

# 薄膜体内缺陷对损伤概率的影响

夏志林<sup>1)†</sup> 邵建达<sup>1)</sup> 范正修<sup>1)</sup>

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100080)

(2005 年 11 月 30 日收到, 2006 年 6 月 19 日收到修改稿)

由实验中得到的激光损伤概率与表面杂质密度的关系出发, 结合 XRD 测试和激光损伤测试的结果, 得到体缺陷或杂质破坏起主导作用的损伤机理. 将激光作用时杂质吸收的热学和力学过程与杂质分布的统计规律结合起来, 得到了深埋于薄膜内部的杂质诱导薄膜损伤概率与杂质密度、激光功率密度以及薄膜厚度的关系. 该模型认为能诱导薄膜破坏的杂质尺寸范围与杂质埋藏深度有关, 所以不同深度处能诱导薄膜损伤的杂质密度不一样, 理论结果与实验结果符合得很好. 该理论模型还可以很好地解释损伤形貌.

关键词: 损伤, 激光, 缺陷, 薄膜

PACC: 6180, 7850, 4630N, 6890

## 1. 引 言

纳秒激光作用于薄膜材料时, 损伤机理以杂质或缺陷吸收为主<sup>[1-11]</sup>. 由于杂质密度是有限的, 所以破坏的统计概率性是纳秒激光损伤的主要特点. 有关杂质密度与激光损伤概率的关系, 先前有一些研究<sup>[1-4]</sup>. 但是这些研究没有将杂质半径的信息融合进去, 这使得理论模型不很完善. 我们曾经对此做了一些补充工作, 研究了结构非常完善或厚度很小的薄膜, 其破坏源自表面杂质时, 杂质密度与损伤概率的关系<sup>[5]</sup>.

文献[5]定义薄膜中总的杂质密度为  $N =$

$\sum_{i=1}^m N_i$ ,  $m$  是可以诱导薄膜破坏的杂质(称之为有害杂质)的种类数.

激光束光斑内的有害表面杂质数目为

$$N_i = \int_0^{w_{0i}} \left\{ \frac{2\pi r l M_i}{1 - D_i} (r_{\max i}^{1-D_i} - r_c^{1-D_i}) \right\} dr$$
$$= M_i^* \cdot W_m^{1-D_i} + H_i^* \cdot W_m^{(D_i-1)2},$$
$$M_i^* = \frac{\pi l w_{0i}^2 M_i}{(1 - D_i)^2} \left( \frac{3 t_p \epsilon_{\lambda i}}{4 c_{vi} \Delta T_i} \right)^{1-D_i}$$
$$\times \left( 1 - \exp\left( \frac{D_i - 1}{w_0^2} w_{0i}^2 \right) \right),$$

$$H_i^* = 2 \cdot \frac{\pi l w_{0i}^2 M_i}{(1 - D_i)^2} \left( \frac{4 \chi \cdot T}{\alpha_i} \right)^{(1-D_i)2}$$
$$\times \left( 1 - \exp\left( \frac{1 - D_i}{2 w_0^2} w_{0i}^2 \right) \right),$$

$$w_{0i} = \sqrt{-w_0^2 \times \ln(W_{thi} / W_m)}, W_m > W_{thi}.$$

式中参数可参考下文中体杂质相应参数的含义. 薄膜的损伤概率由下文(17)式得到. 这是激光诱导损伤概率与表面杂质密度的关系. 而当薄膜的结构不是很好时, 其体内杂质对损伤概率的影响不可忽视. 体内杂质对损伤概率的影响比较复杂, 不仅仅涉及杂质的尺寸, 还与其埋藏深度有关. 本文就体内杂质诱导的热力学过程, 分析了体杂质对损伤概率的影响.

## 2. 实验安排及实验结果

### 2.1. 实验安排

采用电子束蒸发法获得了四组样品, 编号 H1—H4, 厚度分别是 800 nm, 800 nm, 1000 nm, 1200 nm. 第一组样品(H1), 采用的是氧化铪膜料, 在沉积过程中没有充入氧气; 后三组样品(H2—H4), 采用的是金属铪膜料, 在沉积过程中充入氧气作为沉积气氛. 每组样品选用两个样品. 取一片(编号: -6)做热

