

全向激光告警系统中窄带滤光片的透射率分析

应家驹, 王永仲, 何永强, 周冰, 周中亮

(机械工程学院 光电技术研究所, 石家庄 050003)

摘要:根据全向激光告警系统的结构特点, 阐明了系统中大视场接收和窄带光谱滤波技术之间的矛盾. 通过建立法布里-珀罗滤光片的模型, 从反射膜的反射率、位相跃变以及间隔层介质所产生的光程差等因素, 分析了激光从不同入射角入射时, 滤光片具有不同的透射率. 给出了激光入射角与透射率之间的关系公式, 通过实验验证其有效性.

关键词:全向激光告警; 大视场; 窄带滤光片; 透射率

中图分类号: TB851+.7 TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-1892-5

0 引言

激光装备的运用, 对军事目标构成了越来越严重的威胁. 作为光电对抗领域的重要组成部分, 激光告警直接影响到被保护目标的战场生存. 成像型激光告警器作为告警器中的一大类型^[1-2], 通常由广角远心鱼眼透镜, 窄带滤光片和 CCD 成像器件构成. 从全向激光告警系统的结构上分析, 大视场接收和窄带光谱滤波技术之间的矛盾成为限制其探测性能的主要原因之一. 本文分析了窄带滤光片的入射角和透射率之间的关系, 对于组建系统时器件参量选择, 优化系统探测性能具有指导意义.

1 全向激光告警器的结构

全向激光探测系统的组成如图 1. 鱼眼透镜的超大视场, 可覆盖半球空域, 实现凝视探测^[3]; 窄带滤光片滤除杂散光, 降低虚警率, 实现对特定波长的告警; 成像探测器响应灵敏度高, 像元密度大, 像元尺寸小, 通常为微米量级, 从而可以实现对激光威胁源的精确定位. 入射激光透过鱼镜头之后, 经过窄带滤光片, 照射到探测器上. 这三部分各自性能以及它们之间的相互关系决定了全向激光告警系统的探测灵敏度, 滤光片的透射率成为影响系统探测灵敏度重要因素之一.

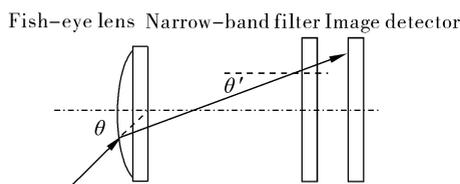


图 1 全向激光探测系统结构
Fig. 1 Structure of image-omnidirectional laser warning system

通常窄带滤光片是在光线垂直入射或是入射角很小的条件下使用的. 但是, 在全向激光告警系统中, 随着成像型告警系统的侦测视场角增大, 激光透过滤光片时的入射角 θ' 不在很小角度范围内, 不符合窄带滤光片的使用条件. 并且在实际应用中发现: 激光斜入射时, 随着激光入射角 θ' 的增大, 窄带滤光片透射率会随入射角 θ' 不同而变化, 当入射角度到达一定角度之后, 滤光片的透射率急剧下降, 严重影响系统的探测灵敏度. 因此, 造成大视场探测和窄带滤光片透射率之间的矛盾^[4].

2 窄带光谱滤光片透射率分析

由于法布里-珀罗单腔干涉片或多腔干涉片通常只利用一个透射峰^[5], 主要用于可见光和近红外波段^[6]. 因此建立基于法布里-珀罗滤光片的模型, 对中心波长为 $1.06\mu\text{m}$ 滤光片对于不同入射角的透射率进行分析.

