

doi:10.3788/gzxb20184711.1114001

激光斜入射窄带滤光片的热力效应

任晓东¹,雷武虎¹,曾凌清²,王勇¹

(1 国防科技大学 电子对抗学院,合肥 230037)

(2 32026 部队,乌鲁木齐 841700)

摘要:基于麦克斯韦方程组及热力学理论,分析了脉冲强激光在不同入射角、不同偏振态下辐照 10.6 μm 窄带滤光片的热力效应,研究了不同入射角及偏振态下的温度场、应力场,计算了激光辐照下热力效应给窄带滤光片带来的通带漂移效应,比较讨论了不同入射角下的损伤阈值.结果表明:随着入射角度的增大,温升峰值的幅值与位置都有了较大的变化;P 偏振光与 S 偏振光辐照引起的温升峰值都随着入射角度的增大逐渐下降;温升峰值的位置随着入射角的增大逐渐靠近滤光片与空气的界面;P 偏振光与 S 偏振光引起的热力效应差异性越来越明显.在激光能量相同的情况下对比了不同激光入射角下的通带漂移特性,小角度入射时滤光片中心波长偏移超过 200 nm,10.6 μm 处透射率下降到 6%以下.随着入射角的增大,滤光片熔融损伤阈值越来越大,而且在小角度入射时,P 偏振光与 S 偏振光熔融损伤的阈值差别很小;当入射角大于 30°时,P 偏振光与 S 偏振光的熔融损伤阈值差别越来越大,以较小的功率实现激光对窄带滤光片的损伤需要考虑激光的入射角及偏振态.

关键词:激光;滤光片;斜入射;热力效应;偏振

中图分类号:O484.2; O484.8

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1114001-11

Thermal and Mechanical Effect of the Narrow Band Filter Irradiated by Laser at Oblique Incidence

REN Xiao-dong¹, LEI Wu-hu¹, ZENG Ling-qing², WANG Yong¹

(1 School of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

(2 The Troops of 32026, Urumqi 841700, China)

Abstract: Based on the Maxwell equations and the thermodynamics theory, the thermal and mechanical effects of the 10.6 μm narrow band filter are analysed under the irradiation of the pulse laser at different incident angles and different polarizations. The temperature field and the stress field are studied at different incident angles and polarizations. The drift effect of the narrow band filter caused by the thermal and mechanical effects are calculated. The damage thresholds under different incident angles of the laser are compared and discussed. The results show that with the increase of incident angle, the amplitude and position coordinates of the peak temperature rise change greatly. The peak value of the temperature rise induced by the P and S polarized light irradiation decrease gradually with the increasing incident angles. The position coordinates of the peak temperature rise gradually close to the interface of the filter and air along with the change of incident angle. The difference of the the thermal and mechanical effects between P and S polarized light irradiation becomes more and more obvious. The passband drift characteristics under different laser incident angles with the same laser energy are compared. When the incident angle is small, the central wavelength deviation of the filter reaches over 200 nm, and the transmittance of 10.6 μm decreases to less than 6%. With the increase of incident angle, the melting damage threshold of

基金项目:国家自然科学基金(No. 6167154)和脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(No. SKL2017ZR02)资助

第一作者:任晓东(1991-),男,博士研究生,主要研究方向为激光辐照效应. Email: rxd116man@163.com

导师(通讯作者):雷武虎(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为空间光电技术. Email: leiwhy@163.com

收稿日期:2018-07-05;录用日期:2018-08-24

the filter gets bigger and bigger. The difference of melting damage threshold between P and S polarized light is very small when the angle of incidence small. When the incident angle is greater than 30° , the melting damage threshold difference between P and S polarized light becomes larger and larger. The incident angle and polarization state of the laser should be considered in order to realize the laser damage to the narrow band filter with a small power.

Key words: Laser; Filter; Oblique incidence; Thermal and mechanical effects; Polarization

OCIS Codes: 140.3330; 310.5448; 350.1820

0 引言

卫星空间探测系统在信息获取与分析中使用了大量窄带干涉滤光片,滤光片的主要作用是通过对光谱的过滤与分割来给探测器提供所需敏感波段信息.窄带干涉滤光片在强激光辐照下会发生光谱漂移现象,降低滤光片的性能,严重情况下会导致滤光片膜层的熔融、气化等,使滤光片性能完全消失.因此,在探测器良好的情况下可以通过使用激光武器损伤滤光片的方式实现干扰、破坏光电系统的目的,这在激光致盲武器以及星载探测器抗激光性能研究中有重要的参考价值^[1].针对特定波段的窄带滤光片在设计之初通常考虑的是垂直入射情况,此时入射面具有任意性,因此没有 S 偏振光和 P 偏振光可言.然而,在实际情况下或者进行非协作式激光对抗时入射光线往往难以保证垂直入射,同时,在斜入射情况下, S 偏振光和 P 偏振光不同偏振态会影响薄膜的一些光学特性,从而使斜入射激光损伤情况区别于垂直入射情况^[2].激光对滤光片的损伤机理相关研究中^[3,4],大部分学者主要针对垂直入射的情况,关于斜入射及偏振态对损伤效应影响的研究还较少,因此有必要研究激光斜入射损伤机理.贺敏波^[2]通过数值分析的方法研究了激光斜入射薄膜时的电磁场分布以及不同偏振态、不同入射角的光学效应,但是并没有分析激光斜入射窄带滤光片的热力效应.王颖^[5]研究了高反射膜热效应随入射角和偏振态的变化,但是并没有分析热效应给膜系结构性能带来的影响.赵元安^[1]研究了激光辐照窄带滤光片带来的通带漂移效应,但是并没有考虑斜入射所带来的变化.本文采用数值方法分析了激光斜入射情况下薄膜元件损伤特性.从麦克斯韦方程组及热力学理论出发,以 $10.6 \mu\text{m}$ 窄带滤光片为例分析了纳秒级脉冲强激光在不同入射角、不同偏振态下辐照窄带滤光片的热力效应,计算了热力效应给窄带滤光片带来的通带漂移以及中心波长透射率的变化,比较讨论了不同入射角下的损伤阈值.