† E-mail: lionel626@163.com

处理. 将获得的样品首先做 XRD 分析, 扫描角度从 10°到 90°, 间隔 0.02°. 图 1 中绘出了两组 (H1, H2) 样品的测试结果. 组 H2 中两个样品的 XRD 衍射峰强度差别明显, 其余两组 (H3, H4) 的 XRD 结果与组 H2 的类似. 然后, 用莱卡光学显微镜对薄膜表面的杂质密度进行统计, 表 1 中列出了放大 100 倍后计算机显示器的一个视场中的平均杂质密度(个/mm<sup>2</sup>); 再进行激光损伤测试, 测试激光波长为 1.064 nm, 激光脉宽 12 ns, 采用 1-ON-1 的方式. 图 2 中绘出了两组 (H1, H2) 激光损伤概率与测试能量的关系曲线, 组 H2 中两个样品的损伤概率相差明显, 其余两组 (H3, H4) 的曲线与组 H2 的类似. 最后对损伤坑用轮廓仪获得其深度信息. 文中统计了损伤坑的深度分布以及最大概率损伤坑的深度. 统计以深度带宽 100 nm 为间隔, 例如深度在 300—400 nm 和 400—

500 nm 内的损伤坑, 统计时认为它们的深度分别为 350 nm 和 450 nm.

### 2.2. 实验结果

样品表面的杂质密度反映了薄膜表面的污染程度. 其 XRD 衍射强度反映了薄膜内部结构的完善性. 组 H2—H4 相关的结果显示, 热处理过的薄膜结晶更加充分, 但是表面污染严重. 表面污染严重的热处理过的薄膜(编号: -6)相对于未处理过的薄膜(编号: -2), 其损伤概率比较低. 组 H1 薄膜样品表面污染的程度不同, 但结构上没有什么差异, 其损伤概率与测试能量的关系也没有明显的规律性差别. 由此可以看出, 与表面污染相比, 结构上的缺陷更加容易引起薄膜破坏, 起主导作用. 所以微观结构不好的薄膜, 体缺陷决定了其损伤概率的大小.

表 1 样品表面杂质密度(单位: 个/mm<sup>2</sup>)

编号	杂质密度	编号	杂质密度	编号	杂质密度	编号	杂质密度
H2-2	142	H3-2	67	H4-2	21	H1-2	13
H2-6	171	H3-6	88	H4-6	30	H1-6	17

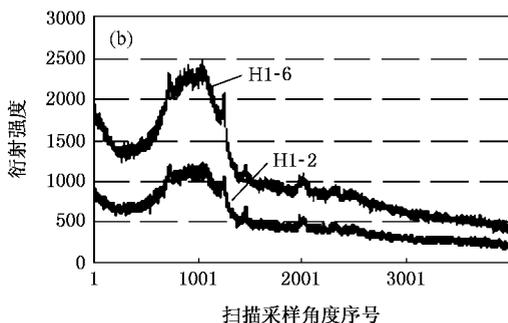
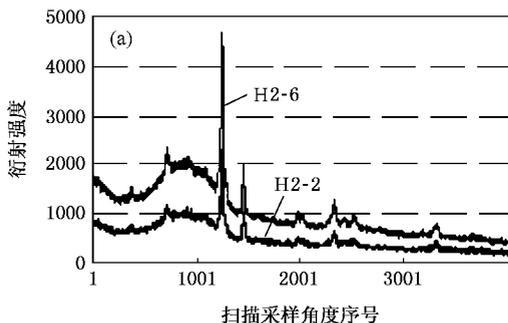


图 1 样品的 XRD 结构测试数据图(横坐标是扫描采样角度序号, 扫描角度间隔 0.02°, 扫描范围从 10°到 90°, 纵坐标是衍射强度. 组 H2—H4 的 XRD 衍射图非常类似, 这里只给出了组 H2 的衍射图)

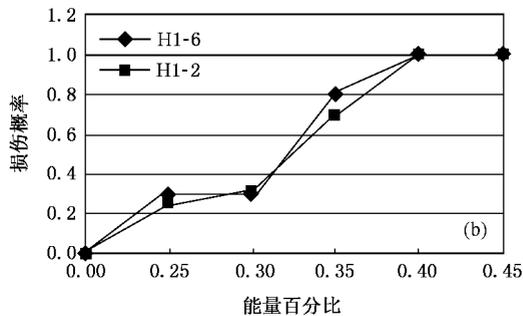
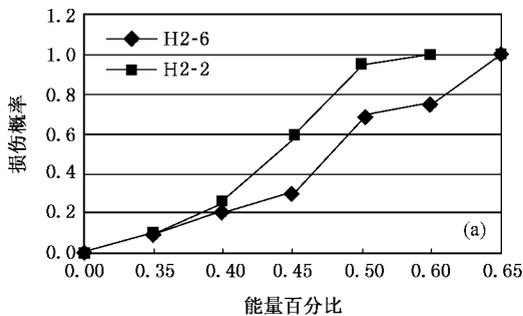


