

# 掺氧化镁铌酸锂晶体的损伤阈值分析

苏卓琳 孟庆龙 于军立 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 在经典的双温模型中引入电子激发、载流子吸收等电离过程,建立了飞秒激光和晶体材料相互作用的理论模型。采用有限差分法数值模拟了在飞秒激光作用下,不同掺杂摩尔分数的MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体内电子、晶格温度随飞秒激光脉宽、激光能量密度的变化规律。并定量分析了不同掺杂摩尔分数的MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体材料的损伤阈值随脉宽的变化规律,以及掺杂浓度对晶体损伤阈值的影响。结果表明,在LiNbO<sub>3</sub>晶体中掺入适量的MgO将使载流子迁移率发生变化,进而会影响晶体的损伤阈值。在适当掺杂范围内,掺MgO的摩尔分数越高,载流子迁移率越大,晶体的损伤阈值越高。因此,实际应用中可通过在LiNbO<sub>3</sub>晶体中掺入适量的MgO来提高晶体的抗损伤能力。

**关键词** 掺氧化镁铌酸锂晶体;飞秒激光;损伤阈值;双温模型

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1116003

## Analysis of Damage Threshold of MgO-Doped LiNbO<sub>3</sub> Crystals

Su Zhuolin Meng Qinglong Yu Junli Zhang Bin

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

**Abstract** The theoretical model of the interaction between femtosecond lasers and crystal materials is established, in which the effects of electron excitation, carrier absorption and other ionizing process are coupled into the classical double-temperature model. The variations of the electron and lattice temperature with the pulse duration and fluence of femtosecond lasers in MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals with different doping concentration are numerically simulated by the finite-difference method. Furthermore, the variation of damage threshold with the femtosecond pulse width and influence in different doping concentration MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals, as well as the influence of doping concentration on damage threshold are analyzed quantitatively. Results show that, in appropriate doping range, with relatively higher MgO-doped concentration, the carrier mobility of MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals increases, and the damage threshold of the crystals becomes higher. Consequently, the resist damage capability of LiNbO<sub>3</sub> crystal may be raised by appropriate MgO doping in practical applications.

**Key words** MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals; femtosecond laser; damage threshold; double-temperature model

**OCIS codes** 160.2100; 140.3330; 140.3538; 140.6810

## 1 引言

铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体是一种集压电、铁电、电光、非线性等性能于一体的多功能晶体材料,具有良好的热稳定性和化学稳定性,在激光技术中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。然而,由于LiNbO<sub>3</sub>晶体的损伤阈值较低,在高功率激光作用下,很容易产生不可逆损伤<sup>[2]</sup>。20世纪80年代以来,人们发现在LiNbO<sub>3</sub>晶体中掺入微量的杂质会改变其微观机理,从而优化其某些性能<sup>[3-6]</sup>。然而,对LiNbO<sub>3</sub>晶体及其掺杂后,飞秒激光作用下晶体损伤特性的研究,目前仍处于探索阶段。

飞秒激光与材料的相互作用会产生诸如电子的光电激发(带间吸收、双光子吸收)、电子散射截面吸收、电

收稿日期:2015-07-20;收到修改稿日期:2015-08-08

基金项目:中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金项目(CAEP THZ201305)、四川省教育厅创新团队计划(13TD0048)

作者简介:苏卓琳(1992—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹方面的研究。E-mail:1615076262@qq.com

导师简介:张彬(1969—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。E-mail:zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

子向晶格能量弛豫等一系列的复杂的物理过程,促使材料温度升高,产生热扩散、热膨胀等物理现象。其中,热效应是激光辐照效应的重要过程,也是引起材料损伤的“元凶”之一<sup>[7]</sup>。对此,众多学者建立了相关模型来模拟飞秒激光作用于材料的热效应,例如,热传导模型、傅里叶模型、双温模型等<sup>[8-10]</sup>。其中,经典的双温模型在模拟飞秒激光烧蚀金属材料的热传导过程方面独树一帜。但是,由于晶体和金属在很多特性上都大相径庭,因此,在研究飞秒激光与晶体材料的相互作用时,经典的双温模型不再适用,需要对其做适当的修正。

