布等。在此, 微粒分布采取对数分布:

$$N(r) = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left\{-\left[\frac{\ln(r/r_g)}{2 \ln \sigma}\right]^2\right\} \quad (6)$$

式中,  $r$  为烟幕微粒半径;  $r_g$  为烟幕微粒的几何平均半径;  $\sigma$  为微粒半径的标准差;  $\alpha$  为拟合参量。

对于吸收系数  $a(v, n)$  和散射系数  $\delta(v, n)$ , 按照下面公式计算<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} a(v, n) = \pi \int_0^\infty Q_a(v, n) N(r) r dr \\ \delta(v, n) = \pi \int_0^\infty Q_s(v, n) N(r) r dr \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $Q_a(v, n)$  为烟幕的吸收因子;  $Q_s(v, n)$  为烟幕的散射因子;  $Q_a(v, n)$ ,  $Q_s(v, n)$  与烟幕的衰减因子  $Q_e(v, n)$  之间有:  $Q_e(v, n) = Q_a(v, n) + Q_s(v, n)$  (8)  $Q_a(v, n)$ ,  $Q_e(v, n)$  可按常用的 V and er H u l st 近似计算<sup>[11]</sup>:

$$Q_a(v, n) = 1 + \frac{\exp(1 - 4vn_i)}{2n_i} + \frac{\exp(-4vn_i)}{8v^2 n_i^2} \quad (9)$$

$$Q_e(v, n) = 2 - 4\exp(-atanb) \left[ \frac{\cos b}{k} \sin(k - b) - \right.$$

$$\left. \left[ \frac{\cos b}{k} \right]^2 \cos(k - 2b) \right] + 4 \left[ \frac{\cos b}{k} \right]^2 \cos^2 b \quad (10)$$

式中,  $k = 2v(n_r - 1)$ ,  $b = \arctan[n_i / (n_r - 1)]$ 。

### 2 结果及讨论

首先考虑不同复折射率对吸收因子的影响。图 1 为烟幕吸收因子与烟幕微粒半径的变化关系 (入射激光波长取  $1.06\mu\text{m}$ )。

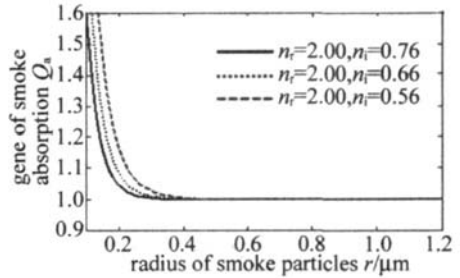


Fig 1 The variation of gene of smoke absorption with radius of smoke particles

由 (9) 式知,  $Q_a(v, n)$  只与  $n_i$  有关。由图可知: 在烟幕微粒半径小于  $0.4\mu\text{m}$  时,  $n_i$  越小, 吸收因子就越大, 但随烟幕粒径的继续增大, 吸收因子最后都趋于 1。

图 2 为烟幕散射因子与烟幕微粒半径的变化关系 (入射激光波长取  $1.06\mu\text{m}$ )。由图可以看出: 随微粒

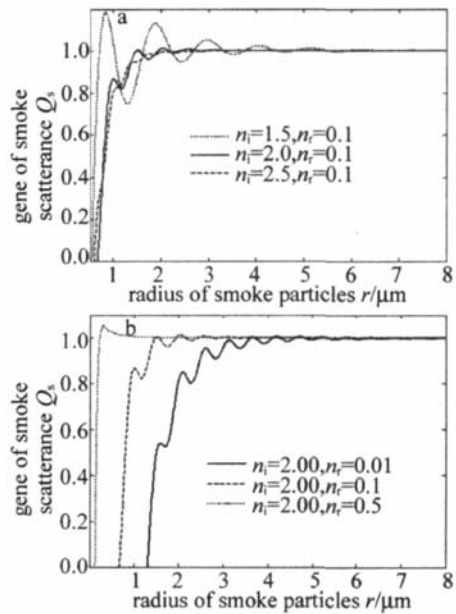


Fig 2 The variation of gene of smoke scattering with radius of smoke particles

半径的增大, 烟幕散射因子迅速增大, 后振荡变化并逐渐趋于常数 1。当烟幕微粒半径  $r$  小于入射激光波长时, 烟幕微粒对激光的散射可认为是由于光线对偶极子的激发而引起的, 因而在光电电磁场的影响下, 这些偶极子做振动, 便造成分子散射, 即瑞利散射; 同时从图中可以看出, 在这个阶段, 烟幕散射因子随烟幕微粒半径  $r$  的增大而迅速增大, 此时便形成粒子散射, 即米