图 2 样品的激光损伤概率与测试能量的关系曲线(横坐标是测试激光能量百分比, 纵坐标是损伤概率. 组 H2—H4 中两个样品的损伤概率均相差很明显, 曲线非常类似, 这里只给出了组 H2 的损伤概率与能量的关系曲线)

### 3. 薄膜受热区域的热力响应过程

#### 3.1. 热学响应理论

研究体内杂质诱导的损伤必然要考虑到与之相关的力学过程,该力学过程随杂质在破坏过程中涉及到的不同相态的转变而不同.为了方便分析,将中心在同一深度位置的杂质归类到一起考虑.其中,小尺寸的杂质可能会由于其温度很高而气化,这有利于导致破坏,而大尺寸的杂质,虽然温度较低,但是其尺寸变化量大,同时外围覆盖层薄,所以也容易导致破坏.这样复杂的过程使得统计变得难以进行.为了简化处理问题,用杂质及其周围热扩散范围内的平均温度来代替杂质处的温度,借助静弹性力学理论分析.这相当于将小尺寸杂质高温相变的情况转化成大尺寸杂质非相变的情况,将两种不同的损伤机理等价化了.这个思想源自文献[6].

先考虑杂质吸收激光能量的热响应过程.我们定义受热区域为杂质及其周围的热扩散涉及到的区域,该区域的半径为<sup>[6]</sup>

$$r_m = r + \sqrt{D_T t_p}, \quad (1)$$

其中, $r$ 是杂质半径, $D_T$ 是热扩散系数, $t_p$ 是激光脉冲宽度.受热区域内的热传导方程为(在平均温度下,可以忽略温度梯度)

$$\kappa \frac{4\pi r_m^3}{3} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = D_T \frac{4\pi r^3}{3} \alpha_T W, \quad (2)$$

其中, $\bar{T}$ 是受热区域的平均温度, $W$ 是激光的功率密度, $\kappa$ 是热导率, $\alpha_T$ 是杂质的热吸收系数.用(1)式的扩散长度替换(2)式中的半径 $r_m$ ,有

$$\kappa (r + \sqrt{D_T t})^3 \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = D_T r^3 \alpha_T W. \quad (3)$$

求解(3)式,可以得到受热区域的平均温度为

$$\bar{T} = \frac{r^3 \alpha_T W \cdot t_p}{\rho c_m (r + \sqrt{D_T t_p})^3}, \quad (4)$$

其中, $\rho$ 是受热区域的密度, $c_m$ 是受热区域的质量热容.受热区域的温度升高后,其相应的应变量为<sup>[7]</sup>

$$R_{\max} - r_m = \frac{1+v}{1-v} \int_0^{r_m} \alpha_r T(r', t) dr', \quad (5)$$

其中, $\alpha_r = \alpha_i, v = v_i, r' \leq r$ ;  $\alpha_r = \alpha_h, v = v_h, r' > r$ ,下标 $i, h$ 分别代表杂质和薄膜基体, $\alpha_r$ 是材料的热膨胀系数, $v$ 是材料的泊松比, $R_m$ 是受热区域温度升高膨胀后的半径.

至此,定义两个概念(与之相关的物理意义在下文有相应的解释):

**表面杂质:**以该类杂质为源的受热区域的半径小于杂质填埋的深度.表面杂质吸收的能量不能全部保留在薄膜中,有一部分要损失到薄膜表面的空间中去,所以对它的研究只能基于杂质自身的温度.文献[5]对此做了详细的分析.

**体内杂质:**以该类杂质为源的受热区域的半径大于杂质填埋的深度.体杂质吸收的能量全部保留在薄膜中,为了简化处理,可以用受热区域代替杂质自身进行研究(这个思想源自文献[6]).本文对此做详细地分析.

#### 3.2. 力学响应理论

体内杂质破坏必然涉及到力学过程,这里我们仍然使用球壳模型<sup>[7]</sup>,以薄膜中出现裂纹为损伤标准.所以,分析的重点是关注球壳模型中球壳内的最大张应力.由球壳理论可以得到受热区域膨胀过程中受到的径向压力为

$$P_1 = \frac{(z^3 - r_m^3) \cdot (R_{\max} - r_m)}{r_m^3 \cdot \left( \frac{r_m}{3\lambda + 2\mu} + \frac{z^3}{4\mu \cdot r_m^2} \right)}, \quad (6)$$