对此,本文将电子激发<sup>[11-12]</sup>、载流子吸收<sup>[13]</sup>等电离过程的影响因素引入经典的双温方程,对双温模型进行了修正,从而建立了飞秒激光和晶体材料相互作用的理论模型;采用有限差分法数值模拟了在飞秒激光作用下,不同掺杂摩尔分数的 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体<sup>[14-20]</sup>内电子、晶格温度随飞秒激光脉宽、激光能量密度的变化情况;并以晶体内的电子、晶格系统平衡温度达到晶体的熔点作为晶体产生损伤的判断依据,在此基础上,进一步分析了不同掺杂摩尔分数的 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的损伤阈值随脉宽的变化规律以及掺杂对晶体损伤阈值的影响。

## 2 理论模型

飞秒激光辐照晶体表面后,趋肤层中电子吸收激光能量温度急剧升高,电子通过热传导方式将能量传递给周围的晶格,致使晶格温度随之上升,而电子温度则逐渐降低,最终电子与晶格达到热平衡状态。如果电子与晶格热平衡时的温度达到晶体的熔点,晶体就会发生不可逆损伤,因此,本文以晶体的晶格温度达到晶体的熔点作为晶体发生损伤的判定依据。

根据上述对飞秒激光作用于晶体的物理过程的描述,晶体中电子与晶格之间的传热过程可以采用双温模型来模拟<sup>[21-24]</sup>:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \kappa_e \nabla(\nabla T_e) - \varphi(T_e - T_l) + S, \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \kappa_l \nabla(\nabla T_l) + \varphi(T_e - T_l), \quad (2)$$

式中  $C_e$  和  $C_l$  分别为电子和晶格系统热容,且  $C_e = 3K_b n_l$ ,  $C_l = \rho c_p$ ,  $K_b$  是 Boltzmann 常数,  $n_l$  为晶体中自由载流子浓度,  $\rho$  为材料的密度,  $c_p$  为晶格系统单位体积的比热容;  $T_e$  和  $T_l$  分别为电子和晶格温度;  $\kappa_e$  与  $\kappa_l$  则为电子和晶格的热传导系数,且  $\kappa_e = 3K_b^2 \mu_0 T_e / 2e$ ,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $e$  为电子电量;  $\varphi(T_e - T_l)$  为电子系统在单位体积单位时间内耗散的能量;  $\varphi$  为电子与晶格的耦合系数,并且  $\varphi = 3K_b n_l / 2\tau_\xi$ ,  $\tau_\xi$  为电子与晶格相互作用的弛豫时间常数;  $S$  为激光热源项,即晶体吸收入射激光的能量。

晶体中自由载流子通过电离过程产生,其描述方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial n_l}{\partial t} = \eta(E)n_l + w_{pl}(E), \quad (3)$$

式中  $E$  是入射激光的场强;  $\eta(E)$  是雪崩电离速率;  $w_{pl}(E)$  是光致电离速率。

雪崩电离速率  $\eta(E)$  可以表示为

$$\eta(E) = \frac{v_s e E}{E_g} \exp\left[-\frac{E_i}{E(1 + E/E_{\text{phonon}}) + E_{KT}}\right], \quad (4)$$

式中  $v_s$  为饱和漂移速率;  $E_g$  为禁带宽度;  $E_{\text{phonon}}$ 、 $E_i$ 、 $E_{KT}$  分别为载流子克服光学声子散射、电离散射以及热散射效应所需的电场强度。

光致电离速率  $w_{pl}(E)$  可以表示为

$$w_{pl}(E) = \frac{2\omega}{9\pi} \left( \frac{\omega m^*}{\sqrt{\gamma_1} \hbar} \right)^{\frac{3}{2}} Q(\gamma, x) \times \exp\left[-\pi \langle x+1 \rangle \frac{\kappa(\gamma_1) - \zeta(\gamma_1)}{\zeta(\gamma_2)}\right], \quad (5)$$