1 激光斜入射电磁场理论

激光是一种电磁波,遵循麦克斯韦方程组,激光各种形式的偏振态都可以用对应的线偏振态来表征.本文主要分析线偏振光斜入射电磁场理论.设入射光为线偏振光,入射面为 $yo z$ 坐标平面,激光从空气中沿 θ 方向入射,定义正入射时入射角 $\theta=0$,光矢量表示为

$$\mathbf{k} = \mathbf{y}k_0 \sin\theta + \mathbf{z}k_0 \cos\theta \quad (1)$$

式中, $k_0 = \omega \sqrt{\xi_0 \mu_0}$, ω 为激光圆频率, ξ_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率.建立滤光片多层膜的二维模型,如图 1,线偏振光的振动方位角为 α ,振动方位角即电矢量振动方向与入射平面之间的夹角,因此可以将线偏振光电矢量 \mathbf{E} 分解为平行于入射平面的 P 偏振分量 \mathbf{E}_P 和垂直于入射平面的 S 偏振分量 \mathbf{E}_S ,通过调整 α 角可以改变两个分量的比例,二者之间的大小关系可以表示为

$$\tan \alpha = |\mathbf{E}_S| / |\mathbf{E}_P| \quad (2)$$

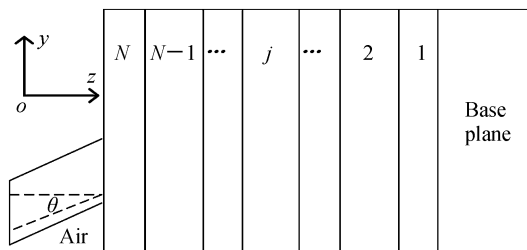


图 1 脉冲激光辐照多层膜模型

Fig.1 Model of optical multilayer thin films irradiated by pulsed laser

1.1 滤光片内电场矢量求解

根据电磁场理论,分别求解 S 偏振光和 P 偏振光在滤光片膜层内的电场分布,对于 S 偏振分量, \mathbf{E}_S 振动方向垂直于入射平面,则其只有 x 坐标分量不为零.因此可以表示为 $\mathbf{E}_S = (E_x, 0, 0)$.激光也是电磁波的一种,将 \mathbf{E}_S 带入麦克斯韦方程组^[6]

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \tilde{n}^2 \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{H} = \frac{i}{\omega\mu} \nabla \times \mathbf{E} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\tilde{n} = n + ik$ 为介质材料的复折射率, μ 为介质中的磁导率.可以得到

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k_0^2 \tilde{n}^2 E_x = 0 \\ H_x = 0 \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu H_z \end{cases} \quad (4)$$

求解式(4)可以得到 S 偏振光在薄膜材料中的电场为

$$E_S(y, z) = E_x(y, z) = A_{1m} [\exp(-ik_0 \tilde{n} z \cos\theta) + A_{2m} \exp(ik_0 \tilde{n} z \cos\theta)] \exp(-ik_0 \tilde{n} y \cos\theta) \quad (5)$$

式中, A_{1m} 和 A_{2m} 为第 m 层膜的常系数,对于不同膜层 m ,其系数不同,可以根据电磁场连续性边界条件求得各层对应常系数^[2,5].

同理,在斜入射时,对于 P 偏振光,电矢量 \mathbf{E}_P 在 y, z 坐标轴都有分量不方便进行求解计算,但是 P 偏振光的磁矢量垂直于 $yo z$ 坐标平面,只有 x 方向有分量不为零.即 $H_P = (H_x, 0, 0)$,代入另一种形式的麦克斯韦方程组^[4]

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{H} + k_0^2 \tilde{n}^2 \mathbf{H} = 0 \\ \mathbf{E} = \frac{i}{\omega\mu} \nabla \times \mathbf{H} \end{cases} \quad (5)$$

可以得到沿 y 轴和沿 z 轴振动的电矢量大小为

$$\begin{cases} E_y(y, z) = -B_{1m} \cos\theta [\exp(-ik_0 \tilde{n} z \cos\theta) - B_{2m} \exp(ik_0 \tilde{n} z \cos\theta)] \exp(-ik_0 \tilde{n} y \sin\theta) \\ E_z(y, z) = B_{1m} \sin\theta [\exp(-ik_0 \tilde{n} z \cos\theta) + B_{2m} \exp(ik_0 \tilde{n} z \cos\theta)] \exp(-ik_0 \tilde{n} y \sin\theta) \end{cases} \quad (6)$$

则 P 偏振光在薄膜中传播的电矢量大小表示为

$$E_P(y, z) = \sqrt{E_y^2(y, z) + E_z^2(y, z)} = B_{1m} \exp(-ik_0 \tilde{n} y \cos\theta) \cdot \sqrt{\exp(-2ik_0 \tilde{n} z \cos\theta) + B_{2m}^2 \exp(2ik_0 \tilde{n} z \cos\theta) - 2B_{2m} \cos\theta} \quad (7)$$

式中, B_{1m} 和 B_{2m} 为第 m 层膜的常系数,对于不同膜层 m 其系数不同,可以根据电磁场连续性边界条件求得各层系数^[2,5].

1.2 滤光片平均电磁能流密度

求解滤光片膜系内部平均电磁能流密度^[6](光强)的公式为

$$\bar{S} = \frac{1}{T} \int_0^T |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| dt = \frac{1}{T} \int_0^T EH dt = \frac{1}{2} E_0 H_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E_0^2 \quad (8)$$

由于在光频段,介质分子磁化机构几乎冻结,磁导率 $\mu \approx 1$,折射率 $n \approx \sqrt{\epsilon}$,所以平均能流密度可表示为

$$\bar{S} = \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 \propto n E_0^2 \quad (9)$$

对应于 P 偏振光和 S 偏振光有

$$\bar{S}_P = \frac{1}{2} n_i \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |E_P(y, z)|^2 \propto n_i |E_P(y, z)|^2 \quad (10)$$

$$\bar{S}_S = \frac{1}{2} n_i \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |E_S(y, z)|^2 \propto n_i |E_S(y, z)|^2 \quad (11)$$

式中, n_i 表示第 i 层膜的折射率, 分别令 P 偏振光和 S 偏振光入射电场矢量模值为 1, 容易得到不同入射角下 P 偏振光和 S 偏振光归一化驻波场分布 $Y_P(z)$ 和 $Y_S(z)$.

2 温度场理论分析

研究激光辐照材料产生的温度场是开展激光与材料相互作用失效机理和破坏效应的基础性工作, 纳秒和毫秒激光的损伤都可以用热传导模型进行解释, 已有相关研究证明了其适用性^[7,8]. 激光与滤光片各膜层材料热耦合过程中, 各膜层吸收激光能量转化为热使膜层温度上升, 并通过热传导在膜层间扩散热量形成温度场, 从而改变材料的性质和结构, 甚至导致材料功能失效. 滤光片的驻波场分布及膜层的吸收系数对温度场有非常重要的影响, 三维直角坐标系下, 热传导偏微分方程的一般形式为^[9,10]

$$C_i \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = g(x, y, z, t) \quad (12)$$