2.1 法布里-珀罗干涉滤光片的原理模型

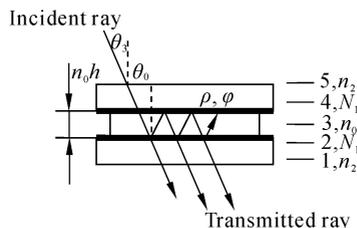


图 2 干涉滤光片的结构
Fig. 2 Structure of interference filter

干涉滤光片依据干涉原理制成^[7], 如图 2. 在折射率为 n_2 的平板玻璃 1 上镀一层折射率为复数^[8] $N_1 = n_1 + jk_1$ 的银膜 2, 再镀一层薄的折射率 n_0 的透明介质间隔层 3, 其上再镀一层银膜 4, 最后加一层玻璃 5. 两块玻璃是保护作用, 两个银膜为高反射层. 光波入射后, 在银膜间的间隔层内多次反射. 图 2 中 ρ, φ 为上下两层银膜的反射率和反射相位跃变; n_0h 为间隔层 3 的光学厚度, 则间隔层的相位厚度 δ 为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0 h \quad (1)$$

式中 λ 入射光波长。

据文献[8]法布里-珀罗型薄膜的透射率 T 为

$$T = (1 - \rho)^2 / [(1 - \rho)^2 + \rho \sin^2(\Phi/2)] \quad (2)$$

$$\Phi = 2(\varphi - \delta) \quad (3)$$

Φ 是正入射时相邻两束相干光的相位差。当相位差 Φ 满足公式(4)时,滤光片具有最大透射率。

$$\frac{\Phi}{2} = \varphi - \delta = -k\pi \quad (k=0, 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

如果滤光片透过的中心波长为 $\lambda_M = \lambda_0$,将公式(1)相位厚度 δ ,代入公式(4),可得间隔层的厚度 $n_0 h$ 为

$$n_0 h = \frac{\lambda_0(\varphi + k\pi)}{2\pi} \quad (k=0, 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

2.2 滤光片对应不同入射角的透射率分析

由式(2)、(3)可知,影响滤光片透射率的因素有:银膜的反射系数 ρ 、相位跃变 φ 及中间间隔层所产生的相邻两束光的相位差。这些因素均随这入射角的不同而变化。

在可见光和近红外区,窄带滤光片通常由银反射膜和冰晶石可以获得最好的效果[9]。冰晶石间隔层的折射率为 $n_0 = 1.35$,对于中心波长 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$ 的激光正入射时,银反射膜的相位跃变为 $\varphi = 2.78 \text{ rad}$ [8],当式(5)中取 $k=0$ 时,得中间间隔

层的最小厚度为

$$h = \frac{\lambda_0 \varphi}{2\pi n_0} = 0.3474 \mu\text{m} \quad (6)$$

金属膜和介质膜相比,其折射率从实数变为复数。通过查表[9]插值得出银膜对于 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$ 激光的折射率为

$$N_1 = n_1 + jk_1 = 0.1448 + j * 7.3813 \quad (7)$$

假设空气的折射率为 $n_3 = 1$,根据折射定律,光线在各层介质中角度关系为

$$n_3 \sin \theta_3 = n_2 \sin \theta_2 = N_1 \sin \bar{\theta}_1 = n_0 \sin \theta_0 \quad (8)$$

如图2,当光线在空气中的入射角为 θ_3 时,则在中间间隔层的折射角度 θ_0 ,即银膜间多次反射的入射角为

$$\theta_0 = \arcsin(n_3 \sin \theta_3 / n_0) \quad (9)$$

当光束在银膜间多次反射时,由于其折射率为复数,对于垂直于入射面的光分量 S 和平行于入射面的光分量 P 的反射率和相位跃变是不相同的。根据文献[8]菲涅耳公式可得: S 分量反射率 R_S 和相位跃变 φ_S 分别为

$$R_S = \frac{(n_0 \cos \theta_0 - N_z)^2 + K^2}{(n_0 \cos \theta_0 + N_z)^2 + K^2} \quad (10)$$

$$\varphi_S = \arctan \frac{2n_0 K \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 - N_z^2 - K^2} \quad (11)$$

