

# 激光偏振取向与光栅能量 吸收及破坏阈值的关系

梁九卿 周国生  
(山西大学物理系, 太原)

M. Mohebi and M. J. Soilean

(Center for Applied Quantum Electronics, Department of Physics,  
North Texas State University, Denton, USA)

## 提 要

本文从实验和理论方面研究了光栅吸收与入射激光的偏振取向和波长的关系。从计算模型得出的理论结果与观察值相符。

关键词: 光栅吸收; 激光偏振取向; 能量破坏阈值。

## 一、引 言

在本世纪五十年代, 由于微波技术的发展, 各种形状的导体组合对电磁波的反射和吸收问题已有广泛的研究<sup>[1~5]</sup>。近年来由于军事的和学科的目的, 在高能量密度的脉冲激光照射下, 测定各种金属表面的破坏阈值是很有意义的课题。作者中的两位(M. M. 和 M. J.S.) 曾对线偏振光栅在脉冲激光照射下, 能量的吸收及破坏阈值进行过系统的实验研究<sup>[6~7]</sup>。我们用一简化的模型进行了计算, 理论曲线与实验结果吻合得很好。

## 二、在脉冲激光照射下线光栅的能量吸收与光栅取向的关系

在我们的实验中, 激光源是 Hybrid TEA CO<sub>2</sub> 激光, 实验装置如图 1 所示。光栅间距 840 nm。光栅呈对称直角锯齿形如图 2 所示。

表 1 分别给出了在波长 10.6 μm 激光照射下, 有无增透膜两种镀铝样品, 在光栅刻槽

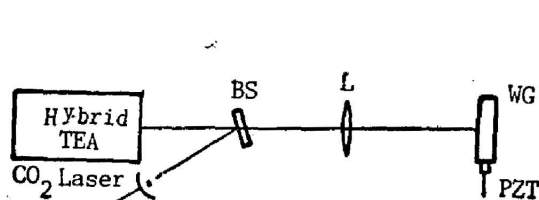


Fig. 1 Experimental setup

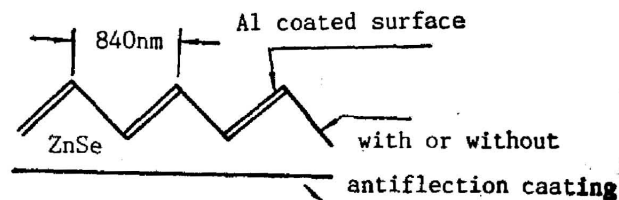


Fig. 2 Sample description

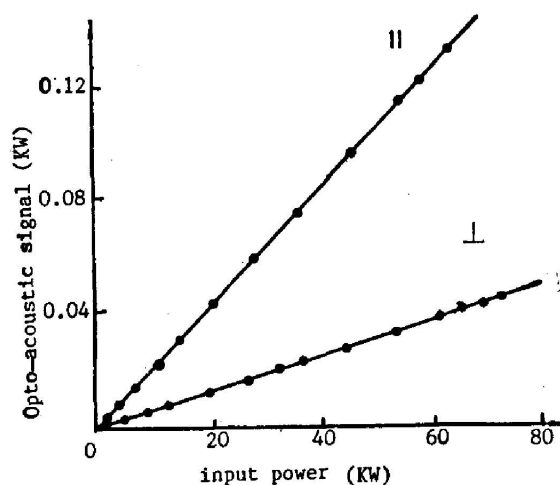


Fig. 3 Opto-acoustic measurement of absorption of wire grid at  $10.6 \mu\text{m}$

Table 1 The ratio of damage threshold for polarization vector parallel and perpendicular to wires at  $1.06 \mu\text{m}$  laser radiation

	Damage Threshold		Ratio = $\frac{\text{Per. } \perp}{\text{Par. } //}$
	perpendicular	parallel	
Wire grid with antireflection coating	2 J/cm <sup>2</sup> 15 MW/cm <sup>2</sup>	0.8 J/cm <sup>2</sup> 6 MW/cm <sup>2</sup>	2.5
Wire grid without antireflection coating	4.8 J/cm <sup>2</sup> 36 MW/cm <sup>2</sup>	2 J/cm <sup>2</sup> 15 MW/cm <sup>2</sup>	2.4

Table 2 The ratio of absorbed energy vs. wavelength for polarization parallel // and perpendicular  $\perp$  to the wires

pulse width FWHM (ns)	Light spot FWHM/e <sup>2</sup> M (mm)	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Ratio = $\frac{\text{absorbed energy}_{//}}{\text{absorped energy}_{\perp}}$
150	3.2	10.6	3.6
30	2.2	1.06	0.62
20	0.9	0.53	0.82