式中  $\omega$  为入射激光频率;  $m^*$  为电子有效质量;  $\gamma$  为晶体的 Keldysh 参数,且  $\gamma = \omega(m^* E_g)^{1/2} / eE$ ,  $\gamma_1 = \gamma^2 / (1 + \gamma^2)$ ,  $\gamma_2 = 1 - \gamma_1 = 1 / (1 + \gamma^2)$ ,  $\langle x+1 \rangle$  表示  $x+1$  的整数部分;  $\kappa$ 、 $\zeta$  分别表示第一类、第二类完全椭圆积分。此外,

$$\begin{cases} Q(\gamma, x) = \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa(\gamma_2)}} \times \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left[-n\pi \frac{\kappa(\gamma_1) - \zeta(\gamma_2)}{\zeta(\gamma_1)}\right] \phi\left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2\langle x+1 \rangle - 2x+n}{\kappa(\gamma_2)\zeta(\gamma_2)}}\right] \\ x = \frac{2E_0}{\pi\hbar\omega} \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{\gamma} \zeta \frac{1}{1+\gamma^2} \\ \phi(z) = \int_0^z \exp(\gamma^2 - z^2) dy \end{cases} \quad (6)$$

激光热源项  $S$  为

$$S = I_0(1-R)\alpha \exp(-\alpha z) \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{t-1.5\tau}{\tau}\right)^2\right], \quad (7)$$

式中  $I_0$  为入射激光光强;  $R$  为晶体材料的表面反射率;  $z$  为激光的入射方向;  $\tau$  为飞秒激光的脉冲宽度;  $\alpha$  为晶体对入射飞秒激光的吸收系数<sup>[13]</sup>, 可表示为

$$\alpha = \frac{e^3 \lambda^2 n_i}{4\pi^2 \varepsilon_0 c^2 n m^* \mu}, \quad (8)$$

式中  $\lambda$  为入射激光波长;  $\varepsilon_0$  为真空绝对介电常数;  $c$  为真空中光速;  $n$  为折射率;  $\mu$  为载流子迁移率。

为了简化模型, 假设飞秒激光沿  $x$  方向垂直入射到晶体表面, 该过程中没有其他磁场作用, 且在飞秒脉冲激光作用时间内, 忽略晶体与周围环境的热交换, 采用绝热边界条件。经过上述处理后, (1)、(2) 式可简化为

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \kappa_e \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + S - \varphi(T_e - T_1), \quad (9)$$

$$C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \kappa_1 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \varphi(T_e - T_1). \quad (10)$$

### 3 计算方法

采用有限差分法结合初始条件和边界条件对双温方程进行数值求解<sup>[18-19]</sup>。用两簇平行直线  $x = x_k = k\Delta x$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ),  $t = t_j = j\Delta t$  ( $j=0, 1, 2, \dots$ ) 对  $xt$  平面进行网格剖分,  $\Delta x$  和  $\Delta t$  为  $x$  方向与  $t$  方向的空间步长、时间步长,  $k$  和  $j$  分别表示第  $k$  层与第  $j$  个时间, 节点为  $(x_k, t_j)$ , 其具体向前差分格式如图 1 所示。

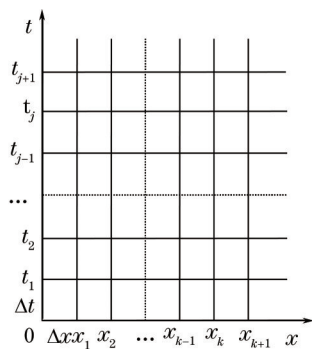


图 1 向前差分格式示意图

Fig.1 Chart of forward difference method

差分格式的数学表达式为

$$C_e \frac{T_{k,j+1}^e - T_{k,j}^e}{\Delta t} = \kappa_e \frac{T_{k+1,j}^e - 2T_{k,j}^e + T_{k-1,j}^e}{\Delta x^2} - \varphi(T_{k,j}^e - T_{k,j}^1) + I_0(1-R)\alpha \exp(-\alpha k\Delta x), \quad (11)$$

$$C_1 \frac{T_{k,j+1}^1 - T_{k,j}^1}{\Delta t} = \kappa_1 \frac{T_{k+1,j}^1 - 2T_{k,j}^1 + T_{k-1,j}^1}{\Delta x^2} + \varphi(T_{k,j}^e - T_{k,j}^1). \quad (12)$$

