

飞秒激光烧蚀硅的瞬态演化特性仿真*

豆贤安,孙晓泉,徐海萍

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘要:为深入揭示飞秒激光烧蚀硅的瞬态演化特性,建立了飞秒激光烧蚀硅材料理论模型,并进行了仿真研究。研究表明:飞秒激光可在脉宽时间内激发大量的电子,使其浓度超过损伤阈值,而此时晶格仍保持在较“冷”状态,直到1 ns量级才达到熔点温度;电子温度也会在脉宽时间内急剧拉升至 10^4 K量级,随后将能量缓慢地释放给晶格,直到10 ns量级才与晶格达到热平衡。电子存在两次急剧升温的过程:第一次起于自由电子吸收,止于电子与晶格的能量耦合;第二次起于单光子和双光子吸收,止于脉冲结束。脉冲能量越大,电子密度和温度越高;脉宽越短,电子温度越高。

关键词:飞秒激光;激光烧蚀;冷破坏;硅;半导体

中图分类号:TN249 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)04-015-07

Simulation of transient evolution characteristics of silicon ablated by femtosecond laser

DOU Xianan, SUN Xiaoquan, XU Haiping

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to further reveal the transient evolution characteristics of silicon ablated by femtosecond laser, the theoretical model was established, and the numerical simulation was carried out. The results show that the femtosecond laser can excite a large amount of electrons with its density exceeding the damage threshold in the pulse duration. At that time, the lattice remains in a “cold” state until it reaches the melting point temperature as long as 1 ns order of magnitude. The temperature of electrons dramatically increases to 10^4 K level in the laser pulse irradiation moment. And then the energy is released slowly to lattice and the thermal equilibrium is reached until 10 ns order of magnitude. The electron has two rapid warming processes. The first one starts from the free-carrier absorption, and stops at the electron-lattice energy coupling; the second one starts from the single photon and two photon absorption, and ends at the end of the pulse. It is found that the higher the temperature and density of electron are, the bigger the pulse energy is and the shorter the pulse duration is.

Key words: femtosecond laser; laser ablation; cold damage; silicon; semiconductor

飞秒激光烧蚀材料不受目标材料初始状态的限制,烧蚀过程具有确定性和可控性,因此,飞秒激光在材料的精密加工、军事的反传感器等领域的应用具有诸多优势^[1]。飞秒激光具有高峰值功率、极短的作用时间以及非线性吸收等特点,使得飞秒激光脉冲可以通过电子激发造成材料结构的非热力学改变^[2-7]。根据非热等离子体模型,大量电子的激发可以直接造成晶格的扰动,同时仍使晶格的振动模式保持在较冷的状态^[8-9]。当价带有大约10%的电子被激发到导带时,就会导致晶格共价键的不稳,从而在极短的时间内引发晶格结构的永久性改变^[10-12]。因此,飞秒激光可以直接增强原子的活动性而不增加其热能。非热等离子体模型认为,所激发的电子系统的声子辐

射速率要慢于飞秒激光脉冲,所以飞秒激光可以在电子系统与晶格达到热平衡之前,就引发晶格结构的破坏。Stuart等^[13]的研究结果也表明,脉宽在10 ps以上的激光脉冲对材料的损伤机理为热损伤,满足傅里叶传热学的经典关系,损伤阈值与脉宽的1/2次方成正比;脉宽在10 ps以下的激光脉冲对材料的损伤属于非热损伤,其关系不再满足经典傅里叶传热学的理论,材料的损伤阈值近似与脉宽的0.3次方成正比。由于升温过程发生在皮秒时间范围内,皮秒以下脉冲的热扩散会显著减小,加之局部非平衡电子气的高压膨胀导致的高强度冲击波^[14],所以其对材料的损伤阈值将会变得更低。

目前,关于飞秒对材料烧蚀机理的研究仍不

* 收稿日期:2018-01-12

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金资助项目(SKL2014ZR04)

