

CO₂ 脉冲激光辐照的 LiF 晶体中位错的产生和运动

周江 乔景文 邓佩珍

(中国科学院上海光机所)

Emergence and motion of dislocation in LiF single crystals irradiated by pulsed CO₂ laser light

Zhou Jiang, Qiao Jingwen, Deng Peizhen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

提要: 研究了 CO₂ 脉冲激光辐照 LiF 晶体的(100)面,在表面层引起的特征位错分布,它是由于表面层吸收辐照能量后产生的热弹应力引起的。

关键词: LiF, 位错

一、引言

近年来,激光在透明介质中引起的损伤被广泛地进行了研究。但是,人们对激光辐照在晶体中引入的位错却研究得并不多。

Y. Akashi^[1]曾经报道过用高强度硬膜 CO₂ 脉冲激光辐照 LiF 晶体的(100)面,可以在晶体中引入新的位错,并且认为这些位错也是一种激光辐照引起的损伤,但没有给出这些位错的性质和运动规律更详细的信息。虽然有人利用瞬时机械力研究过 LiF 晶体中位错的产生和运动^[2,3],但没有对激光脉冲作用下 LiF 晶体中位错的产生和运动做过研究。

我们用化学腐蚀方法显露 LiF 晶体中激光辐照位置周围的位错,用光学显微镜研究在激光辐照以后晶体中的残余应力场、位错的分布和激光损伤形态。

二、实验与结果

辐照源是 TEACO₂ 激光器,它的主要参数是:模式 TEM₀₀, 波长 10.6 μm, 脉冲宽度 400 ns, 脉冲能量约 0.1 J。实验装置简图如图 1 所示。

输出光束经透镜($f=200$ mm)聚焦在 LiF 晶体的(100)表面上,通过变化样品的位置改变焦斑尺寸。

所用的样品均是用解理的方法从大块晶体上解

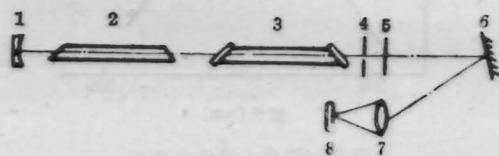


图1 实验装置简图

1—球面全反射镜; 2—TEACO₂ 激光管; 3—CWCO₂ 激光管; 4—光阑; 5—平面半反射镜; 6—反射镜; 7—透镜; 8—样品

理下来的,一般不再进行机械加工和抛光。用 X 射线定向,确定了 LiF 晶体的解理面为(100)面。

将激光辐照过的样品进行化学腐蚀。腐蚀剂为 30 ml 蒸馏水,加 3 滴浓度为 0.223 g/ml 的 FeCl₃ 水溶液,腐蚀时间为 150 s。结果发现,当功率密度大于 0.8 GW/cm² 时,在辐照位置周围产生有特征的位错分布,如图 2(a)所示。

可以看出,这个特征位错分布是由〈100〉方向滑移带组成的方形高位错密度区域,位错密度为 10⁹/cm² 数量级。在这个方形区域的外侧有〈110〉方向的滑移带,它们组成一个对称图形。

保持辐照功率密度不变,增加辐照的脉冲数,则位错密集的方形区域变大,并在中间产生沿〈100〉方向的解理微裂纹,〈110〉方向的滑移带变宽,长度则没有明显变化。图 2(c)是在正交偏光下观察到的辐照位置周围的典型残余应力场,它主要是由激光辐照后引入的应力场和位错的应力场这两部分组成的。

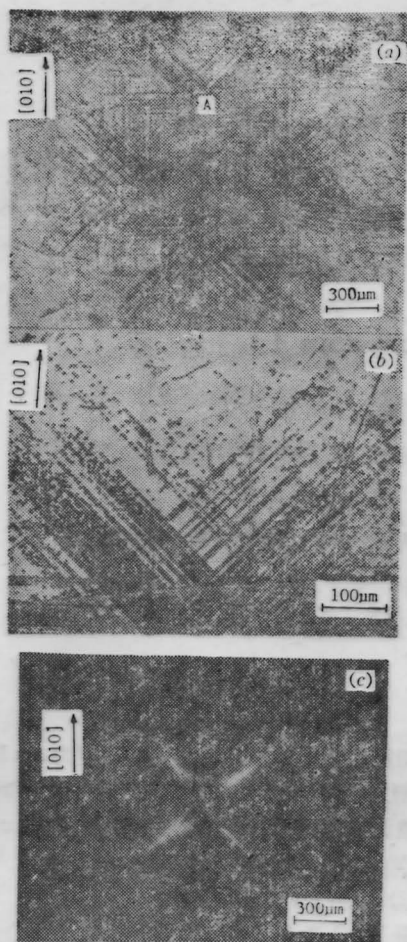


图 2
(a) 脉冲 CO₂ 激光辐照 LiF 晶体的 (100) 产生的特征位错分布; (b) (a) 图中位置 A 处的局部放大图; (c) 对应 (a) 中辐照位置周围的残余应力场