整理后可得:

$$T_{k,j+1}^e = \frac{\Delta t \kappa_e}{C_e \Delta x^2} T_{k+1,j}^e - \left( \frac{2\Delta t \kappa_e}{C_e \Delta x^2} + \frac{\Delta t \varphi}{C_e} - 1 \right) T_{k,j}^e + \frac{\Delta t \kappa_e}{C_e \Delta x^2} T_{k-1,j}^e + \frac{\Delta t \varphi}{C_e} T_{k,j}^e + \frac{\Delta t}{C_e} I_0(1-R)\alpha \exp(-\alpha k\Delta x), \quad (13)$$

$$T_{k,j+1}^1 = \frac{\Delta t \kappa_1}{C_1 \Delta x^2} T_{k+1,j}^1 - \left( \frac{2\Delta t \kappa_1}{C_1 \Delta x^2} + \frac{\Delta t \varphi}{C_1} - 1 \right) T_{k,j}^1 + \frac{\Delta t \kappa_1}{C_1 \Delta x^2} T_{k-1,j}^1 + \frac{\Delta t \varphi}{C_1} T_{k,j}^c. \quad (14)$$

初始条件:  $T_{k,0}=300 \text{ K}$   $k=(1,2,3,\dots,n)$ ,

边界条件:  $T_{n,j}=300 \text{ K}$   $j=(0,1,2,\dots,l)$ 。

根据初始条件和边界条件,由于第0层( $j=0$ )上的节点处的温度  $T_{k,0}$  已知,通过(13)、(14)式即可算出第一层( $j=1$ )节点处的温度值  $T_{k,1}$ 。重复运用该方程组,就可以解得整个时间域、空间域内的电子和晶格温度。

## 4 数值模拟与分析

### 4.1 激光和材料参数

对不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}(0\%):\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$  和  $\text{MgO}(6\%):\text{LiNbO}_3$  晶体分别在单脉冲飞秒激光辐照下产生的损伤进行了研究。入射激光中心波长为  $800 \text{ nm}$ ,工作温度为常温  $300 \text{ K}$ 。由于折射率属于材料的基本性能参数,基本上不受掺杂摩尔分数的影响<sup>[25]</sup>,因此,在晶体中掺入锂离子与铌离子的物质的量之比约等于1的情况下,入射激光中心波长为  $800 \text{ nm}$  的飞秒激光所对应  $\text{LiNbO}_3$  晶体材料折射率  $n=2.25$ <sup>[17]</sup>,并由  $R=(n_1-n_2)^2/(n_1+n_2)^2$  可知,所对应  $\text{LiNbO}_3$  晶体的反射率  $R=0.148$ ,其他主要参数<sup>[14,17]</sup>见表1。

表1 晶体的主要参数

Table 1 Main parameters of crystals

	$C_V/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\kappa_1/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\tau_\xi/\text{ps}$	$T/\text{K}$	$\mu/(\text{cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s})$
$\text{MgO}(0\%):\text{LiNbO}_3$						0.8
$\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$	648	4630	4.5	1	1530	30.6
$\text{MgO}(6\%):\text{LiNbO}_3$						70

### 4.2 脉宽对电子和晶格温度分布的影响

图2给出了在入射激光能量密度相同( $0.297 \text{ J/cm}^2$ )的情况下,脉冲宽度分别为  $200$ 、 $500$ 、 $800 \text{ fs}$  时,  $\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$  晶体中电子和晶格系统的温度随时间的变化。

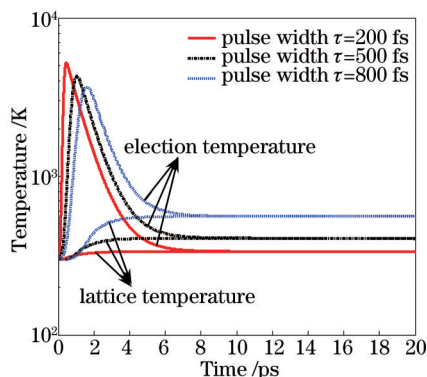


图2 不同脉宽的飞秒激光作用于  $\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$  晶体时电子和晶格温度随时间的变化

Fig.2 Evolution of election and lattice temperature of  $\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$  crystals with time for different pulse durations