方向与激光偏振方向平行(closed)和垂直(open)时的能量破坏阈值。前者比后者低。

我们利用吸收光所产生的光声讯号来测量光栅能量的吸收值<sup>[6~7]</sup>。图3给出了 $10.6 \mu\text{m}$ 激光偏振方向分别与光栅刻槽平行和垂直时能量吸收值与入射功率的关系。

平行与垂直能量吸收的比值 $R$ 与波长的关系在表2中给出。长波时,平行的大于垂直的吸收。波长短到一定值时,垂直的反而大于平行的吸收。能量吸收的比率在某一波长下有一极小值。就我们所知,上述实验规律尚无一种理论计算说明。本文用一种简单的模型计算激光场在镀铝线光栅中引起的高频电流,从而求得光栅中的耗散功率密度。得到预期的平行和垂直时功率吸收比值波长的依赖关系。

### 三、计算模型

光栅镀铝后大大增强了能量的吸收,这是由于激光场在导体中感生高频电流的功耗所致。这一功耗加速了光栅的破坏。导电光栅中感生电流的功耗已有报道<sup>[4~6]</sup>,但他们只讨论了光偏振方向与光栅刻槽平行的情况。受文献[3]的启示,我们先做几点假定来简化计算模型:

(1) 忽略光栅形状的不规则,假设光栅是由镀在绝缘体上的金属条带组成,如图4所示。在激光波长远大于光栅间距时,这种简化是合理的。

(2) 忽略光栅的侧面感生电流。

(3) 因光栅的线度远大于激光的光斑,金属条带在  $x, y$  方向的延度可视为无穷。这儿我们假设激光束沿  $z$  轴方向垂直照射在光栅表面上。

(4) 镀铝的厚度远大于高频电流的趋肤深度。

设激光场偏振方向与光栅条带平行时(沿  $x$  轴方向)光栅条带单位面积上感生的总电流有效值是  $J_{\parallel}$  (其定义将在下节中给出),条带在入射激光场作用下的等效阻抗是  $Z_{\parallel}$ ,则光栅单位面积上耗散功率可用下式来计算:  $W_{\parallel} = J_{\parallel} \cdot J_{\parallel}^* \operatorname{Re}(Z_{\parallel})$ 。  $J_{\parallel}$  一般是复数,  $J_{\parallel}^*$  是  $J_{\parallel}$  的复共轭;  $\operatorname{Re}(Z)$  表示复数阻抗的实部。当激光场偏振方向与光栅条带垂直时,  $W_{\perp} = J_{\perp} \cdot J_{\perp}^* \operatorname{Re}(Z_{\perp})$ ,我们感兴趣的是二者之比:

$$R = \frac{W_{\parallel}}{W_{\perp}} = \frac{J_{\parallel} \cdot J_{\parallel}^* \operatorname{Re}(Z_{\parallel})}{J_{\perp} \cdot J_{\perp}^* \operatorname{Re}(Z_{\perp})} \quad (1)$$

我们的计算模型有简单的物理直观性。把激光场作为电流源,在光栅中感生电流;等效阻抗都和入射激光波长有关。因而功率吸收是波长相关的。

### 四、平面导体内由激光感生的高频电流及等效阻抗

假设入射激光是一单频平面电磁波,波长为  $\lambda$ 。所有场量随时间成周期性变化,即

$$\mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{A}, \mathbf{j} \sim \exp \left[ i \frac{2\pi c}{\lambda} t \right]$$

这儿  $\mathbf{j}$  是晶体电流密度,与单位面积上总感生电流是不一样的。由 Maxwell 方程及上面关系式得到单个光栅条带内矢量势的定态波动方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \mathbf{A} + \mu \varepsilon \left( \frac{2\pi c}{\lambda} \right)^2 \mathbf{A} = -\mathbf{j}, \end{array} \right. \quad (2a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E} = -i\mu \frac{2\pi c}{\lambda} \mathbf{A}, \end{array} \right. \quad (2b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{H} = \mu \nabla \times \mathbf{A}, \end{array} \right. \quad (2c)$$