其中, $z$ 是杂质的深度位置, $\lambda, \mu$ 是材料的拉梅系数.此外,受热区域膨胀后的球壳内周向拉应力为

$$\sigma_{\phi\phi} = \frac{r_m^3 P_1}{z^3 - r_m^3} \left( 1 + \frac{z^3}{2r_m^3} \right), \quad (7)$$

其中, $r' \in [r_m, z], z \in (r_m, d), d$ 是薄膜厚度.当最大的周向拉应力值超过薄膜材料的抗拉强度 $\sigma_{th}$ 时,薄膜中出现裂纹而使得薄膜破坏.将(5)(6)式代入(7)式,可以得到该最大周向拉应力为

$$\sigma_{\phi\phi-\max} = \frac{\left( 1 + \frac{z^3}{2r_m^3} \right) \cdot \frac{r^3 \alpha_T W \cdot t_p}{\rho c_m r_m^3} \cdot \left( \frac{1+v_i}{1-v_i} \cdot \alpha_r \cdot r + \frac{1+v_h}{1-v_h} \cdot \alpha_h \cdot \sqrt{D_T t_p} \right)}{\left( \frac{r_m}{3\lambda + 2\mu} + \frac{z^3}{4\mu \cdot r_m^2} \right)}. \quad (8)$$

结合拉梅常数表达式  $\lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)}, \mu = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ,可以得到最大拉应力与材料的泊松比和

杨氏模量之间的关系:

$$\sigma_{\phi\phi-\max} = \frac{\left(1 + \frac{z^3}{2r_m^3}\right) \cdot \left(\frac{1+v_i}{1-v_i} \cdot \alpha_r \cdot r + \frac{1+v_h}{1-r_h} \cdot \alpha_h \cdot \sqrt{D_T t_p}\right) \cdot \frac{r^3 \alpha_T W \cdot t_p \cdot E_h}{\rho c_m (1+v_h)}}{r_m^4 \left(\frac{1-2v_h}{1+v_h}\right) + \frac{z^3}{2r_m^3}} \quad (9)$$

将受热区域看成一个体系, 简化该表达式为

$$\sigma_{\phi\phi-\max} = \frac{K^* W [2r_m^3 + z^3]}{[\chi(1-2v_h)r_m^3 + z^3(1+v_h)]}, \quad (10)$$

$$\text{其中 } K^* = \frac{\beta t_p \alpha_h \alpha_T E_h (1+v_h)}{\rho c_m (1-v_h)};$$

$$\beta \frac{1+v_h}{1-v_h} \alpha_h r_m = \left(\frac{1+v_i}{1-v_i} \cdot \alpha_r \cdot r + \frac{1+v_h}{1-v_h} \cdot \alpha_h \cdot \sqrt{D_T t_p}\right),$$

$\beta$  是随杂质半径  $r$  变化的转换系数. 在脉宽不超过 ns 时, 热扩散长度相对可引起破坏的杂质半径来说比较小. 为了简化计算, 该系数可以用一个常数近似 (该系数在杂质半径很小和很大时会相差很大, 要根据后文定义的  $d_1$  分界分别取值). 同时还可以假设吸收截面为受热区域的表面积 (这个假设使得受热区域的温度与杂质半径无关, 所有杂质周围的扩散区域温度一样的. 这是以体系整体为对象, 对温度取平均的必然结果. 从能量角度上看, 这个结论也是合理的. 这正是问题得到简化的关键所在. 同样吸收截面也要以  $d_1$  分界分别取吸收系数). 这样的简化处理在杂质半径与热扩散长度相当时会引入比较大误差. 如果不采用近似的  $\beta$  系数和吸收截面, 则估算精度很高, 但是这需要采用数值方法计算. 本文重点是分析杂质的统计规律, 所以采用近似的值以获得可供分析用的解析表达式.