氏散射,这与参考文献 [ 10 ] 中的结论相吻合。

为了进一步说明烟幕微粒粒径对入射光波长的散射影响,分析了烟幕的散射因子对不同波长激光的消光作用。图 3 为散射因子对波长分别为 1.06 $\mu\text{m}$ , 3.39 $\mu\text{m}$ , 10.6 $\mu\text{m}$  激光进行的消光作用数值分析。结

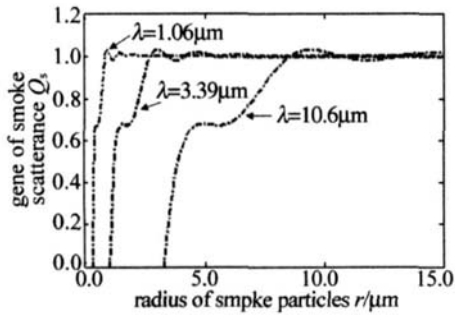


Fig 3 The variation of gene of smoke scattering with radius of smoke particles

果表明,微粒粒径与光波波长相差不大时,散射作用最强,随着微粒粒径的继续增大,散射因子最后都逐渐趋于常数 1。

图 4 为烟幕对激光的消光作用,入射激光波长取 1.06 $\mu\text{m}$ ,烟幕微粒半径取 0 $\mu\text{m}$ ~12 $\mu\text{m}$ 。从图中可知,在改变表征散射部分的  $n_s$  时,当烟幕微粒半径小于 0.2 $\mu\text{m}$  时,衰减因子  $Q_e(v, n)$  变化相对较大,在烟幕微粒粒径大于入射激光波长时,随烟幕微粒粒径的增大,  $n_s$  越小,衰减因子  $Q_e(v, n)$  越大。随着烟幕微粒粒径的继续增大,衰减因子都缓慢减小并逐渐趋于 2; 在改变表征吸收部分  $n_i$  时,衰减因子  $Q_e(v, n)$  随微粒半径  $r$  的增大而振荡变化,  $n_i$  越小,振幅越大,并最终都缓慢趋于 2。由此可知,无论在改变表征烟幕散射部分还是改变表征烟幕吸收部分  $n_i$  时,烟幕衰减因子都振荡变化并最终趋于 2,这与文献 [ 12 ] 中采用经典的米

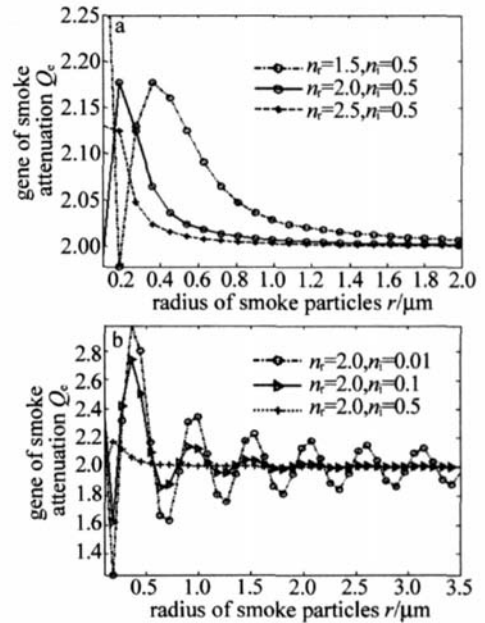


Fig 4 a—the variation of gene of smoke attenuation with radius of smoke particles b—the variation of gene of smoke attenuation with radius of smoke particles

氏散射理论分析结果和文献 [ 9 ] 中的数值模拟是一致的,这也从另一个方面说明了文中数值计算方法的正确性。

另外,当烟幕微粒半径  $r$  与激光入射光波长相近时,烟幕衰减因子  $Q_e(v, n)$  振幅最大,即烟幕衰减因子  $Q_e(v, n)$  达到最大。这时的衰减因子  $Q_e(v, n)$  与经典的米氏散射极为相似,这与前面不同波长时散射消光作用时的数值结果相吻合,可认为此阶段散射因子  $Q_s(v, n)$  居主导地位。