作者简介:豆贤安(1983—),男,安徽六安人,助理研究员,博士,E-mail:ankolkol@sina.com

完善^[15-19]。本文在深入分析飞秒激光与硅(Si)材料相互作用激发的微观弛豫过程的基础上,建立合理的理论模型。

1 理论模型

在飞秒激光的作用下,Si材料要经历一系列比较复杂的微观弛豫过程。首先价带电子在飞秒激光的瞬时高强度光场激励下,会以单光子或多光子吸收的形式跃迁到导带,或将导带中的自由电子激发到更高能态,进而产生碰撞电离;然后被激发的自由电子通过电子间的散射,在10 fs量级的时间内与激发光场消相,成为真正意义上的自由电子。这些电子获得了飞秒激光提供的能量,瞬时温度远远超过了晶格,严重偏离了热平衡状态。它们会通过电子间的散射和电子与声子的散射将能量不断地传递给晶格。之后,过剩自由电子通过多种复合机制或扩散机制,最终返回价带或移出激发区域,材料最终恢复热平衡状态。如果飞秒激光的能量较高,还会导致晶格材料不可逆转的永久性破坏。有关研究表明^[13],当激光脉宽小于10 ps量级时,激光脉冲对材料的损伤会逐渐由常规的热力学破坏转变为非热力学的“冷”破坏。下面将进行具体分析。

1.1 电子密度的演化机制

当飞秒激光照射Si材料时,如果光子的能量大于半导体的禁带宽度,则单光子吸收是主要的吸收机制。而Si是间接带隙半导体材料,价带电子无法直接进行单光子吸收跃迁,它需要声子的辅助才能跃迁到导带,如图1(a)所示。当飞秒激光强度较高时,会引发双光子吸收或多光子吸收,如图1(b)所示。自由电子或自由空穴也会吸收光子,跃迁到导带或价带更高的能级。自由电子的光吸收虽然不会增加自由电子的数量,但会增加自由电子的能量,如图1(c)所示。如果有些电子被激发到导带很高的能级上,则有可能通过碰撞使价带电子电离到导带,如图1(d)所示。碰撞电离会增加自由电子数量,但不会改变自由电子系统的总能量。

在飞秒激光激发使得自由电子数量增加的同时,存在相关的复合机制,会使自由电子的数量减少。这些机制主要有辐射复合、俄歇复合、缺陷或表面复合,如图2所示。

辐射复合是光激发的逆过程,过剩自由电子的能量会以光子的形式释放,如图2(a)所示。由于Si是间接带隙材料,导带中的电子难以满足动量守恒条件,所以辐射复合的概率很小,可以忽

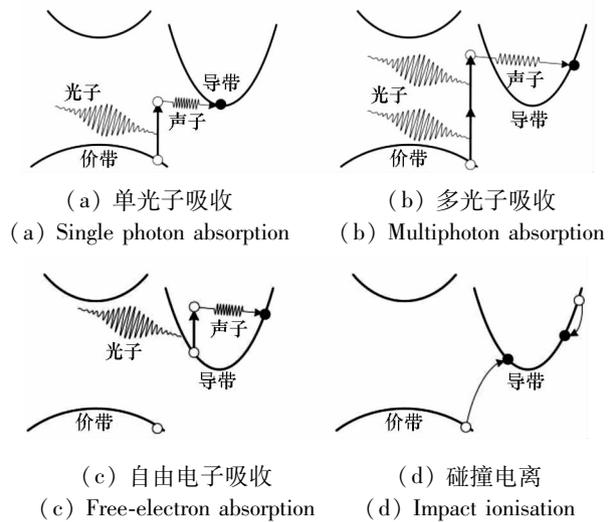


图1 飞秒激光引发Si材料的自由电子产生机制

Fig. 1 Generation mechanisms of free electron in Si materials induced by femtosecond laser