#### 4. 杂质密度统计及损伤概率

求解方程 (10), 可以得到确定的激光功率密度下, 一定厚度薄膜中能引起薄膜破坏的受热区域的最小临界半径 (该方程有三个解, 互异的解有两个, 它们互为倒数, 去掉不合理的解)

$$\begin{aligned} r_m &= - \left( \frac{K^* W - \sigma_{th} - v_h \sigma_{th}}{2K^* W - 2\sigma_{th} + 4v_h \sigma_{th}} \right)^{1/3} z \\ &= - \left( \frac{1}{2} - \frac{3v_h \sigma_{th}}{2K^* W - 2\sigma_{th} + 4v_h \sigma_{th}} \right)^{1/3} z. \quad (11) \end{aligned}$$

受热区域的尺寸在该模型下有几何上的尺寸限制. 如果受热区域的半径大于杂质的深度, 那么杂质

吸收的激光能量将会有一部分扩散到薄膜表面的空间中去, 这样受热区域的温度会偏低, 我们将这样的杂质视为表面杂质, 按照处理表面杂质的方法, 依据杂质自身的温度分析<sup>[5]</sup>. 所以体内杂质的尺寸限制在

$$r_m \in (\sqrt{D_T t_p} + r_0, z),$$

其中,  $r_0 = \sqrt{(\Delta T \cdot D_T \cdot c_v) (\omega \cdot \chi \cdot |E|^2)^{[8]}}$ ,  $c_v, \omega, \chi, E$  分别是杂质的体积热容, 激光圆频率, 材料磁化系数的复部, 激光电场强度. 能使半径小于  $r_0$  的杂质诱导薄膜破坏, 其破坏机理已经进入了雪崩电离破坏机制的范畴<sup>[8]</sup>.  $\Delta T$  通常可以取为杂质熔化温度与环境温度的差值. 雪崩电离的电场强度  $E$  一般要大于  $10^6$  V/cm. 通常情况下, 杂质半径  $r_0$  的临界尺寸为 50—100 nm.

由受热区域几何上的尺寸限制, 结合 (11) 式的激光功率密度决定的受热区域的最小临界半径, 可知实际的热扩散区域尺寸的范围 (如图 3 所示) 是

$$r_m \in (\max\{\sqrt{D_T t_p} + r_0, r_{m-c}\}, r_{m-\max}),$$

$$\text{其中 } r_{m-c} = \left(-\frac{1}{2} + \frac{3v_h \sigma_{th}}{2K^* W - 2\sigma_{th} + 4v_h \sigma_{th}}\right)^{1/3} z;$$

$$r_{m-\max} = z.$$

所以, 一定的薄膜厚度下, 能使薄膜因体杂质吸收而破坏的激光功率密度被限制在一个范围内:

$$\begin{aligned} W \in & \left( \frac{\sigma_{th} - v\sigma_{th}}{K^*} \left[ (3v\sigma_{th}) \left( 2 \left( \frac{\sqrt{D_T t_p} + r_0}{z} \right)^3 + 1 \right) \right] / K^* \right. \\ & \left. + \frac{\sigma_{th} - 2v\sigma_{th}}{K^*} \right). \quad (12) \end{aligned}$$

激光功率密度超出该范围时, 太小或是不能诱导薄膜破坏, 或是由表面杂质及缺陷引起的破坏 (这里的表面杂质指深位置处的表面杂质, 这并不说明体杂质诱导损伤需要的激光功率密度一定大于表面杂质需要的. 对于结构很差的薄膜, 损伤往往是由体内缺陷决定); 太大则不是杂质破坏机理. 当不考虑热扩散或薄膜厚度非常大的时候, 则该集合为

$$W \in \left( \frac{\sigma_{th} - v\sigma_{th}}{K^*}, \frac{\sigma_{th} + v\sigma_{th}}{K^*} \right).$$

由 (12) 式, 还可以看出当  $\sqrt{D_T t_p} + r_0 > z$  时, 激

光功率密度的集合为空. 只有当  $z > \sqrt{D_T t_p} + r_0$  时, 才需要考虑体缺陷的影响. 我们在实验中获得的薄膜厚度远大于该长度(约 200 nm), 所以当薄膜微观结构不好时, 体杂质诱导的损伤是不可以忽视的, 它在薄膜损伤中起主要的作用.