P 分量的银膜的反射率 R_P 和相位跃变 φ_P 分别为

$$R_P = \frac{[n_0 N_z - (n_1^2 - k_1^2) \cos \theta_0]^2 + (n_0 K - 2n_1 k_1 \cos \theta_0)^2}{(n_0 N_z + (n_1^2 - k_1^2) \cos \theta_0)^2 + (n_0 K + 2n_1 k_1 \cos \theta_0)^2} \quad (12)$$

$$\varphi_P = \arctan \frac{2n_0 \cos \theta_0 [2n_1 k_1 N_z - K(n_1^2 - k_1^2)]}{n_0^2 (N_z^2 + K^2) - [(n_1^2 + k_1^2) \cos \theta_0]^2} \quad (13)$$

式中

$$N_z = \sqrt{\frac{n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0 + \sqrt{(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4n_1^2 k_1^2}}{2}} \quad (14)$$

$$K = \sqrt{\frac{-(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0) + \sqrt{(n_1^2 - k_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)^2 + 4n_1^2 k_1^2}}{2}} \quad (15)$$

银膜反射率 R_S, R_P 随角度变化,如图3。银膜对应不同入射角的相位跃变 φ_S, φ_P 如图4。光束在银膜间多次反射时,间隔层介质所产生的相邻两束相干光的相位差[7],可以用式(16)表示

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi h \sqrt{n_0^2 - n_3^2 \sin^2 \theta_3}}{\lambda_0} \quad (16)$$