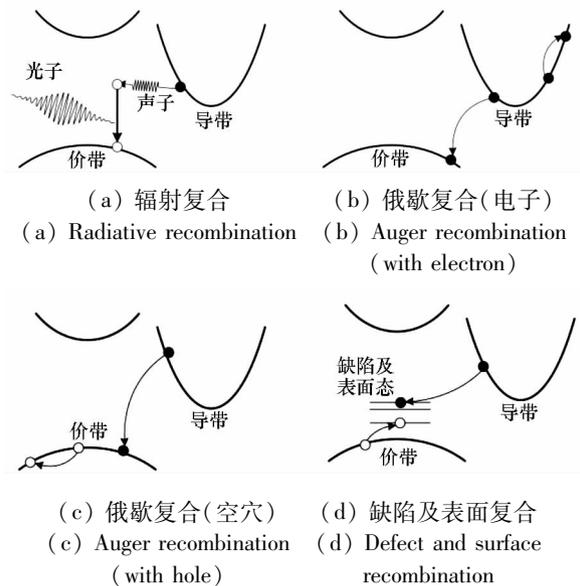


图2 Si材料中自由电子的复合机制

Fig. 2 Recombination mechanisms of free electron in Si materials

略。在俄歇复合中,一个电子和一个空穴复合所产生的能量会将另一个电子激发到导带更高的能级,或将空穴激发到价带更低的能级,如图2(b)、图2(c)所示。与其他复合机制一样,俄歇复合也会减少自由电子的数量,但不改变电子系统的能量,因此,剩余自由电子的平均能量将会增加。由于俄歇复合率与自由电子密度的3次方成正比,所以在强飞秒激光激发的条件下,其为主要的复合机制。在缺陷或表面复合中,自由电子的过剩能量会释放给缺陷或表面态,从而使自由电子的数量和能量都减少,如图2(d)所示。由于缺陷或表面复合产生在10 ns量级的时间尺度,其对飞

秒激光激发烧蚀的影响较小。

自由电子的扩散作用会将自由电子从材料的激发区域内移出,导致电子密度降低,因此与复合过程相比它不会减少材料内自由电子的数量和总能量。当激发的自由电子密度过高时,高浓度的自由电子会使能带间隙减小,从而产生自由电子限制效应,使自由电子向带隙更小的方向移动,进而减慢扩散的速度。因此,自由电子的扩散效应影响较小。

综上所述,飞秒激光作用于 Si 材料引发的电子浓度的瞬态变化可以描述为^[20-21]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\alpha I}{h\nu} + \frac{\beta I^2}{2h\nu} + \theta n - \gamma' n^3 - \nabla J \quad (1)$$

其中,方程右边前三项分别为单光子吸收、双光子吸收、碰撞电离,第四项描述俄歇复合,最后一项描述电子扩散。 $t, n, h, \nu, \alpha, \beta, \theta, \gamma', I, J$ 依次为时间、电子密度、普朗克常数、光子频率、单光子吸收系数、双光子吸收系数、碰撞电离常数、考虑电子屏蔽效应的俄歇复合常数、飞秒激光强度、电子流密度。

飞秒激光光强的时空分布可表示为:

$$I(r, t) = \sqrt{\frac{4 \ln 2 (1-R)}{\pi}} \frac{I_0}{t_p} \exp \left[-\frac{r^2}{\omega_0^2} - 4 \ln 2 \frac{(t-3t_p)^2}{t_p^2} \right] \quad (2)$$

式中, r, t_p, I_0, ω_0 分别为半径、脉冲宽度、脉冲能量密度、光束腰斑半径。

电子流密度可表示为:

$$J = -D \left(\nabla n + \frac{n}{2k_B T_e} \nabla E_g + \frac{n}{2T_e} \nabla T_e \right) \quad (3)$$

其中, D, k_B, T_e, E_g 依次为扩散率、Boltzmann 常数、电子温度、禁带宽度。Si 的禁带宽度(单位: eV)受晶格温度 T_1 和电子密度影响^[20]:

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T_1^2}{T_1 + 1108} - 1.5 \times 10^{-8} n^{1/3} \quad (4)$$

1.2 电子系统能量的演化机制

飞秒激光将电子激发到较高的能态,使电子系统的能量大幅增加,所激发的电子会在电子与电子散射和电子与声子散射的作用下,在导带和价带重新分布。电子与电子的散射是两个电子之间的静电相互作用的双体过程,它能在 10 fs 量级的时间内,造成电子的相干失相,使其动量随机化。电子与电子的散射不会改变电子系统的总能量和数量。在电子与声子散射过程中,电子通过吸收或辐射声子与晶格交换动量和能量,来完成动量和能量的弛豫,它可以使电子在 100 fs 量级

的时间内达到费米-狄拉克分布。同时,高能自由电子的扩散和热传导会使局地自由电子能量降低,但整个电子系统的能量将保持不变。因此,自由电子系统的能量变化率可以表述为^[20]:

$$\frac{\partial U_e}{\partial t} = \alpha I + \beta I^2 + \theta n I - \nabla W - \frac{C_e}{\tau_e} (T_e - T_1) \quad (5)$$