薄膜中具有危害性的体杂质密度, 可以由对厚度变量的积分得到. 由于受热区域的下限具有选择性, 所以要按薄膜厚度分情况讨论. 厚度分界(见图 3)为

$$d_1 = \frac{\sqrt{D_T t_p} + r_0}{\left(-\frac{1}{2} + \frac{3v_h \sigma_{th}}{2K^* W - 2\sigma_{th} + 4v_h \sigma_{th}}\right)^{1/3}}. \quad (13)$$

1) 当薄膜厚度不大于  $d_1$  时, 继承表面缺陷密度的定义<sup>[5]</sup>, 激光辐照区域内的体缺陷密度可以写成

$$N_j^b = N_{1j} = 2\pi r M_j \int_{r_1}^{r_2} dr' \int_{\sqrt{D_T t_p} + r_0}^d dz \int_{r_{c-j}}^{r_{\max-j}} x^{-D_j} dx$$

$$= \frac{\pi M_j (r_2^2 - r_1^2)}{(1 - D_j)} \left[ \frac{(d - \sqrt{D_T t_p})^{2-D_j} - r_0^{2-D_j}}{(2 - D_j)} - r_0^{1-D_j} (d - \sqrt{D_T t_p} - r_0) \right], \quad (14)$$

其中, 杂质半径边界为  $r_{c-j} = r_0$ ,  $r_{\max-j} = z - \sqrt{D_T t_p}$ ; 光斑半径边界为

$$r_0 = 0, r_2 = \sqrt{-w_0^2 \times \ln \left[ \left( \frac{\sigma_{th} - v\sigma_{th}}{K^*} \right) / W_m \right]}.$$

$w_0$  是激光束的束腰半径.  $M_j, D_j$  是  $j$  类杂质体分布的分形参数. 此时诱导损伤的杂质半径多数很小且密度大, 损伤形貌以密密麻麻的小浅坑为主, 见图 3(a).

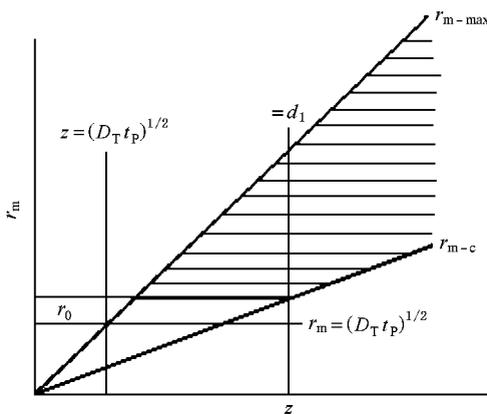


图 3 确定的激光功率密度下, 不同深度处可以诱导薄膜破坏的体内杂质尺寸范围的示意图

2) 当薄膜厚度大于  $d_1$  时, 激光辐照区域内的体杂质密度为

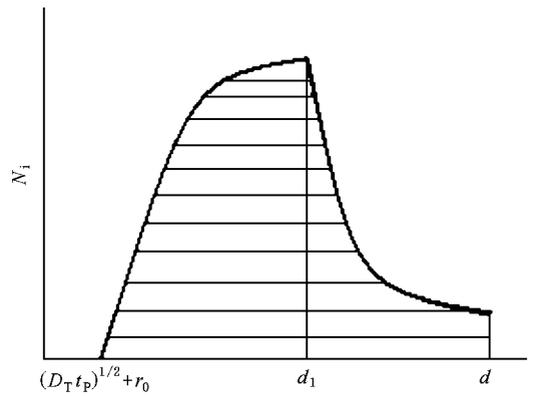


图 4 确定激光功率密度下, 不同深度处可以诱导薄膜破坏的体内杂质密度的示意图

$$N_j^b = N_{1j} + 2\pi r M_j \int_{r_1}^{r_2} dr' \int_{d_1}^d dz \int_{r_{c-j}}^{r_{\max-j}} x^{-D_j} dx. \quad (15)$$

杂质半径范围为

$$r_{c-j} = \left(-\frac{1}{2} + \frac{3v_h \sigma_{th}}{2K^* W - 2\sigma_{th} + 4v_h \sigma_{th}}\right)^{1/3} z - \sqrt{D_T t_p},$$

$$r_{\max-j} = z - \sqrt{D_T t_p}.$$

积分式(15)过于复杂, 不能获得简洁的解, 通常需要借助计算机使用数值方法求解. 而对于波前为矩形的激光束, 可以获得比较简洁的解

$$N_j^b = N_1 + \frac{\pi M_j}{1 - D_j} \cdot \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2 - D_j} \times \left\{ (d - \sqrt{D_T t_p})^{2-D_j} - (d_1 - \sqrt{D_T t_p})^{2-D_j} - \frac{(g(W) \cdot d - \sqrt{D_T t_p})^{2-D_j} - (g(W) \cdot d_1 - \sqrt{D_T t_p})^{2-D_j}}{g(W)} \right\}, \quad (16)$$

其中,  $g(W) = \left(\frac{-K^* W + \sigma_{th} + v_h \sigma_{th}}{2K^* W - 2\sigma_{th} + 4v_h \sigma_{th}}\right)^{1/3}$ . 此时诱导损伤的杂质, 有的半径较大但密度不大, 损伤以由密密麻麻的小浅坑包围的离散的较大深坑形貌为主, 见图 3(b).