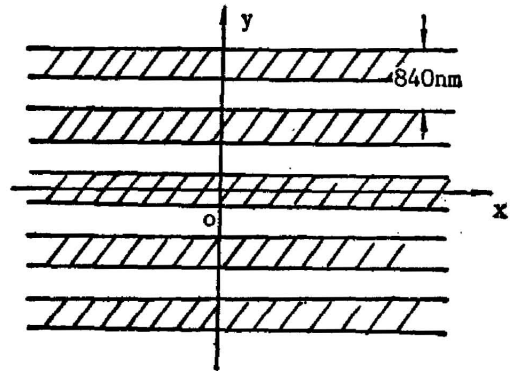


Fig. 4 Wire grid model for calculation

$\mu$  是介质的磁导率,  $\epsilon$  是介电常数,  $c$  是真空中光速。这儿我们采用 MKSA 有理制。在光频情况下, 位移电流  $\frac{\partial \nabla}{\partial t}$  相对于传导电流是一个小量, 可忽略不计<sup>[8]</sup>。由 Maxwell 方程可得到导体中电流密度满足的方程:

$$\nabla^2 \mathbf{j} = i \frac{2\pi c}{\lambda} \mu \sigma \mathbf{j}. \quad (3)$$

$\sigma$  是电导率。

在光频段,  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  一般是复数且是波长的复杂函数。但是研究表明, 对非铁磁性金属, 即使在红光频率  $\epsilon$  和  $\mu$  仍可用其定态值<sup>[9]</sup>。只有在波长  $< 0.25 \mu\text{m}$  时, 电导率才明显地依赖于波长<sup>[10]</sup>。本实验中, 激光波长  $> 0.53 \mu\text{m}$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  可用其定态值来代替, 方程 (3) 的求解将变得十分容易。

解方程 (3) 可求得平面导体内沿其  $Z$  方向的电流密度分布,

$$\mathbf{j}(Z) = j_0 \exp[-\tau Z], \quad (4)$$

$j_0$  是导体表面 ( $Z=0$ ) 的电流密度,  $\tau = (1+i) \sqrt{\frac{\pi c \mu \sigma}{\lambda}}$ , 高频电流的趋肤深度为<sup>[8]</sup>,  $\delta = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi c \mu \sigma}}$ 。沿  $Z$  方向积分, 可得到激光场在金属条带单位面积上的总感生电流:

$$\mathbf{J} = \int_0^\infty \mathbf{j}(Z) dZ = \frac{j_0 \delta}{1+i}. \quad (5)$$

设导体表面的总电场强度是  $E(Z=0)$ , 那么导体表面电流密度和电场的关系由下式决定,

$$j_0 = \sigma E(0). \quad (6)$$

$E(0)$  是入射激光的电场与被平面导体反射波的电场之和, 此处  $E(0)$  仍是一个待定量。 $E(0)$  作为感生电流源与导体条带单位面积上总感生电流的关系按定义是<sup>[8]</sup>:

$$\mathbf{J} Z = E(0), \quad (7)$$

这儿  $Z$  表示导体条带单位面积的等效阻抗。由方程 (5)、(6) 和 (7) 可求得等效阻抗是:

$$Z = \frac{1+i}{\sigma \delta}. \quad (8)$$

## 五、镀铝线光栅的感生电流及光栅等效阻抗

### 1. 激光场的偏振方向与光栅条带平行

设激光沿  $z$  轴方向入射, 光栅的横截面如图 5 所示。激光的电矢量沿  $x$  轴方向与光栅平行。在光栅前的自由空间 ( $Z \leq 0$ ), 矢量势方程 (2a) 简化为  $\nabla^2 \mathbf{A} + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \mathbf{A} = -\mathbf{j}$ , ( $Z \leq 0$ )。 (这儿我们利用了关系式  $c^2 = \frac{1}{\mu \epsilon}$ )。其解可写成  $\mathbf{A} = A(x, y, z) \hat{x}$ ,  $\hat{x}$  是  $x$  轴方向的单位矢量。  $A(x, y, z) = A_0 \exp(ikz) + \iiint G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') j(r'^3) d^3(r'^3)$ , 其中第一项入射激光的矢量势,  $G$  是 Green 函数,  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$ , 光栅内的电流密度由 (4) 式决定  $\mathbf{j}(\mathbf{r}') =$