式中, C_i 为第 i 层膜的比热, K_i 为第 i 层的热导率, $g(x, y, z, t)$ 为膜层任一点处单位时间单位体积内激光沉积能量, 表示为

$$g(x, y, z, t) = d[I(x, y, t, \theta)Y(z)]/dz \quad (13)$$

式中, $Y(z)$ 为归一化平均能流密度. 边界条件为

$$(\partial/\partial z)T(x, y, z=0, t) = \gamma T(x, y, z=0, t) \quad (14)$$

$$T(x, y, z=\infty, t) = T(x=\infty, y, z, t) = T(x, y=\infty, z, t) = 77 \text{ K} \quad (15)$$

$$T(x, y, z, t=0) = 77 \text{ K} \quad (16)$$

式中, γ 为表面热交换系数, $I(x, y, t, \theta)$ 为激光的能量分布, θ 为激光斜入射时的入射角. 在激光损伤光学材料研究中, 已知激光总功率和激光辐照在元件上的光斑大小, 然后用功率除以光斑面积, 就可以得到激光辐照元件上的功率密度^[11]. 设激光束为高斯光束, 在直角坐标系下, 垂直入射时可表示为

$$I_{\perp}(x, y, t) = \frac{p_0(t)}{\pi\omega_0^2} \exp\left(-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega_0^2}\right) \quad (17)$$

式中, $p_0(t)$ 为激光器的瞬时功率, 脉冲激光辐照时 $p_0(t)$ 在脉冲宽度内为常数表示恒定功率, ω_0 为光斑半径. 当激光斜入射到薄膜上时, 激光束在薄膜的截面为椭圆形. 椭圆的半短轴为 ω_0 , 半长轴为 $\omega_0/\cos\theta$, 相应的激光束标准高斯分布将转化为椭圆形的高斯分布, 光束在 x 方向上的光束半径为 $r_x = \omega_0$, 在 y 方向的光束半径为 $r_y = \omega_0/\cos\theta$, 从而得到激光束能量分布的表达式为^[12]

$$I(x, y, t, \theta) = \frac{p_0(t)}{\pi\omega_0 \cdot (\omega_0/\cos\theta)} \exp\left\{-2\left[\frac{x^2}{\omega_0^2} + \frac{y^2}{(\omega_0/\cos\theta)^2}\right]\right\} = \frac{p_0(t)\cos\theta}{\pi\omega_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2+y^2\cos^2\theta)}{\omega_0^2}\right] \quad (18)$$

在分析温度场时吸收系数是一个重要参数, 在理想情况下, 滤光片膜系材料对激光的吸收属于本征吸收或晶格振动吸收, 滤光片各膜层内部吸收系数可由复折射率的虚部对应的消光系数来表征^[13], 关系为 $\alpha = 4\pi k/\lambda$, 其中 k 为消光系数, λ 为自由空间中激光波长. 但是在光学薄膜的制备过程中, 杂质、空隙填充物或晶格缺陷等会大大增加薄膜对激光的吸收, 由于薄膜高速生长的不平衡性以及界面附近材料的相互渗透, 给界面区域带来极高的晶格缺陷密度; 同时, 在薄膜的储藏使用过程中, 薄膜表面吸收空气中的大量水分和杂质, 水分向膜层纵深渗透, 充满各个界面处的微观空隙. 以上各种因素使得界面处的吸收远远高于临近的介质膜层的吸收^[14], 膜层界面的强吸收特性对激光辐照滤光片的温度场分布以及应力分布有重要的影响.

3 热应力理论分析

介质内的温度场确定之后, 由于相邻膜层的材料参数各不相同, 各个膜层的形变量与热应力都不同, 在三维直角坐标系中, 与热传导方程耦合的热弹性平衡方程^[15]为

$$\nabla^2 u_x + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

$$\nabla^2 u_y + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

$$\nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (21)$$

式中, u_x 、 u_y 、 u_z 分别表示 x 、 y 、 z 三个方向的位移分量, μ 表示泊松比, β 表示热膨胀系数, 则 x 、 y 、 z 三个方向的应力大小为

$$\sigma_x = C_{11}\epsilon_x + C_{12}\epsilon_y + C_{12}\epsilon_z \quad (22)$$

$$\sigma_y = C_{12}\epsilon_x + C_{11}\epsilon_y + C_{12}\epsilon_z \quad (23)$$

$$\sigma_z = C_{12}\epsilon_x + C_{12}\epsilon_y + C_{11}\epsilon_z \quad (24)$$

式中, C_{11} 、 C_{12} 为刚度矩阵 C 的分量, 可通过杨氏模量求解得到. 光学薄膜元件为三维实体结构, 在后续处理时可选择 von Mises 等效应力来表征薄膜元件的受力情况^[16].

4 滤光片中心波长的温度漂移特性

激光辐照滤光片产生的热力效应会改变滤光片各膜层的光学厚度, 而窄带滤波片对光学厚度非常敏感, 各膜层光学厚度的微小变化都会引起滤光片光学性能的改变, 严重时可使滤光片通带偏离目标波段, 从而使得在目标波段的透射率大大降低. 膜层光学厚度的变化表示为

$$\Delta(nl) = n\Delta l + l\Delta n \quad (25)$$

则光学厚度的相对变化量可表示为

$$\Delta(nl)/nl = (1/l \cdot \partial l/\partial T)\Delta T + (1/n \cdot \partial n/\partial T)\Delta T \quad (26)$$

式中, $\frac{\partial l}{\partial T}$ 表示热膨胀系数, $\frac{\partial n}{\partial T}$ 表示折射率温度梯度. 由于各膜层的折射率温度系数是引起温度漂移的最重要因素^[17], 且滤光片膜层折射率温度梯度比热膨胀系数约大一个数量级^[1], 因此分析温升对滤光片光学性能影响时主要考虑折射率温度梯度带来的影响.

5 结果及分析

以 $10.6 \mu\text{m}$ 窄带滤光片^[18-20] 为例进行研究, 所用膜系结构为 $\text{Air} | (\text{LH})^4 (\text{HL})^5 \text{H} (\text{HL})^3 | \text{Ge}$, 其中 H 为四分之一光学厚度的锗(Ge)材料, 在 $10.6 \mu\text{m}$ 下折射率为 $n_{\text{Ge}} = 4$, L 为四分之一光学厚度的硫化锌(ZnS)材料, 折射率 $n_{\text{ZnS}} = 2.2$, 入射介质为空气, 基底材料为 Ge. 数值分析用到的光热参数^[5,21] 见表 1.