图 5 为不同烟幕微粒参量下,质量消光系数随激光波长变化的关系曲线(拟合系数取 1,计算参量为  $n = 2 - 0.66i$ )。

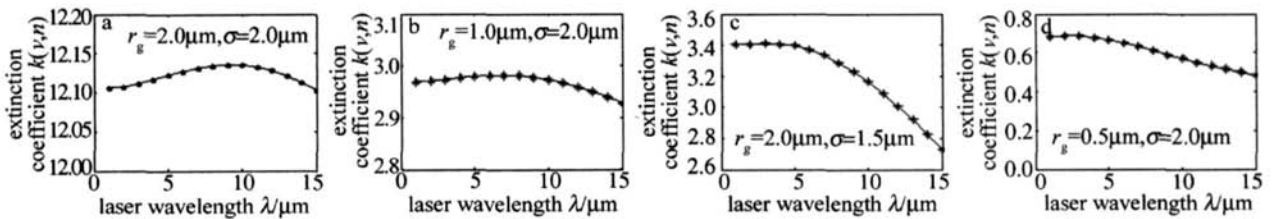


Fig 5 The variation of extinction coefficient with laser wavelength

由图可知:在不同粒径参量下,烟幕分别对 8 $\mu\text{m}$ ~10 $\mu\text{m}$ , 6 $\mu\text{m}$ ~8 $\mu\text{m}$ , 4 $\mu\text{m}$ ~6 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ ~4 $\mu\text{m}$  的入射激光波长消光作用最为明显。且易看出:随着微粒粒径的减小,消光系数也随之变小。但是,对于提高烟幕的消光性能,不能是靠增大微粒的粒径。因为烟幕粒径的增大,单位体积内的烟幕的质量也会增大,为了达到同样的消光效果,所需的烟幕材料的量就越大,这在实际中是不理想的。

图 6 为烟幕透过率与烟幕厚度的变化关系图。以

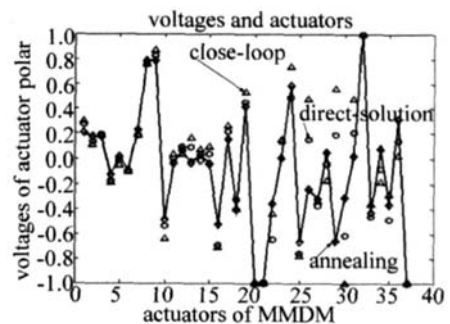


Fig 6 The variation of the laser of wavelength with the thickness of smoke particles

红磷烟幕为例, 1.06 $\mu\text{m}$ , 3.39 $\mu\text{m}$ , 10.6 $\mu\text{m}$ 的激光对红磷烟幕的消光系数分别为  $k(v, n) = 1.93, 0.34, 0.47^{[10]}$ , 计算中烟幕浓度取  $C = 1\text{g}/\text{m}^2$ 。

可见, 在这种情况下, 烟幕对 1.06 $\mu\text{m}$  波长的激光衰减很快, 如果透过率要求为 10% 时, 对于实际作战中只分别需 0.6m, 3.5m, 2.5m 的烟幕厚度即可, 实际上, 在考虑大气对激光的消光作用时, 实际所需的烟幕厚度会更小。

### 3 结 论

用 Vander Hulst 近似方法数值研究了烟幕对激光的吸收、散射和衰减特性, 数值研究结果表明: (1) 在不同的烟幕复折射率情况下, 烟幕的散射因子都随烟幕粒径的增大, 先迅速增大后缓慢振荡并逐渐趋于稳定值 1, 前一阶段可认为形成的是粒子散射, 即米氏散射, 当烟幕粒径大小和入射激光波长相当时, 散射作用最强; (2) 无论在改变表征烟幕散射部分  $n_r$  还是改变表征烟幕吸收部分  $n_i$  情况下, 烟幕衰减因子都会随着烟幕微粒粒径的增大而振荡衰减变化, 最后趋于稳定值 2, 这是吸收因子和散射因子共同作用的结果, 而且当烟幕微粒粒径与激光入射光波长相近时, 烟幕衰减因子振幅最大, 即衰减因子达到最大, 此阶段可认为散射因子居主导地位。因此, 在这种情况下, 烟幕微粒粒径大小应与入射激光波长大小相当, 以最大程度散射入射激光能量; (3) 针对不同的激光波长, 存在一个最佳的烟幕微粒参量, 使对激光的干扰效果达到最佳, 但最佳烟幕微粒参量难以用一个简单原则来判断, 必须根据实际需要中所采用的具体烟幕材料, 合理的通过建立数学模型并进行正确计算而得出。