当 θ_3 从 $0 \sim 90^\circ$ 变化时, S 分量和 P 分量相邻的两束干涉光的相位差分别为

$$\Phi_S = 2\varphi_S - \Delta\varphi \quad (17)$$

$$\Phi_P = 2\varphi_P - \Delta\varphi \quad (18)$$

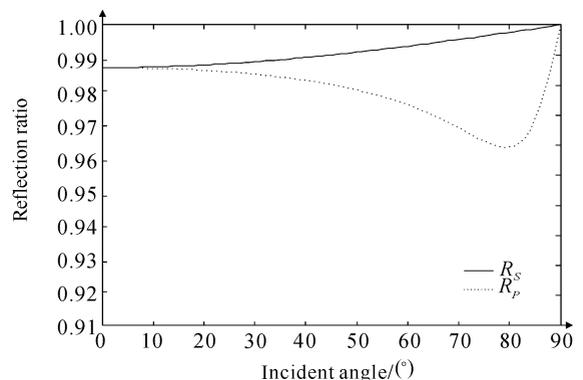


图3 银膜对应不同入射角的反射率

Fig.3 Reflection ratio of silver to different incident angle

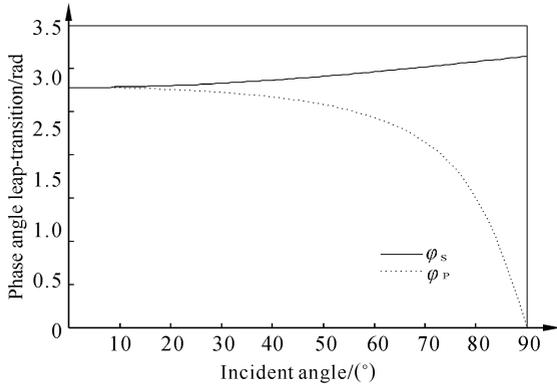


图4 银膜对应不同入射角的相位跃变

Fig. 4 Phase angle leap-transition to different incident angle

将式(6)、(11)、(13)、(16)分别代入公式(17)、(18)计算相位差 Φ_S 、 Φ_P 、如图5。

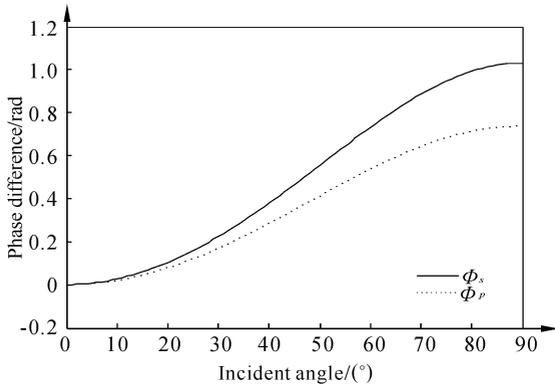
图5 不同入射角的相位差 Φ_S 、 Φ_P

Fig. 5 Phase difference to different incident angle

分量 S 的透射率 T_S 和 P 的透射率 T_P 分别为

$$T_S = \frac{(1-R_S)^2}{(1-R_S)^2 + 4R_S \sin^2 \frac{\Phi_S}{2}} \quad (19)$$

$$T_P = \frac{(1-R_P)^2}{(1-R_P)^2 + 4R_P \sin^2 \frac{\Phi_P}{2}} \quad (20)$$

由于中介质层、银膜、基片的吸收等因素影响^[10],实际的反射率 R_S 、 R_P 小于理论值,需要乘以系数 k ;实际的透射率 T_S 、 T_P 小于理论计算值,需要乘以综合衰减系数 τ 。通常可取 $k=0.95$, $\tau=0.9$,则滤光片的实际透射率 T'_S 、 T'_P 为

$$T'_S = \tau \frac{(1-kR_S)^2}{(1-kR_S)^2 + 4kR_S \sin^2 \frac{\Phi_S}{2}} \quad (21)$$

$$T'_P = \tau \frac{(1-kR_P)^2}{(1-kR_P)^2 + 4kR_P \sin^2 \frac{\Phi_P}{2}} \quad (22)$$

3 实验及数据分析

为验证透射率公式的有效性,进行了不同偏振方向,不同入射角的滤光片透射率实验,实验平台如图6。

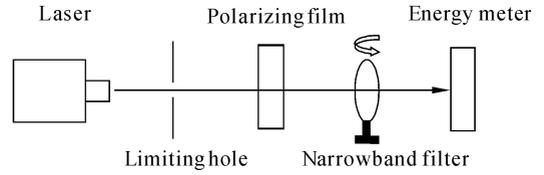


图6 滤光片透射率实验平台原理

Fig. 6 Schematic diagram of experimental platform

采用脉冲激光源,其发射单脉冲能量约为60 mJ;为保证激光入射到滤光片上的能量一致,在光路中添加直径为5 mm的限制圆孔,使通过激光光束的直径为5 mm,当滤光片在一定角度之内转动时,通过限制孔的激光将全部入射到滤光片上;偏振片用于产生不同偏振方向的激光;滤光片的中心波长为1.06 μm ,直径为25 mm;能量计采用相关公司的能量计,测量精度可达 μJ 量级。实验通过旋转滤光片,使激光入射时对应不同的入射角。调整偏振片的方向产生两个方向的偏振光:偏振方向垂直与入射面;偏振方向平行于入射面的激光。为减小激光器输出能量的不稳定的影响误差,以及激光光斑的非均匀性等因素造成的误差,每次测量均发射激光10次,取其平均值。

偏振方向垂直于入射面激光的初始能量为1852 μJ ,对应不同入射角,透过滤光片的探测能量为 Q_s ,实验数据如表1。

表1 滤光片透射率 T'_S 测量实验数据

| 入射角/(°) | 探测能量 $Q_s/\mu\text{J}$ | 透射率 T'_S |
|---------|------------------------|------------|
| -23 | 8.624 | 0.005 |
| -18 | 23.78 | 0.013 |
| -14 | 162.5 | 0.087 |
| -13 | 305.3 | 0.165 |
| -12 | 344.8 | 0.186 |
| -10 | 1232 | 0.666 |
| -6 | 1509 | 0.815 |
| -3 | 1500 | 0.810 |
| 2 | 1622 | 0.876 |
| 7 | 1463 | 0.791 |
| 12 | 449.7 | 0.243 |
| 22 | 15.62 | 0.008 |