表 1 ZnS 与 Ge 热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of ZnS and Ge

Material	ZnS	Ge
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4 080	5 490
Specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K})$	470.6	310
Thermal conductivity $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	19	59
Thermal expansion coefficient β / K^{-1}	7.85×10^{-6}	6.1×10^{-6}
Poisson ratio μ	0.29	0.34
Young modulus E / GPa	74.5	102
Refractive index n	2.2	4
Absorption coefficient α / m^{-1}	47.39	2
Melting temperature T_m / K	1 830	1 210

5.1 驻波场分布

根据膜系结构 $\text{Air} | (\text{LH})^4 (\text{HL})^5 \text{H} (\text{HL})^3 | \text{Ge}$, 分别计算 $10.6 \mu\text{m}$ 激光在入射角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时 P 偏振光及 S 偏振光的归一化驻波场分布. 如图 2, 横坐标表示滤光片内沿垂直于薄膜表面方向的膜层与表面的距离, 纵坐标表示归一化电场强度. 可以看出, 垂直入射时 P 偏振光与 S 偏振光驻波场一致, 有明显的两个峰值, 最大峰值约为 23.5, 峰值位置在滤光片内部, 驻波场大小沿峰值两侧迅速减小. 随着入射角的增大, 驻波场最大峰值逐渐减小, 不同偏振态、入射角下驻波场峰值分别为 14.85(P 光, 15°)、15.2(S 光, 15°)、5.99(P 光, 30°)、6.1(S 光, 30°)、1.88(P 光, 45°)、3.66(S 光, 45°)、1.0(P 光, 60°)、3.85(S 光, 60°), 从曲线图容易看出峰值出现位置逐渐向滤光片表面移动, 在入射角为 45° 、 60° 时驻波场峰值已经位于滤光片膜层表面, 同时可以看出, P 偏振光与 S 偏振光的驻波场差异越来越明显. 从式(13)可以推断, 驻波场随入射角及偏振态的变化将给激光辐照滤光片引起的热力效应带来很大影响.

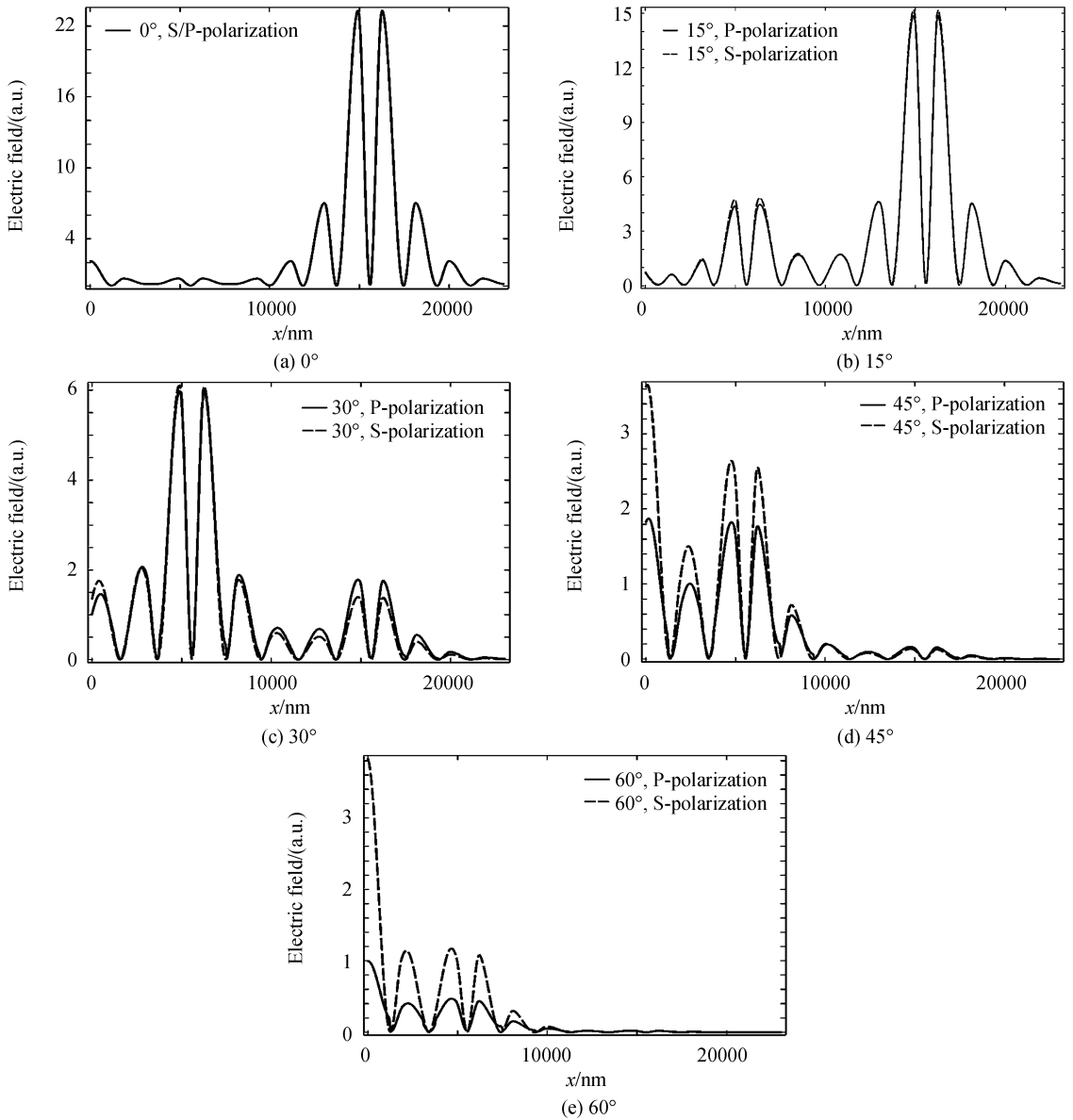


图2 不同角度入射下窄带滤光片驻波场分布

Fig.2 Electricity distribution in narrow band filter at different incident angel

5.2 温度场分布

设定激光波长 $10.6 \mu\text{m}$, 脉宽 10 ns , 垂直入射时激光辐照在滤光片上光斑直径为 1 mm , 激光出射能量 141.25 mJ , 进行 P 偏振光与 S 偏振光的激光辐照热力效应仿真, 设定两者除了偏振态不一致外其余参数均相同. 分别在入射角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时进行激光辐照的热力效应仿真.

图 3(a) 显示了垂直入射时在脉冲结束时刻 (10 ns) 激光辐照中心位置沿垂直于膜层方向的温升曲线, 可以看出 P 偏振光与 S 偏振光在激光参数一致的情况下引起的温升完全一致. 这是因为垂直入射时 P 偏振光与 S 偏振光驻波场完全一致, 从而进行数值求解时求解公式也一致. 同时注意到温度场沿垂直于膜层方向的曲线图与驻波场强度分布相似, 这是因为驻波场越强, 薄膜吸收光能产生的热量沉积就越多, 从而温升越高, 这也可以从式 (13) 得到验证. 图 3(b) 显示了单脉冲时间内温度场随时间的变化, 可以看出随着辐照时间的增加, 温度逐渐升高, 且温升曲线与驻波场曲线形状始终比较相似, 说明驻波场分布对滤光片的温度场具有非常重要的影响. 这与赵强^[14]、王颖^[5]的研究结果相符. 并且可以得到 $t = 9.8 \text{ ns}$ 时在位置 $x = 1480 \text{ nm}$ 处温度达到 1830 K , 同时超过了 Ge 和 ZnS 的熔点, 滤光片必然发生熔融损伤.