(上接第 501 页)

进一步完善光反馈自混合干涉技术的位移测量有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] WANG W M, GRATTAN K T V, BOVLE W J Q, *et al*. Active optical feedback in a dual diode laser configuration applied to displacement measurements with a wide dynamic range [J]. *Appl Opt* 1994, 33 (10): 1795-1801.
- [2] YU Y G, GUIDO G, SILVANO D. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self mixing effect [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2004, 16 (4): 990-992.
- [3] LORENZO S, YU Y G, GUIDO G, *et al*. Self mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2004, 53 (1): 223-232.
- [4] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, *et al*. The estimation of the parameters in the model of the self mixing effect in semiconductor lasers [J]. *Laser*

### 参 考 文 献

- [1] LIM, FAN D Q, YIN Ch Y. Study on corresponding relation of laser and infrared transmittivity for smoke screen [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* 2006, 25 (2): 127-130 (in Chinese).
- [2] HU J, YANG Z K, YANG D Q. Smoke particles' recognition and Monte Carlo simulation of laser scattering characters [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2002, 29 (10): 950-954 (in Chinese).
- [3] QIU J, MEI J T. Interference of the smoke screen confronting infrared guided weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2006, 35 (2): 212-215 (in Chinese).
- [4] GE Q Sh, ZHANG L J, GE Q L. Mechanism study of smoke concealment in interfering air raid of laser guided weapon [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2005, 6 (2): 149-152 (in Chinese).
- [5] SONG D M, LIU Sh M, WANG N Y, *et al*. Study on the effect of materials granularity on infrared extinction capability of smoke screen [J]. *Infrared & Pyrotechnics* 2005, 2: 6-9 (in Chinese).
- [6] LIU G R, HUANG Sh X, HU F, *et al*. IR extinction effect of red phosphorus smoke screen [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry* 2005, 22 (7): 709-714 (in Chinese).
- [7] WANG X Y, PAN G P. Study and test of extinction coefficient of red phosphorus smoke to 10.6 $\mu\text{m}$  laser emission [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2005, 34 (6): 636-640 (in Chinese).
- [8] WANG X Y, PAN G P. Study of the extinction ability of several kinds of smoke screen to CO<sub>2</sub> laser emission [J]. *Laser & Infrared* 2006, 36 (2): 144-146 (in Chinese).
- [9] ZHONG Zh N. Numerical simulation of the extinction of smoke screen [J]. *ElectroOptics & Passive Measurements* 1999, 1: 14-19 (in Chinese).
- [10] YAO L J, GAO J L, XIAO K T, *et al*. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2004: 38-40, 51-56 (in Chinese).
- [11] LI Sh X. Electro-optical countermeasure technology [M]. Changsha National Defence Industry Press, 2000: 153-156 (in Chinese).
- [12] GAO J M, LING Y Sh, SHI J M, *et al*. Quantitative analyzed and investigated of extinction parameter with the smoke screen interfering [J]. *ElectroOptics & Passive Measurements* 1997, 3: 1-6 (in Chinese).
- [13] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al*. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2004: 38-40, 51-56 (in Chinese).
- [5] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al*. Interference of two beams in a He-Ne laser with optical feedback [J]. *Laser Technology* 2003, 27 (5): 470-472 (in Chinese).
- [6] YU Y G, YE H Y, YAO J Q. Steady solution to the self mixing interference system for measuring displacement [J]. *Acta Optica of Sinica* 2003, 23 (1): 80-84 (in Chinese).
- [7] DING Y Ch, ZHANG Sh L, LI Y, *et al*. Experimental study on the self mixing interference with orthogonal polarized He-Ne light [J]. *Laser Technology* 2004, 28 (1): 33-35 (in Chinese).
- [8] YU Y G, CHENG M, QIANG X F. Self mixing interference effects in a multimode laser diode [J]. *Acta Optica of Sinica* 2001, 21 (9): 1093-1098 (in Chinese).
- [9] YU Y G, YAO J Q, YE H Y. A self mixing interference structures including the pre-feedback used for measuring displacement [J]. *Acta Optica of Sinica* 2002, 22 (3): 308-312 (in Chinese).
- [10] OZDEMIR S K, SHINOHARA S, ITO S, *et al*. Compact optical instrument for surface classification using self mixing interference in a laser diode [J]. *Opt Engng* 2001, 40 (1): 38-43.