从图2可以看出,电子在极短时间内迅速达到最高温度,然后将能量传递给晶格,使其温度上升,最后电子和晶格处于热平衡状态。进一步分析图2可知,飞秒激光的脉冲宽度越大,晶格和电子达到热平衡态时的温度越高。由此可见,当给定能量密度的飞秒激光作用于  $\text{LiNbO}_3$  晶体时,选取适当脉冲宽度的入射激光可以防止对晶体造成不可逆损伤。

图3给出了在入射激光能量密度相同( $0.297 \text{ J/cm}^2$ )的情况下,不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体中电子、晶格达到热平衡状态时,晶格温度随脉冲宽度的变化趋势。从图3可知,即使掺杂摩尔分数不同,  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的晶格温度均随脉冲宽度的增大而升高。并且,在脉宽相同的情况下,掺  $\text{MgO}$  的  $\text{LiNbO}_3$  晶体的晶格温度远远低于纯  $\text{LiNbO}_3$  晶体的晶格温度,且随着脉冲宽

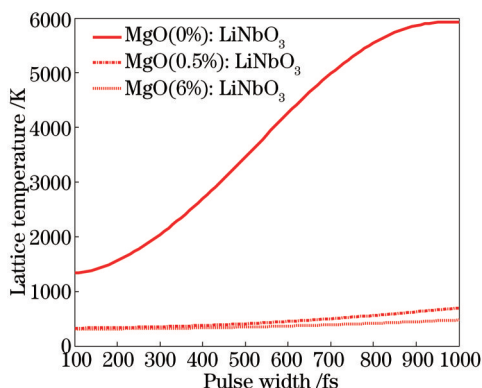


图3 不同掺杂摩尔分数的 MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体的晶格温度随激光脉宽的变化趋势

Fig.3 Evolution of lattice temperature of MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals with different pulse durations of laser for different doping concentrations 增大,掺杂摩尔分数越高的 LiNbO<sub>3</sub>晶体的晶格温度也明显低于低掺杂摩尔分数的 LiNbO<sub>3</sub>晶体的晶格温度。由此可见,当飞秒激光脉宽相同时,在 LiNbO<sub>3</sub>晶体中掺入 MgO 会影响平衡态时的晶格温度,且掺入 MgO 的摩尔分数越高,晶体晶格温度越低。主要原因是:随着掺杂摩尔分数升高,MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体中载流子的迁移率增大,致使平均自由时间延长,即一个载流子在相邻两次碰撞之间需要的平均时间增大<sup>[16]</sup>。飞秒激光在整个脉宽持续时间内,载流子之间的碰撞次数减少,电子传递给晶格的能量也随之下降,从而导致电子、晶格达到平衡态时晶格温度下降。

### 4.3 能量密度对电子和晶格温度分布的影响

图4是在入射激光脉冲宽度相同的情况下(100 fs),能量密度分别为 0.3、0.4、0.5 J/cm<sup>2</sup>时,MgO(0.5%):LiNbO<sub>3</sub>晶体中电子和晶格温度随时间的演变过程。

由图4可知,当电子和晶格达到热平衡时,晶格温度随入射激光能量密度增加而单调上升。这是因为激光脉宽相同时,入射激光能量密度越高,电子在短时间内吸收能量越多,晶格从电子处获得的能量也越多,因而达到平衡时晶格温度就越高。由此可见,对于给定脉宽的飞秒激光作用于 LiNbO<sub>3</sub>晶体时,选取合适的能量密度的入射激光可以避免对晶体造成损伤。

图5给出了在入射激光脉宽为 100 fs时,不同掺杂摩尔分数 MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体的电子、晶格温度达到热平衡态时,晶格温度随入射激光能量密度的变化趋势。