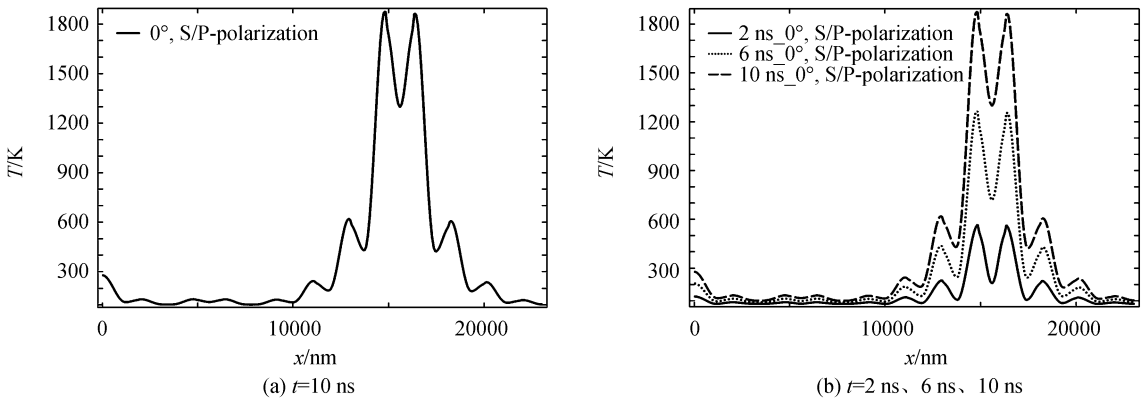


图3 0°入射窄带滤光片温度场分布
Fig.3 Temperature distribution in narrow band filter irradiated at 0°

从图 3(a)中可以得到垂直入射时温度峰值为 1 888 K(P/S 光).图 4(a)~(d)分别分析了 P 偏振光与 S 偏振光在不同入射角(15°、30°、45°、60°)下引起的温度场分布.入射角为 15°时温度峰值为 1 262 K(S 光)、1 242 K(P 光),入射角为 30°时温度峰值为 588 K(S 光)、581 K(P 光),入射角为 45°时温度峰值为 442 K(S 光)、270 K(P 光)、入射角为 60°时温度峰值为 436 K(S 光)、176 K(P 光).不同入射角下峰值温度出现的位置分别为 $x=14\ 843\ \text{nm}$ (P/S,0°)、 $x=14\ 751\ \text{nm}$ (P/S,15°)、 $x=4\ 752\ \text{nm}$ (P/S,30°)、 $x=0\ \text{nm}$ (P/S,45°)、 $x=0\ \text{nm}$ (P/S,60°).对比图中曲线及数据可以发现,随着入射角的增大 P 光及 S 光引起的温升峰值都迅速减小,S 光引起的温度峰值大于 P 光引起的温度峰值,P 偏振光与 S 偏振光辐照引起的温升效应之间的差别也越来越大,相同入射角下 P 光与 S 光引起的温度峰值出现位置相一致,而且温升峰值出现在膜层的位置逐渐靠近空气与滤光片的交界面.因此,激光在斜入射时,尤其是在大角度入射时须考虑入射角以及偏振态带来的影响.

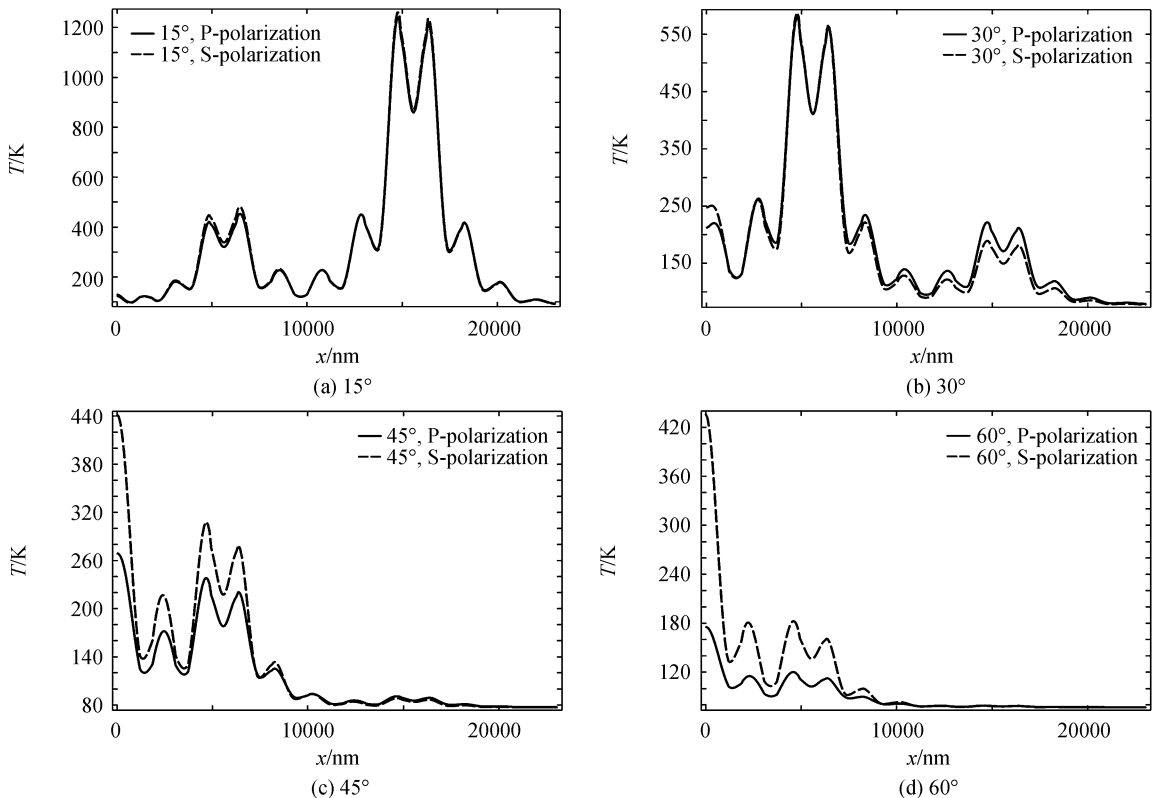


图4 不同角度入射窄带滤光片温度场分布
Fig.4 Temperature distribution in narrow band filter irradiated at different incident angle

5.3 应力场分布

激光辐照使滤光片各膜层间产生温度梯度,从而产生热应力,可以通过分析激光辐照中心位置垂直滤光片方向的 von Mises 等效应力来判断滤光片是否发生应力损伤^[16].介质薄膜的应力阈值约为 100 MPa^[16].图 5(a)显示了垂直入射时,在脉冲结束时刻(10 ns)滤光片中心位置沿垂直于膜层的方向的等效应力曲线,峰值达到 110 MPa,超过了应力损伤阈值.由于垂直入射时 P 偏振光与 S 偏振光引起的温度场一致,所以二者 von Mises 等效应力完全一致.在脉冲时间内应力值同样随着辐照时间的增加而增加,为了比较滤光片应力损伤和熔融损伤的先后顺序,绘制了 $t=9.2$ ns 时的等效应力图,如图 5(b),此时峰值应力为 100 MPa,说明刚发生应力损伤,而滤光片达到熔融损伤的时间为 9.8 ns.因此单脉冲垂直入射时应力损伤可能先于熔融损伤.