至此, 考虑到薄膜内的具有危害性体杂质时, 薄膜中可以诱导损伤的杂质的总密度可以表示为

$$N = \sum_{i=1}^m N_i + \sum_{j=1}^n N_j^b,$$

其中,  $m$  是表面有害杂质的种类数,  $n$  是体内有害杂质的种类数. 通常只有少数几种杂质或缺陷具有危害性, 而且起主要作用的只是其中一种.

损伤概率与杂质密度的关系仍然是<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} P &= 1, N \geq 1, \\ P &= N^{-1}, N < 1, \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $P$  是薄膜的损伤概率。

如果要分析不同深度处的有害体杂质密度的信息,可以根据体杂质密度的深度函数

$$\begin{aligned} N_j^h(z) &= 2\pi r M_j \int_{r_1}^{r_2} dr' \int_{r_{c-j}}^{r_{\max-j}} x^{-D_j} dx \\ &= \frac{\pi M_j (r_2^2 - r_1^2)}{(1 - D_j)} \left( r_{\max-j}^{1-D_j} - r_{c-j}^{1-D_j} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

将 (18) 式对变量  $z$  求导(不考虑光束半径随  $z$  的变化),以分析杂质密度随深度变化的趋势

$$\frac{d(N_j^h(z))}{dz} = \pi M_j (r_2^2 - r_1^2) \left[ r_{\max-j}^{-D_j} \cdot \frac{d(r_{\max-j})}{dz} \right]$$

$$- r_{c-j}^{-D_j} \cdot \frac{d(r_{c-j})}{dz} \right). \quad (19)$$

结合 1)、2) 两种情况下体杂质半径的临界尺寸,由 (19) 式可以得到:当体杂质的深度小于  $d_1$  时,杂质密度随深度位置的增加而增大;当深度大于  $d_1$  时,杂质密度随深度位置的增加而减小。所以,在一定的激光功率密度下,薄膜厚度大于  $d_1$  时破坏概率最大的位置在深度  $d_1$  处,薄膜厚度不大于  $d_1$  时破坏概率最大的位置在薄膜与基片界面处。见图 6 的实验结果,图 6 的实验结果曲线与图 4 的理论曲线非常相似。由 (13) 式可以看出,  $d_1$  随激光功率密度增加而增加(图 7 是实验结果),随薄膜材料的抗拉强度的增加而减小。

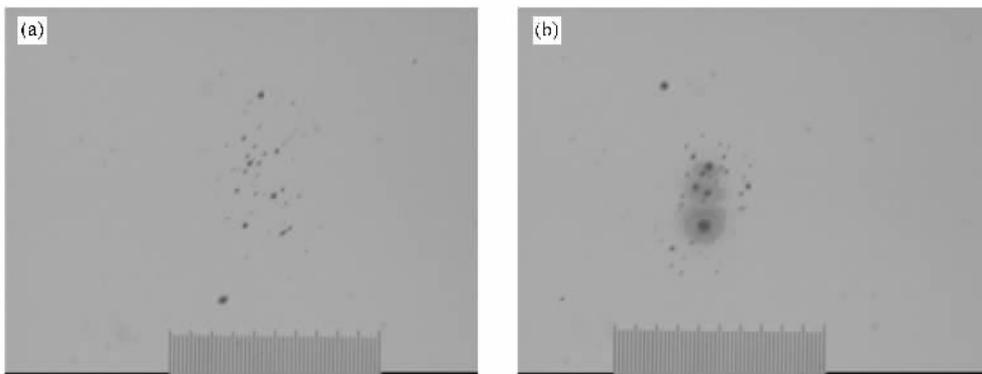


图 5 损伤形貌图(a)(b)分别为厚度 800 nm 和 1200 nm 薄膜的形貌图,标尺中每个大格代表 50  $\mu\text{m}$ )