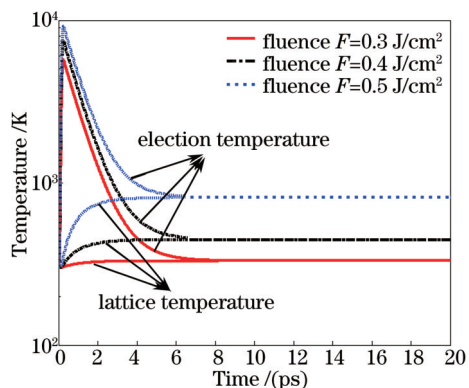


图4 不同能量密度的飞秒激光作用于 MgO(0.5%):LiNbO<sub>3</sub>晶体时电子和晶格温度随时间的变化

Fig.4 Evolution of election and lattice temperature of MgO(0.5%):LiNbO<sub>3</sub> crystals with time for different laser fluences

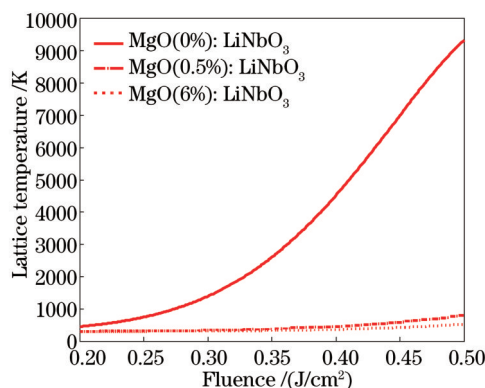


图5 不同掺杂摩尔分数的 MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体晶格温度随激光能量密度的变化

Fig.5 Evolution of lattice temperature of MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals with laser fluence for different doping concentrations

由图5可知,随着入射激光能量密度的增加,不同掺杂摩尔分数的 MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体的晶格温度均呈现上升趋势。然而,掺 MgO 的 LiNbO<sub>3</sub>晶体的晶格温度及其上升幅度均远小于纯 LiNbO<sub>3</sub>晶体的晶格温度及其上升幅度,且随着激光能量密度的增加,二者差距越加明显。由此可见,当激光脉宽相同时,要达到相同的晶格温度(如熔点),掺入 MgO 摩尔分数越高的 LiNbO<sub>3</sub>晶体所需要的激光能量密度越高,其抗损伤能力也相对

更强。分析其原因是:在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中掺入  $\text{MgO}$  的摩尔分数越高,载流子迁移率越大,载流子在相邻两次碰撞之间的平均时间越长,致使载流子碰撞几率降低,在飞秒激光脉冲持续期间,为了让不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体中的晶格温度上升至相同温度(如熔点),对于掺杂摩尔分数越高的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体,只有通过提高激光的能量密度,使电子在极短时间内吸收更多的激光能量,从而使晶格在每次碰撞中从电子处获得的能量增大。

#### 4.4 损伤阈值与脉宽的关系

为了进一步探究飞秒激光参数对  $\text{LiNbO}_3$  晶体抗损伤能力的影响,图6给出了在入射激光中心波长为 800 nm 飞秒激光作用下,不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值随激光脉宽的变化。

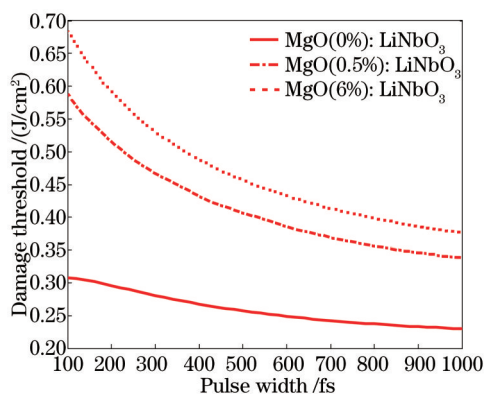


图6 不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值随脉宽的变化

Fig.6 Variations of damage thresholds of  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  crystals with different pulse durations of laser for different doping concentrations