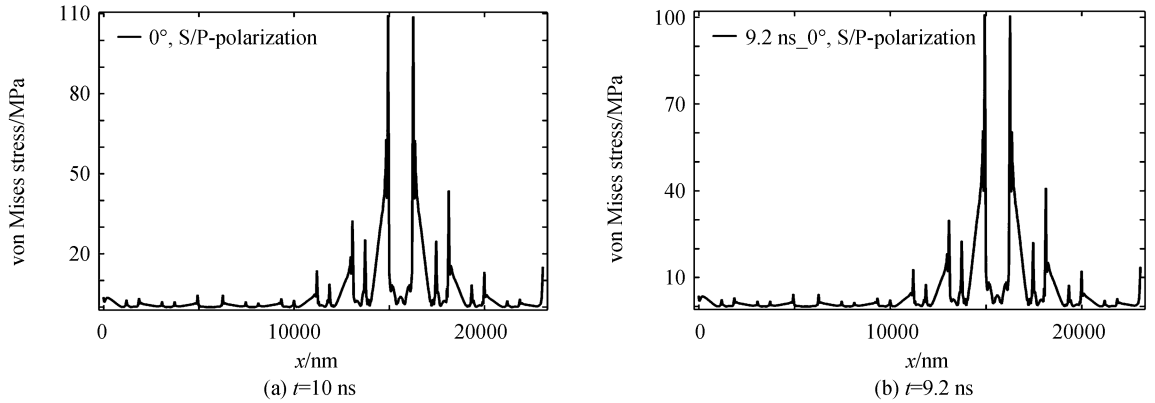


图 5 0° 入射窄带滤光片应力场分布

Fig.5 Stress distribution in narrow band filter irradiated at 0°

图 6(a)~(d)分别分析了 P 偏振光与 S 偏振光在不同入射角(15° 、 30° 、 45° 、 60°)下的应力场.从图中可以得到不同入射角、不同偏振态下的应力峰值分别为 70 MPa(15° , P光)、71 MPa(15° , S光)、41 MPa(30° , P

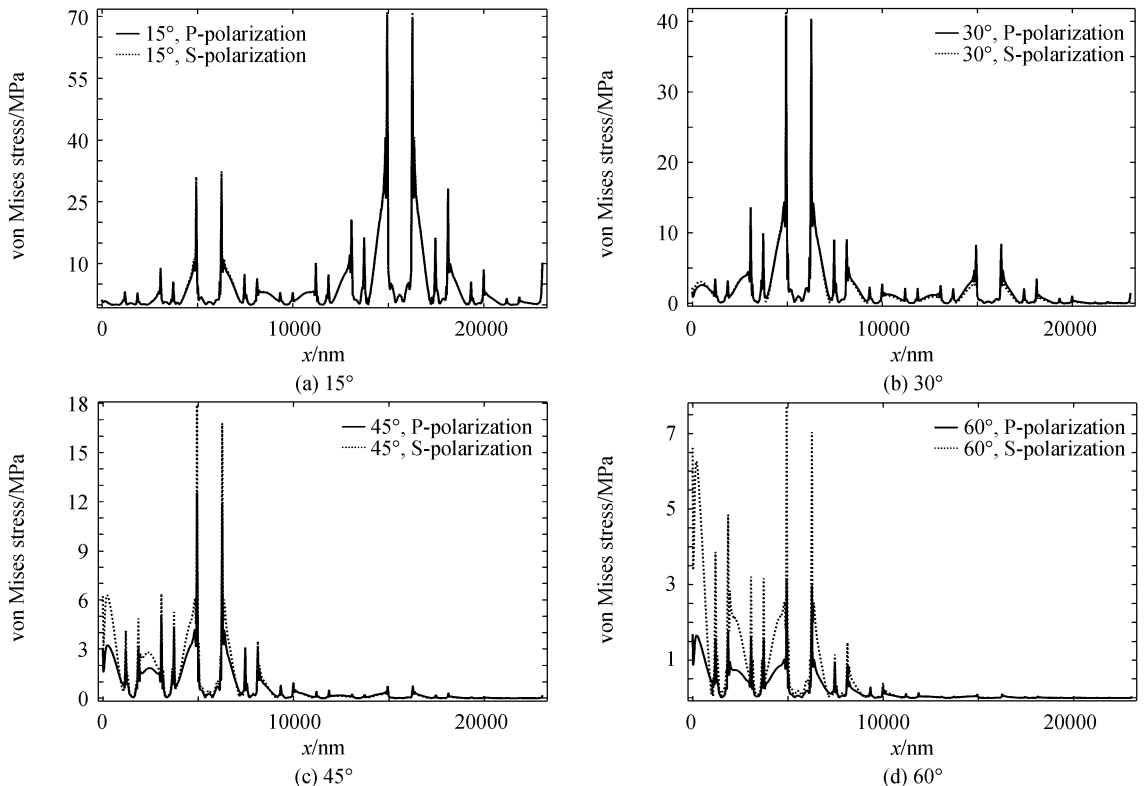


图 6 不同角度入射窄带滤光片应力场分布

Fig.6 Stress distribution in narrow band filter irradiated at different incident angel

光)、41.5 MPa(30°,S光)、12.5 MPa(45°,P光)、18 MPa(45°,S光)、3.2 MPa(60°,P光)、7.8 MPa(660°,S光).对比发现,相同偏振态下随着入射角的增大应力峰值迅速减小而且低于应力损伤阈值;相同入射角下S光辐照引起的应力峰值大于P光辐照引起的应力,且随着入射角的增大二者差异性越来越大,当入射角小于30°时P偏振光与S偏振光辐照引起的应力场几乎重合,当入射角大于30°时P偏振光与S偏振光辐照引起的应力场之间的差别越来越大.同时注意到应力峰值所在膜层逐渐靠近滤光片的界面,这与温度场分布大体一致.因此,分析激光斜入射应力损伤时应考虑偏振态带来的影响.