偏振方向平行于入射面激光的初始能量为2064 μJ ,对应不同入射角,透过滤光片后探测能量为 Q_p ,实验数据如表2。

表2 滤光片透射率 T'_P 测量实验数据

| 入射角/(°) | 探测能量 $Q_s/\mu\text{J}$ | 透射率 T'_S |
|---------|------------------------|------------|
| -18 | 14.03 | 0.007 |
| -16 | 36.89 | 0.018 |
| -14 | 115.8 | 0.056 |
| -12 | 403 | 0.195 |
| -9 | 1625 | 0.787 |
| -6 | 1798 | 0.871 |

(续表)

| 入射角/ $^{\circ}$ | 探测能量 $Q_s/\mu\text{J}$ | 透射率 T'_s |
|-----------------|------------------------|------------|
| 0 | 1769 | 0.857 |
| 6 | 1833 | 0.888 |
| 10 | 1492 | 0.723 |
| 12 | 628.2 | 0.304 |
| 16 | 57.75 | 0.028 |
| 18 | 24.46 | 0.012 |

将 T'_s , T'_p 的实验数据与公式(21)、(22)计算的理论数据相比较如图 7。

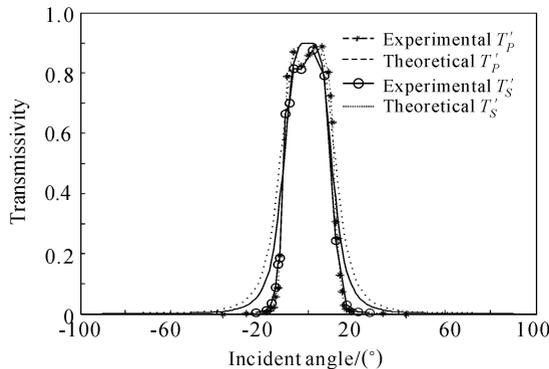


图 7 实验和理论值的对比

Fig. 7 Comparison of experimental data and theoretical data

从图中可知,对于 S 分量和 P 分量的透射率基本相同.实验数据与理论值变化趋势基本吻合,但是存在一定的误差:当入射角 $\theta' \leq 10^{\circ}$ 时,实验数据和理论值基本相等,但是存在一定的抖动误差;当入射角 $10^{\circ} < \theta' < 40^{\circ}$ 时,透射率急剧下降,理论值高于实验数据;当入射角 $\theta' \geq 40^{\circ}$ 时,理论值和实验数据都趋近于零.分析其造成数据抖动以及理论值高于实验数据原因如下:1)脉冲激光器发射的能量输出不稳定,以及激光光斑的非均匀性;2)滤光片金属薄膜的热效应^[11]以及光学稳定性影响^[12];3)随入射角度的增大,滤光片的首个反射面的反射率增大,部分激光被反射,进入滤光片的激光小于在滤光片前所探测到的激光初始能量.在使用实验数据计算透射率时,实际上分母被放大,导致实验透射率减小;4)随入射角的增大,激光在滤光片内的光程增大,介质对光的吸收比增大,吸收比应当是一个随角度变化的数值,而并非常量.

4 结论

通过建立滤光片不同入射角理论模型的分析 and 实验数据分析可得出如下结论:1)激光不同偏振方向对其透射率的影响很小;2)入射角在一定的范围之内时,具有较高的透射率,当入射角大于一定角度时,其透射率急速下降,甚至接近于 0.因此,在全向激光告警系统中,使用窄带滤光片时,需要对鱼眼光学镜头参量进行慎重考虑.尤其是激光入射角大时,

入射主光线经过鱼眼光学系统后,其出射主光线与滤光片法线所形成的入射角要控制在一定的角度范围之内,才能保证滤光片具有足够大的透射率,从而保证系统的探测灵敏度.