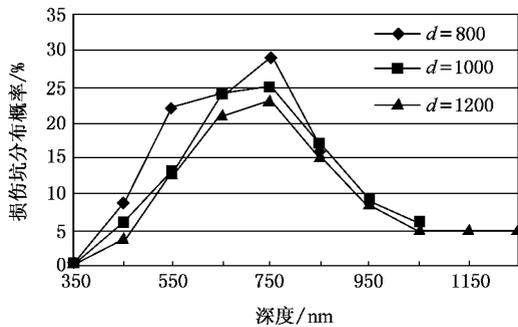


图 6 不同厚度的薄膜下,损伤坑深度分布概率与深度的关系(横坐标是深度位置变量,单位 nm.纵坐标是损伤坑分布概率.薄膜厚度分别为 800 nm,1000 nm,1200 nm)

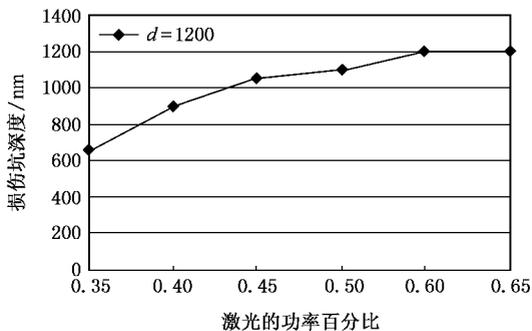


图 7 最大概率的损伤坑深度与激光功率密度的关系(横坐标是测试激光的功率百分比.纵坐标是最大概率分布的损伤坑深度.单位 nm.薄膜厚度为 1200 nm)

## 5. 结 论

本文由实验结果得出体杂质主导薄膜破坏的机理.由杂质吸收的热力学模型结合杂质尺寸分布的统计模型,得到了一定激光能量下,体缺陷主导薄膜破

坏时,不同厚度薄膜的损伤概率估算表达式.该模型还给出了能诱导薄膜破坏的体缺陷的尺寸范围,并分析了不同深度处的杂质诱导破坏的概率性差异.该模型得到的结果可以很好地解释实验结果.这里的体杂质统计模型是先前杂质统计模型的完善,它和表面杂质统计模型一起可以解释多数的实验结果。

- [ 1 ] Robert M , O 'Connell 1992 *Appl. Opt.* **31** 4143
- [ 2 ] Porteus J O , Seitel S C 1984 *Appl. Opt.* **23** 3796
- [ 3 ] Natooli J Y , Gallais L , Akhouayri H , Amra C 2002 *Appl. Opt.* **41** 3156
- [ 4 ] Bertussi B , Natoli J Y , Commandre M 2004 *Optics Communications* **242** 227
- [ 5 ] Xia Z L , Fan Z X , Shao J D 2006 *Applied Surface Science* **252** 8235
- [ 6 ] Dijon J , Poulingue M , Hue J 1998 *SPIE* **3578** 387
- [ 7 ] Xu X F , Willis D A 2002 *Journal of Heat Transfer* **124** 293
- [ 8 ] Alexandre S , Epifanov , Sergei V , Garnov 1981 *IEEE J. Quantum Electronics* **QE-17** 2023
- [ 9 ] Papermov S , Schmid A W 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 114906-1
- [ 10 ] Fan S H , He H B , Fan Z X , Shao J D , Zhao Y A 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 5774 ( in Chinese ) [ 范树海、贺洪波、范正修、邵建达、赵元安 2005 物理学报 **54** 5774 ]
- [ 11 ] Sun H Y , Jia T Q , Li X X *et al* 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 4736 ( in Chinese ) [ 孙海轶、贾天卿、李晓溪等 2005 物理学报 **54** 4736 ]

## Effect of bulk inclusion in films on damage probability

Xia Zhi-Lin<sup>1,2)†</sup> Shao Jian-Da<sup>1)</sup> Fan Zheng-Xiu<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Shanghai Institution of Optics and Fine Mechanics , Shanghai 201800 , China*

<sup>2</sup> *Graduate Schools , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*

( Received 30 November 2005 ; revised manuscript received 19 June 2006 )

### Abstract

From the relation between damage probability and density of surface inclusion , combining with the test results of XRD and laser induced damage , we have drawn a conclusion that bulk inclusions dominate the damage in these experiments . Combining thermal and mechanical processes of inclusion absorption and the statistical rule of inclusion density , we have deduced an equation describing the relation between damage probability and density of inclusions , power density of laser pulse , as well as thickness of films . From the model in this paper , we can see that the range of sizes in which the inclusions can initialize damage alter with the depth of inclusions . So density of the dangerous inclusions in different depth is different . The results from theory and from experiments are identical . This model can also interpret damage morphology .

**Keywords** : damage , laser , inclusion , films

**PACC** : 6180 , 7850 , 4630N , 6890