5.4 激光辐照对中心波长漂移及透射率的影响

滤光片在正常使用时通常用于接收垂直入射的光信息,称之为合作光.在进行激光损伤时,激光属于非合作光.有必要分析激光辐照引起的热力效应对滤光片光学性能的影响,此处通过分析滤光片中心波长漂移量及滤光片在10.6 μm的透过率来分析激光辐照对滤光片的影响.

所用低折射率材料ZnS的热膨胀系数为 $7.85 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,而折射率温度梯度为 $4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,高折射率材料Ge的热膨胀系数为 $6.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,折射率温度梯度为 $2.45 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.可见折射率温度梯度比热膨胀系数约大一个数量级,因此,分析温升对滤光片光学性能的影响主要考虑折射率温度梯度带来的影响^[1].根据式(26),计算滤光片每一层光学厚度的变化量,从而得到热力效应下的滤光片模型,通过薄膜设计软件TFCalc可以计算得到滤光片中心波长的偏移量及在10.6 μm处的透过率,结果见表2.

表2 激光辐照对中心波长漂移及透射率的影响

Table 2 Effect of laser irradiation on central wavelength shift and transmittance

Incident angle and polarization state	Central wavelength/nm	Center wavelength offset /nm	Transmittance at 10.6 μm
0°,P/S-polarization	10 930	330	1.81%
15°,P-polarization	10 820	220	5.5%
15°,S-polarization	10 830	230	3.9%
30°,P-polarization	10 610	10	79.06%
30°,S-polarization	10 610	10	83.83%
45°,P-polarization	10 600	0	78.731%
45°,S-polarization	10 590	10	78.73%
60°,P-polarization	10 600	0	78.2%
60°,S-polarization	10 600	0	78.18%

从表中可以看出,在激光辐照热力效应作用下,在小角度入射时(0°、15°)中心波长偏移量超过了200 nm,10.6 μm处的透过率低于6%,虽然在入射角15°情况下并没有达到熔融或应力损伤,但此时滤光片已不能正常接收10.6 μm处的光信息,滤光片性能失效.在入射角超过30°后,中心波长的偏移量在10 nm左右,在10.6 μm处的透过率超过78%,滤光片仍能正常工作,可见无论P偏振光还是S偏振光都没有达到作用效果,滤光片对10.6 μm光信息的接收并没有影响.因此,在输出能量一定的情况下需要尽量保证小角度入射才有可能达到损伤效果;同时,要想在大角度入射的情况下达到损伤效果就必须增大激光输出能量.为此进一步研究了在不同入射角下的熔融损伤阈值.

5.5 不同入射角度下的熔融损伤阈值

随着激光入射角的变化,温升峰值的位置在逐渐改变,有可能出现在H(Ge,熔点1 210 K)层、也有可能出现在L(ZnS,熔点1 830 K)层,因此为了确保损伤,认为激光辐照温度达到二者较高熔点1 830 K时滤光片损伤.分别计算了在不同入射角下P偏振光及S偏振光辐照滤光片的熔融损伤阈值.如图7,可以看出,随着入射角的增大,滤光片的损伤阈值逐渐增大,而且阈值增加幅度越来越大.因此,在进行损伤时应尽量垂直入射或小角度入射,在大角度入射时必须考虑入射角度和损伤阈值的关系,

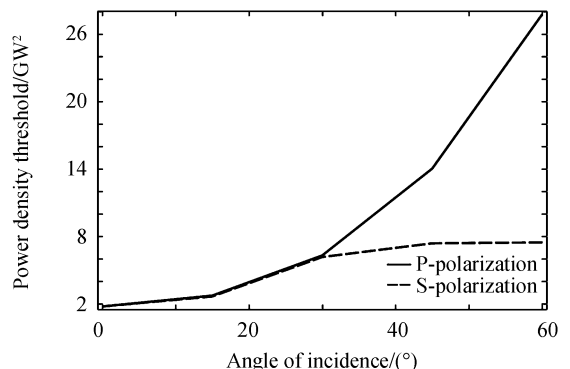


图7 不同角度入射窄带滤光片熔融损伤阈值
Fig.7 Melting threshold in narrow band filter irradiated at different incident angel

增加激光输出能量以达到损伤目的.同时还可以看出 P 偏振光与 S 偏振光的损伤阈值在入射角低于 30°时大体一致;在入射角大于 30°度后,入射光的偏振态对损伤阈值有较大的影响,S 偏振光的损伤阈值远远小于 P 偏振光损伤阈值.因此,在进行激光损伤时需要充分考虑和利用激光的偏振态特性.

6 结论

本文从麦克斯韦方程组基本理论出发,分析了脉冲强激光在不同入射角、不同偏振态下辐照窄带滤光片的驻波场分布;基于热力学理论,研究了滤光片在不同入射角及偏振态下的温度场、应力场,计算了激光辐照下窄带滤光片中心波长漂移及透射率变化,比较讨论了不同入射角下的损伤阈值.结果表明:激光辐照入射角度及偏振态会改变滤光片的驻波场分布,而驻波场分布与滤光片的热力效应有密切关系,从而改变温升及应力分布.随着入射角度的增大,温升峰值的幅值与位置都有了较大的变化,P 偏振光与 S 偏振光引起的热力效应差异性越来越明显,小角度入射时滤光片中心波长偏移超过 200 nm,在中心波长处透射率下降到 6% 以下,滤光片性能失效.在入射角超过 30°后,中心波长的偏移量在 10 nm 左右,在中心波长处的透过率超过 78%,达不到作用效果.在小角度入射时,P 偏振光与 S 偏振光激光熔融损伤的阈值差别很小,在入射角大于 30°后,随着入射角的增大,P 偏振光与 S 偏振光的损伤阈值差别越来越大.为了以较小的功率实现激光对窄带滤光片的损伤需要考虑激光的入射角及偏振态.研究结果可为远红外窄带滤光片的制备及激光损伤提供参考.