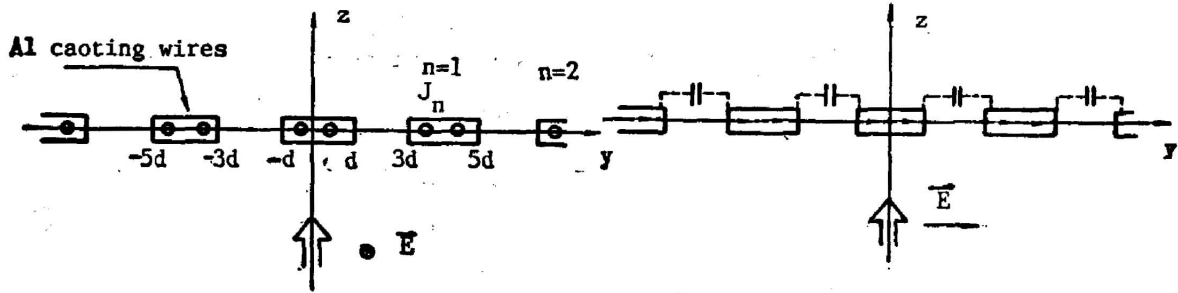


Fig. 5 Geometry for calculation (Light polarization vector parallel to the wires)

Fig. 6 Geometry for calculation (light polarization vector perpendicular to the wires)

$j'_0 \exp\left[-\frac{1+i}{\delta} z'\right]$ 。第二项可写成

$$\iiint G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') j(\mathbf{r}') d^3 \mathbf{r}' = j'_0 Q(\lambda, \delta, d) \tag{9}$$

由于高频电流趋肤深度很小, 积分  $Q(\lambda, \delta, d)$  可在零级近似下求得。其实, 我们需要计算的是平行和垂直时功率吸收的比值  $R$ 。  $Q \approx \pi \delta d \left[ 1 + i \sum_{n=1}^{\infty} H_0^{(1)}(4nkd) \right]$ ,  $H_0^{(1)}$  是零阶第一类 Hankel 函数<sup>[11]</sup>。电场强度可由 (2b) 式求得:

$$E' = E_0 + F(\lambda, d, \delta) j'_0 \tag{10}$$

$E_0$  是入射激光的电场强度,  $F(\lambda, d, \delta) \equiv -i\mu \frac{2\pi\sigma}{\lambda} Q(\lambda, \delta, d)$ 。由 (6) 和 (10) 式得到在光栅前的自由空间 ( $Z \leq 0$ ), 电场强度  $E'(0) = \frac{E_0}{(1-F\sigma)}$ 。激光偏振方向与光栅条带平行时, 在铝条带单位面积上感生的总电流由 (7) 式可求得

$$J' = \frac{E'(0)}{Z'} = E_0 \frac{\sigma \delta}{(1-F\sigma)(1+i)}$$

2. 激光偏振方向与光栅条带垂直

图 6 是计算模型的示意图。由于公式 (9) 中积分因子  $Q$  只与计算模型的几何形状有关, 故两种情况下的积分值相同, 激光偏振方向与光栅垂直时在镀铝条带中心部位的场强是:  $E_{\perp 0} = E_0 + F(\lambda, d, \delta) j_{\perp}'$ 。用关系式 (6) 消掉  $j_{\perp}'$  得到的场强与平行时形式一样  $E^{\perp}(0) = E'(0)$ 。不同之处是, 垂直时高频电流经光栅条带间的分布电容形成通路。假定镀铝光栅的横向单位面积分布电容是  $\mathcal{C}$ , 则激光偏振方向与光栅取向垂直时的等效阻抗相对平行时的情况仅多出一个容抗  $-i \frac{\lambda}{2\pi c \mathcal{C}}$ 。因此总阻抗应为:

$$Z^{\perp} = \frac{1}{\sigma \delta} + i \left( \frac{1}{\sigma \delta} - \frac{\lambda}{2\pi c \mathcal{C}} \right) \tag{11}$$

分布电容  $\mathcal{C}$  在我们的计算模型中是一个和光栅形状、材料、甚至入射激光波长有关的量。总感生电流密度因而是:

$$J^{\perp} = \frac{E^{\perp}(0)}{Z^{\perp}} = \frac{E_0}{(1-F\sigma) \left[ \frac{1}{\sigma \delta} + i \left( \frac{1}{\sigma \delta} - \frac{\lambda}{2\pi c \mathcal{C}} \right) \right]}$$

## 六、光栅吸收功率密度的比值

由表达式(1)得到光栅单位面积上吸收功率的比值是:

$$R = \frac{1 + \left(1 - \frac{1}{2\pi\mathcal{C}} \sqrt{\frac{\sigma\lambda^3}{\pi\mu\sigma^3}}\right)^2}{2}, \quad (12)$$

光栅的横向分布电容应和高频电流的趋肤深度成正比。

$$\mathcal{C} = \eta \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\epsilon\mu\sigma}},$$

$\eta$  是仅和光栅几何形状有关的自由参数。应用这一关系式, 得到吸收率比值  $R$  与波长的关系,

$$R = \frac{1}{2} \left[ 1 + \left(1 - \frac{\sigma\lambda}{2\pi\sigma\eta}\right)^2 \right]. \quad (13)$$