从图6可以看出,即使在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中掺入的  $\text{MgO}$  摩尔分数不同,  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值均随脉冲宽度的增加而减小。并且,在整个脉宽变化范围内,掺杂  $\text{LiNbO}_3$  晶体损伤阈值均明显高于纯  $\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值。同时,当激光脉宽相同时,掺  $\text{MgO}$  摩尔分数越高,  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值也越高。例如,当脉宽为 100 fs 时,  $\text{MgO}(0\%):\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{MgO}(6\%):\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值依次为 0.308、0.588、0.684  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。这是因为在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中掺入适量的  $\text{MgO}$  后,会引起晶体中载流子迁移率的增大,根据(8)式可知,晶体对入射激光的吸收系数随着载流子迁移率的增大而减小,进而导致晶体对入射激光的吸收减弱。因此,在相同脉宽的飞秒激光作用下,晶格温度达到晶体熔点所需的激光能量提高,从而导致晶体的损伤阈值随着掺杂摩尔分数的增大而升高。因此,在三种晶体中,对于载流子迁移率最大的  $\text{MgO}(6\%):\text{LiNbO}_3$ ,其损伤阈值也最高,其次为  $\text{MgO}(0.5\%):\text{LiNbO}_3$  晶体,最后,  $\text{MgO}(0\%):\text{LiNbO}_3$  晶体的载流子迁移率最小,其损伤阈值也最低。

## 5 结 论

将电子激发、载流子吸收等电离过程的影响因素引入经典的双温方程,建立了飞秒激光和晶体相互作用的理论模型,进而以晶体内的电子、晶格系统平衡温度达到晶体的熔点作为晶体产生损伤的判定依据,建立了掺氧化镁铌酸锂晶体的损伤阈值预估模型。数值模拟了不同脉冲宽度和能量密度的入射激光作用下,不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体表面电子与晶格的温度的变化趋势。分析了不同掺杂摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体材料的损伤阈值随脉宽的变化规律,以及掺杂摩尔分数对晶体损伤阈值的影响。结果表明,当入射激光能量密度一定时,不同掺杂摩尔分数  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的晶格温度均随脉冲宽度的增大而升高;在入射激光脉宽相同的情况下,即使掺杂摩尔分数不同,  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的晶格温度均随入射激光能量密度增加而单调上升;当晶格温度达到晶体熔点时,掺不同摩尔分数的  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  晶体的损伤阈值也均随脉冲宽度增加呈减小趋势;在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中掺入适量的  $\text{MgO}$  会影响晶体中载流子的迁移率,进而影响晶体的损伤阈值。并且,在适当掺杂范围内,掺  $\text{MgO}$  摩尔分数越高,载流子迁移率越大,晶体的损伤阈值也越高。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Yulong, Tang Lei. Artificial Crystal: Growth Technology, Performance and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 130-134.