参考文献

- [1] ZHAO Yuan-an, JIN Yong-hao, GONG Hui, *et al.* Study on CW laser induced soft damage of narrow-band filters[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(5):55-58.
赵元安, 金永浩, 龚辉, 等. 连续激光辐照窄带滤光片软损伤研究[J]. 光电工程, 2003, **30**(5):55-58.
- [2] HE Min-bo, JIANG Hou-man, CHEN Min-sun, *et al.* Numerical analysis of optical properties under oblique incidence of laser in optical thin films[J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, **31**(s1):1141-1145.
贺敏波, 江厚满, 陈敏孙, 等. 激光斜入射对薄膜光学特性影响的数值分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(s1):1141-1145.
- [3] HANG Liang-yi, XU Jun-qi, SONG Yan-feng, *et al.* Preparation of multi-layer dielectric filter and laser damage characteristics [J]. *Journal of Xi'an technological university*, 2016, **36**(12): 947-953.
杭良毅, 徐均琪, 宋岩峰, 等. 多层介质滤光片的制备及激光损伤特性[J]. 西安工业大学学报, 2016, **36**(12): 947-953.
- [4] JIANG Xiu-e, WANG Bin, LIU Jian, *et al.* Effect of pulse duration on laser thermal damage of thin films[J]. *Laser & Infrared*, 2017, **47**(1):32-37.
江修娥, 王斌, 刘剑, 等. 激光脉宽对光学薄膜元件热损伤的影响[J]. 激光与红外, 2017, **47**(1):32-37.
- [5] WANG Ying, LIU Xu, ZHANG Yue-guang, *et al.* Numerical analysis of response of mid-infrared high reflectance coating under different laser irradiation angles[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4):2382-2387.
王颖, 刘旭, 章岳光, 等. 激光入射角度对薄膜热场分布影响的数值分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(4):2382-2387.
- [6] ZHONG Xi-hua. Modern fundamentals of optics[M]. 4rd ed. Beijing: Peking University press, 2012:34.
钟锡华. 现代光学基础[M]. 4 版. 北京:北京大学出版社,2012:34.
- [7] WANG Bin. Research on damage characteristics and mechanisms of optical film components irradiated by pulsed lasers with different durations [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
王斌. 不同脉宽激光致光学薄膜元件损伤特性和机理分析[D].南京:南京理工大学, 2013.
- [8] ZHU Zhi-wu. Short pulsed laser induced damage to visible light CCD and optical filter module [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
朱志武. 短脉冲激光对可见光 CCD 及滤光片组件的损伤效应研究[D].长沙:国防科技大学, 2013.
- [9] WEI Zhi, JIN Guang-yong, PENG Bo, *et al.* Numerical simulation of thermal and stress field in silicon-based positive-intrinsic-negative photodiode irradiated by millisecond-pulsed laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(19):194205.
魏智, 金光勇, 彭博, 等. 毫秒脉冲激光辐照硅基 PIN 的温度场应力场数值分析[J]. 物理学报, 2014, **63**(19):194205.
- [10] WANG Yi-bin, JIN Guang-yong, ZHANG Wei. Temperature and thermal stress analysis of aluminum alloy plate irradiation by Long Pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(8): 0802006.
王翼彬, 金光勇, 张巍. 长脉冲激光作用下铝合金板材温度和热应力分析[J]. 中国激光, 2016, **43**(8): 0802006.
- [11] ZHOU Wei-jun, YUAN Yong-hua, GUI Yuan-zhen, *et al.* Thermal effect of TiO₂/SiO₂/K₉ film by 1.06μm CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9):1307-1311.
周维军, 袁永华, 桂元珍, 等. 1.06 μm 连续激光辐照 TiO₂/SiO₂/K₉ 薄膜元件温升规律研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(9):1307-1311.
- [12] LI Xiao-jiang, ZHANG Dong-lai, YANG Ye-wei. Influence of target moving on temperature field irradiated by laser [J]. *Laser&Infrared*, 2014, **44**(8):855-860.

- 李小将, 张东来, 杨业伟. 目标运动对激光辐照温度场的影响[J]. 激光与红外, 2014, **44**(8):855-860.
- [13] WANG Bing. Study on temperature and stress field of long pulse laser irradiated LY12 aluminum [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
王冰. 长脉冲激光辐照金属铝 LY12 的温度场与应力场研究[D]. 长春:长春理工大学, 2014.
- [14] ZHAO Qiang, FAN Zheng-xiu. Interface absorption effect on temperature field of optical coating[J]. *Acta Optical Sinica*, 1996, **16**(6): 777-782.
赵强, 范正修. 光学薄膜界面吸收对温度场的影响[J]. 光学学报, 1996, **16**(6): 777-782.
- [15] LI He, CAI Ji-xing, TAN Yong, *et al.* Research on real-time stress damage of millisecond laser irradiation on single-crystal silicon [J]. *Acta Optical Sinica*, 2016, **36**(2): 0219002.
李贺, 蔡继兴, 谭勇, 等. 毫秒激光辐照单晶硅的在线应力损伤研究[J]. 光学学报, 2016, **36**(2): 0219002.
- [16] XU Jiao, CHEN Li-xia, YOU Xing-hai, *et al.* Thermal stress damage of thin film components caused by surface impurities[J]. *Acta Optical Sinica*, 2017, **37**(6):614003.
徐娇, 陈丽霞, 游兴海, 等. 表面杂质诱导薄膜元件的热应力损伤[J]. 光学学报, 2017, **37**(6):614003.
- [17] GU Pei-fu, CHEN Hai-xing, LU Wei, *et al.* Temperature stability of the central wavelength for WDM thin film bandpass filters [J]. *Acta Optical Sinica*, 2004, **24**(1): 33-36.
顾培夫, 陈海星, 陆巍, 等. 波分复用薄膜带通滤光片的中心波长温度稳定性[J]. 光学学报, 2004, **24**(1):33-36.
- [18] ZHOU Ming, FAN Zheng-xiu, SHAO Jian-da, *et al.* Thermal effects of optical film with the combined irradiation of different wavelength lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10):2608-2612.
周明, 范正修, 邵建达, 等. 不同波长激光同时辐照薄膜热效应研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(10):2608-2612.
- [19] LI Fu-chan, ZHOU Ming, ZHU Qun-qing. 10.6 μm narrow-band interference optical filters[J]. *Laser & Infrared*, 1990, **21**(2):48-51.
李复蝉, 周明, 祝群清. 10.60 μm 窄带干涉滤光片[J]. 激光与红外, 1990, **21**(2):48-51.
- [20] YU Kan, LIAO Jian-feng, ZHANG Xiao-dan, *et al.* Optimal design of narrowband filter in oblique incidence based on genetic arithmetic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2):181-185.
俞侃, 廖剑锋, 张晓丹, 等. 基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 181-185.
- [21] CHEN Wei-lan, GU Pei-fu, WANG Ying, *et al.* Analysis of the thermal stress in infrared films [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(7):4316-4321.
陈为兰, 顾培夫, 王颖, 等. 红外薄膜中热应力的研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(7):4316-4321.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 6167154), State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology Funding (No.SK12017ZR02)

引用格式:REN Xiao-dong, LEI Wu-hu, ZENG Ling-qing, *et al.* Thermal and Mechanical Effect of the Narrow Band Filter Irradiated by Laser at Oblique Incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11):1114001

任晓东,雷武虎,曾凌清,等.激光斜入射窄带滤光片的热力效应[J].光子学报,2018, **47**(11):1114001