图7给出了  $R$  与  $\lambda$  的理论曲线, 其中自由参数  $\eta$  的值是由  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  的实验  $R$  值确定的。 $\sigma$  是铝的电导率。从图可见,  $\lambda = 6 \mu\text{m}$  时,  $R = 1$ 。 $\lambda > 6 \mu\text{m}$ , 平行吸收大于垂直吸收,  $\lambda < 6 \mu\text{m}$  情况相反。 $\lambda = 3 \mu\text{m}$  时,  $R_{\min} = 0.5$ 。 $\lambda < 3 \mu\text{m}$  时,  $1 > R > 0.5$ 。两种情况的区别仅在于平行时等效阻抗是电阻电感串联(8), 而垂直时等效阻抗是电阻与电容、电感的串联(11); 其中容抗与感抗的相位相反。长波时, 由于垂直阻抗中串有很大的容抗  $\frac{\lambda}{2\pi\epsilon\mathcal{C}}$ , 其值必然大于平行等效阻抗。因而平行时感生电流大, 功耗也大。随着入射激光频率增加, 容抗减小, 在谐振频率时( $\lambda = 3 \mu\text{m}$ )容抗和感抗相消, 垂直阻抗达极小值, 垂直感生电流最大, 欧姆功耗也达极大值, 对应于  $R_{\min}$ 。

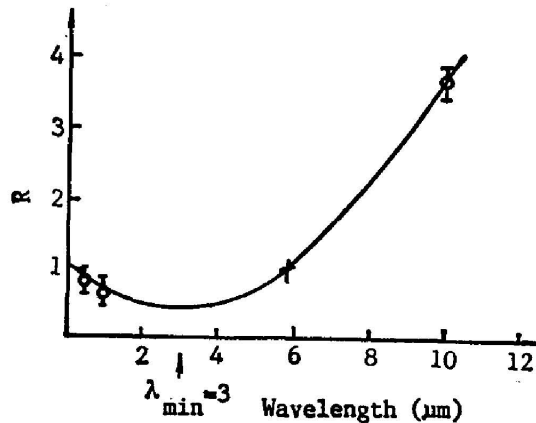


Fig. 7 Plot of the ratio of the absorption of parallel polarized light to the absorption of perpendicular polarized light vs. wavelength. The solid curve is the theoretical calculation and the points are data from experiments

### 参 考 文 献

- [1] G. Bird and M. Parish; *J. Opt. Soc. Am.*, 1960, 50, No. 9 (Sep), 866.
- [2] M. Hass and M. O'Hara; *Appl. Opt.*, 1965, 4, No. 8 (Aug), 1027.
- [3] G. Baldwin and A. E. Heins; *Math. Scand.*, 1954.

- [4] E. A. Lewis and J. P. Casey; *J. Appl. Phys.*, 1952, **23**, No. 6 (Jun), 605.
- [5] J. P. Casey and E. A. Lewis; *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, **42**, No. 12 (Dec), 971.
- [6] M. Mohebi *et al.*; *Opt. Lett.*, 1985, **10**, 8.
- [7] M. Mohebi *et al.*; "Measurement of Optical Damage Threshold of Wire Grid Polarizers at 10.6  $\mu\text{m}$ ", (Proceedings of the 1985 Boulder Damage Symposium).
- [8] See Ref. [5], p. 972, equation 9.
- [9] J. D. Stratton; "Electromagnetic Theory", (McGraw-Hill New York 1941).
- [10] A. Hagen and G. Rubens; *Ann. Physik*, 1903, 873.
- [11] G. N. Watson; "Theory of Bessel Functions", (MacMillan New York 1945).
- [12] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik; "Table of Integrals, Series and Products", (Academic Press, New York, 1980).

## Orientational dependence of absorption and laser induced damage in wire grid polarizers

LIANG JIUQING AND ZHOU GUOSHENG

(Department of Physics, Shanxi University, Taiyuan)

MEHRDAD MOHEBI AND M. J. SOILEAN

(Center for Applied Quantum Electronics, Department of Physics, North Texas State University, Denton, Texas, 76203, USA)

(Received 17 November 1986; revised 24 October 1988)

### Abstract

We report in this paper the theoretical and experimental study on the relation of the absorption in wire grid polarizer with laser polarization orientation and wavelength. Measurements of absorption and laser induced damage thresholds are in good agreement with theoretical model.

**Key words:** absorption in wire grid; laser polarizing orientation; laser induced damage thresholds.