参考文献

- [1] PAN Hui, AI Yong, JIANG Hai-li. Application and analysis of sensors technologies based on laser threat warning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(2): 132-136. 潘慧, 艾勇, 蒋海丽. 激光威胁告警中传感器技术的应用与分析[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(2): 132-136.
- [2] GE Qiang-sheng, GONG Chi-ku. Research of vehicular laser passive reconnaissance warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(3): 249-251. 葛强胜, 龚亦坤. 车载激光侦察告警系统的研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(3): 249-251.
- [3] WANG Yong-zhong. Fish-eye lens optics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 42-46, 61-64. 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 42-46, 61-64.
- [4] MAO Deng-sen, ZHANG Ji-long. The application of tenuity laser radiation detecting technology in the laser warning devices [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(4): 374-377. 毛登森, 张记龙. 微弱激光辐射探测技术在激光告警设备中的应用[J]. *测试技术学报*, 2004, **18**(4): 374-377.
- [5] GU Pei-fu, YANG Yu-min, CHEN Hai-xing *et al.* Interference filters with multiple transmittance peaks used for wavelength division multiplexing systems [J]. *Acta photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 838-839. 顾培夫, 杨毓铭, 陈海星, 等. 用于波分复用系统的多峰干涉滤光片[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 838-839.
- [6] MACLEOD H A. Thin-film optical filters[M]. ZHOU Jiu-lin, YIN Shu-bai, transl. Beijing: National Defense Industry Press, [M]. 1976: 270-280. 麦克劳德 H A. 光学薄膜技术[M]. 周九林, 尹树百译. 北京: 国防工业出版社, 1976: 270-280.
- [7] FAN Shao-qing, GUO Fu-qiang. Physics optics [M]. Beijing: Beijing Science and Technology University Press, 1990: 71-81. 范少卿, 郭富强. 物理光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 71-81.
- [8] LIN Yong-chang, LU Wei-qiang. Optical thin-film theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 63-65, 289-293. 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 63-65, 289-293.
- [9] TAN Jin-fa, ZHANG Quan. Application thin-film optics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984: 248-250, 349-350. 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 248-250, 349-350.
- [10] GU Zheng-tian, LIANG Pei-hui, LIU Xiao-lin, *et al.* Influence of glass surface layers on measurement of optical parameters of thin films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999,

- 28(5): 467-472.
- 顾铮先, 梁培辉, 刘晓林, 等. 玻璃表面对薄膜光学参量测量的影响[J]. 光子学报, 1999, 28(5): 467-472.
- [11] ZHAO Gang, HAO Qiu-long, QI Wen-zong, *et al.* Thermal behavior of thin metal films irradiated by ultra-short pulse laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36 (1): 9-12.
- 赵刚, 郝秋龙, 齐文宗, 等. 超短脉冲激光辐照下金属薄膜的热行为[J]. 光子学报, 2007, 36 (1): 9-12.
- [12] BAI Sheng-yuan, GU Pei-fu, LIU Xu, *et al.* Optical stability of thin film filters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 576-581.
- 白胜元, 顾培夫, 刘旭, 等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. 光子学报, 2001, 30(5): 576-581.

Transmissivity for Narrowband Filter in Omni-directional Laser Warning System

YING Jia-ju, WANG Yong-zhong, HE Yong-qiang, ZHOU BING, ZHOU Zhongliang
(*Institute of Optoelectronic Technology, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

Abstract: Based on analyzing the structure of omni-directional laser warning system, the contradiction between wide field of view and the narrow-band spectrum filter is expounded. The Fabry-Perot model is set up. And the transmissivity of the filter vary to different incident angle is analyzed from the factors such as reflectivity of the reflective coating, phase jump and optical path difference. The relationship formula of incident angle and the transmissivity is given out, and its validity is verified by experiment.

Key words: Omni-directional laser warning; Wide field of view; Narrow-band spectrum filter; Transmissivity



YING Jia-ju is currently working as a Ph. D. degree candidate at Institute of Optoelectronic Technology, Ordnance Engineering College. His research interests focus on of laser detecting and optoelectronic countermeasure.