三、分析与讨论

因为 LiF 晶体的第一滑移系为 {110} <110>, 所以沿 <100> 方向的滑移带由螺型位错组成, 而沿 <110> 方向的滑移带则由刃型位错组成。

这种特征位错分布的出现, 可以归因于表面层吸收辐照能量而被加热所引起的热弹应力。事实上, 由于辐照强度 I 在焦点处是高斯分布, 而且在短时间 t_p (脉冲宽度) 内起作用,

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w_0^2) \quad (1)$$

式中 I_0 是光轴上的强度, w_0 是焦点处的高斯半径, r 是离开光轴的距离。那么, 在线性吸收的近似下, 表面的温度分布将服从同样的表达式。

由于在 $10.6 \mu\text{m}$ 的波长处 LiF 的吸收系数较

大, 所以可以认为光被完全吸收而不能透过样品, 即样品的厚度 $L \rightarrow \infty$, 利用这一简化条件, 可以得到表面的热弹性应力分布

$$\sigma = \frac{\alpha Y T_0}{1-\nu} \exp(-2r^2/w_0^2) = \sigma_0 \exp(-2r^2/w_0^2)$$

式中 Y 为杨氏模量, ν 为泊松比, α 为线性膨胀系数。将 $\alpha = 37 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $Y = 64.77 \times 10^3 \text{MPa}$ ^[4], 以及 $\nu = 0.187$ ^[5] 代入上式, 算得 $\sigma_0 \approx 8.9 \times 10^3 \text{MPa}$ 。在 LiF 晶体中, 位错均匀成核所需的应力大约为

$$\sigma_{\text{cri}} \approx G/30 = 1.8 \times 10^3 \text{MPa},$$

切变模量 $G = 55.12 \times 10^3 \text{MPa}$ ^[4]。所以, 在辐照位置周围位错能够均匀成核的区域尺寸为

$$r_{\text{cri}} \approx w_0 \sqrt{\frac{1}{2} \ln(\sigma_0/\sigma_{\text{cri}})} = 270 \mu\text{m}.$$

但实验中观察到的位错密集区域的尺寸约为 $400 \mu\text{m}$ 。这可以解释为, 在热弹应力的作用下, 位错在半径为 r_{cri} 的中心区域成核, 然后在应力的作用下运动所致。根据文献[3], 在这里给定的应力范围内, LiF 晶体中位错运动的速度是 10^5cm/s 的数量级, 在激光脉冲作用的时间内, 位错运动的距离约为 $100 \mu\text{m}$, 这样就和实验中观察到的结果吻合了。

测量了解理微裂纹的长度 L 以及宽度 D , $L \approx 550 \mu\text{m}$, $D \approx 10 \mu\text{m}$, 根据裂纹尺寸与外应力的关系^[6]

$$\sigma = GD/\alpha(1-\nu)L \quad (5)$$

其中 $\alpha \approx 1$, 把其它量的数值代入上式, 可以算出 $\sigma \approx 1.3 \times 10^3 \text{MPa}$, 和估算的应力在数量级上完全一致。

因此, 我们认为, 在脉冲 CO₂ 激光的作用下, LiF 晶体的表面层吸收辐照能量而被迅速加热, 产生的热弹应力使位错在半径约为 $270 \mu\text{m}$ 的区域内均匀成核, 然后, 这些位错以 10^5cm/s 的速度在 {110} <110> 滑移系内运动并且增殖, 最后形成观察到的特征位错分布。

感谢范福昌、于澍生同志对本工作的支持。

参 考 文 献

- 1 Yoshito AKASHI, *Japan. J. Appl. Phys.*, **14** (11), 1819 (1975)
- 2 P. Kumar et al., *J. Appl. Phys.*, **50**(7), 4747 (1979)
- 3 J. J. Gilman and W. G. Johnston, *J. Appl. Phys.*, **30**(2), 129 (1959)
- 4 李景镇, “光学手册”(陕西科学技术出版社, 西安, 1986), 第二十四章
- 5 Y. M. Gupta et al., *J. Appl. Phys.*, **46** (2), 532 (1975)
- 6 J. 弗里埃德尔, “位错”(科学出版社, 北京, 1984), p.221

(收稿日期: 1988年8月24日)