- 张玉龙, 唐 磊. 人工晶体—生长技术、性能与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 130–134.
- 2 Zhang Xuejiao, Ye Qing, Qu Ronghui, *et al.*. Research on damage on transparent electro-optic ceramic surface induced by nanosecond and femtosecond pulses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0706002.
- 张学娇, 叶 青, 瞿荣辉, 等. 纳秒激光和飞秒激光对透明电光陶瓷表面损伤研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0706002.
- 3 Kong Yongfa, Li Bing, Chen Yunlin, *et al.*. Study on the micro-mechanism of Mg-doped lithium niobate crystals against photorefractive [J]. J Infrared Millim Waves, 2003, 22(1): 40–44.
- 孔勇发, 李 兵, 陈云琳, 等. 掺镁铌酸锂晶体抗光折变微观机理研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(1):40–44.
- 4 Jin Chan, Li Minghua, Liu Jingsong, *et al.*. Study of anti photodamage mechanism of magnesium-doped lithium niobate crystal[J]. Acta photonica sinica, 1994,23(6): 530–533.
- 金 婵, 李铭华, 刘劲松, 等. 掺镁铌酸锂晶体抗光损伤机理的研究[J]. 光子学报, 1994, 23(6): 530–533.
- 5 Zhong Jiguo, Jin Jian, Wu Zhongkang. Measurements of optically induced refractive-index damage of lithium niobate doped with different concentration of MgO[J]. J Opt Soc Am, 1980, 70: 631.
- 6 Fu Bo, Zhang Guoquan, Zhao Lubing, *et al.*. Studies on the threshold effect of the ultraviolet-light-induced absorption change in congruent LiNbO<sub>3</sub>:Mg[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11): 1531–1534.
- 付 博, 张国权, 赵璐冰, 等. 同成分掺镁铌酸锂晶体紫外光致吸收阈值效应的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(11): 1531–1534.
- 7 Zhang Wei, Feng Qiang, Cheng Guanghua, *et al.*. Femtosecond laser-induced ablation regimes and thresholds in a nickel-based superalloy[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12):1232001.
- 张 伟, 冯 强, 程光华, 等. 飞秒激光对镍基合金的损伤机制和阈值行为[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1232001.
- 8 D Y Tzou, K S Chiu. Temperature-dependent thermal lagging in ultrafast laser heating[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 1725–1734.
- 9 T Q Qiu, C L Tien. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals[J]. J Heat Transfer, 1993, 115: 835–841.
- 10 I Anisimov, B L Kapaliavich, T L Perelman. Electron emission from metal surfaces exposed to ultra-short pulses[J]. Sov Phys JETP, 1974, 39(2): 375–378.
- 11 An-Chun Tien, Sterling Backus, Henry Kapteyn, *et al.*. Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration [J]. Physical Review Letters, 1999, 82(19): 3883–3886.
- 12 B Chimier, O Uteza, N Sanner, *et al.*. Damage and ablation thresholds of fused-silica in femtosecond regime[J]. Physical Review B, 2011, 84(9): 094104.
- 13 Dieter K Schroder, R Noel Thomas, John C Swartz. Free carrier absorption in silicon[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 1978, 13 (1): 180–187.
- 14 Luca Razzari, Paolo Minzioni, Ilaria Cristiani, *et al.*. Photorefractivity of hafnium-doped congruent lithium-niobate crystals[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(13): 131914.
- 15 Robert Gerson, J F Kirchoff, L E Halliburton, *et al.*. Photoconductivity parameters in lithium niobate[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(10): 3553–3557.
- 16 Simon M Sze, Kwok K Ng. Physics of Semiconductor Devices (3rd Edition)[M]. New York: Wiley, 2006.
- 17 David N. Nikogosyan. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey[M]. Wang Jiyang, Wu Yicheng Transl. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- 尼科戈相. 非线性光学晶体——一份完整的总结[M]. 王继扬, 吴以成译. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- 18 Zhang Zhigang. The Structure and Properties of Doped Lithium Niobate Crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- 张志刚. 掺杂铌酸锂晶体结构和性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- 19 Tu Xiaoni, Zheng Yanqing, Chen Hui, *et al.*. Growth and characterization of high homogeneity heavily MgO-doped lithium niobate crystals [J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(12): 1257–1262.
- 涂小牛, 郑燕青, 陈 辉, 等. 高均匀性高掺镁铌酸锂晶体的生长与表征[J]. 无机材料学报, 2010, 25(12): 1257–1262.
- 20 Sheng Fang, Chen Jun, Xia Zongren, *et al.*. A Novel method for measuring the laser damage threshold of crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 503–506.
- 盛 芳, 陈 军, 夏宗仁, 等. 对晶体光损伤阈值测量的一种新方法的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 503–506
- 21 Li Xiaolu, Li Jun, Tao Xiangyang. The thermal analysis of ultrashort laser pulse ablation on semiconductor surface[J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 624–629.
- 黎小鹿, 李 俊, 陶向阳. 超短激光烧蚀半导体表面的热效应分析[J]. 激光技术, 2007, 31(6): 624–629.

- 22 Shao Junfeng, Guo Jing, Wang Tingfeng. Theoretical research on dynamics of femtosecond laser ablation crystal silicon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014,43(8):2419-2424.  
邵俊峰, 郭 劲, 王挺峰. 飞秒激光与硅的相互作用过程理论研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8):2419-2424.
- 23 Ni Xiaochang, Wang Qingyue. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond picosecond pulse laser ablation on metal-surface[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(3): 277-280.  
倪晓昌, 王清月. 飞秒、皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. 中国激光, 2004, 31(3): 277-280.
- 24 Yang Qing, Du Guangqing, Chen Feng, *et al.*. Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502005.  
杨 青, 杜广庆, 陈 烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502005.
- 25 Li Minghua, Yang Chunhui, Xu Yuheng, *et al.*. Science Introduction of Photorefractive Crystal[M]. Beijing: Science Press, 2003: 87 - 108.  
李铭华, 杨春晖, 徐玉恒, 等. 光折变晶体材料科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 87-108.

栏目编辑: 张 雁