式中,等号右边前三项分别表示电子系统通过单光子吸收、双光子吸收和自由电子吸收获取的能量,第四项为自由电子因扩散和热传导损失的能量,最后一项为电子系统向晶格系统耦合的能量。其中, θ 为自由电子吸收系数, τ_e 为电子晶格耦合能量时间; U_e, W, C_e 依次为自由电子系统的总能量密度、能流和热容,相关表达式如下:

$$U_e = n(E_g + 3k_B T_e) \quad (6)$$

$$W = (E_g + 4k_B T_e) J - 2\kappa_e \nabla T_e \quad (7)$$

$$C_e = 3nk_B + n \frac{\partial E_g}{\partial T_e} \quad (8)$$

其中, κ_e 为自由电子的热导率。

1.3 晶格系统能量的演化机制

飞秒激光可在作用初始的瞬间激发出大量的自由电子,从而导致材料晶格大量共价键的断裂,所以飞秒激光可以直接增强原子的活动性而不增加其热能。当有大约 10% 的共价键断裂时,就会造成晶格不可恢复的改变,如图 3 所示。因此,飞秒激光能在极短的时间内引发晶格结构的永久性改变,它可以使晶格在被破坏的同时仍保持在较冷的状态的振动模式。晶格系统在经历初始的飞秒激光引起非热力学扰动后,还会继续吸收高能自由电子系统耦合过来的能量,经历普通的热力学过程,服从热传导方程^[21]:

$$C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \nabla (\kappa_1 \nabla T_1) + \frac{C_e}{\tau_e} (T_e - T_1) \quad (9)$$

式中, C_1, κ_1 为材料的热容和热导率。

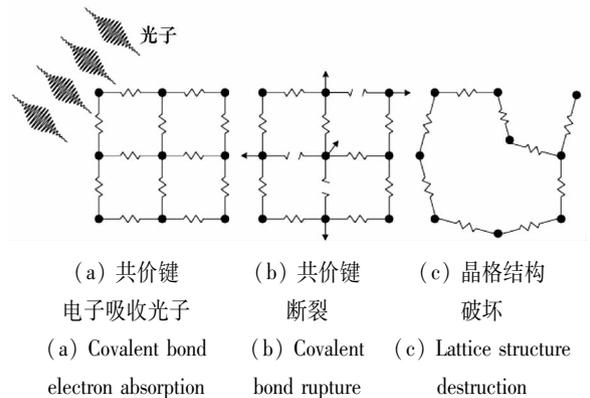


图3 飞秒激光引发晶格非热力学扰动机制
Fig. 3 Lattice non-thermodynamic disturbance mechanisms induced by femtosecond laser

由式(1)、式(5)、式(9)构建的理论模型可较为合理地描述飞秒激光烧蚀 Si 材料的内部机理。

2 数值仿真

运用时域有限差分法对理论模型数值求解。仿真研究了飞秒激光引发 Si 材料表面的电子密度、电子温度和晶格温度的时域演化特性,以及它们随脉冲能量和脉冲宽度的变化关系。仿真模型中相关参数取值见表 1。

表 1 模型参数^[20-21]
Tab. 1 Model parameter^[20-21]

参数	名称	取值
α/cm^{-1}	单光子吸收系数	$5.02 \times 10^3 \exp(T_1/430)$
$\beta/(\text{cm}/\text{GW})$	双光子吸收系数	2.0
θ/cm^2	自由电子吸收系数	$1.2 \times 10^{-18} T_1/300$
θ/s^{-1}	碰撞电离系数	$10^{11} [(U_e - E_g)/\text{eV}]^{4.6}$
$\gamma/(\text{cm}^6/\text{s})$	俄歇系数	3.8×10^{-31}
t_{\min}/ps	最小俄歇寿命	6.0
$\gamma'/(\text{cm}^6/\text{s})$	俄歇屏蔽系数	$\gamma/(1 + \gamma n^3 t_{\min})$
$C_l/(\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K}))$	晶格热容	2.236 8
$\kappa_l/(\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K}))$	晶格热导率	$1585 T_1^{-1.23}$
$\kappa_e/(\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K}))$	电子热导率	$(7.13 T_e - 556) \times 10^{-5}$
$D/(\text{cm}^2/\text{s})$	电子扩散系数	$2.98 \times 10^{-3} T_e$
τ_e/fs	电子晶格耦合能量时间	$240 [1 + (n/n_{\text{sc_sh}})^2]$
$n_{\text{sc_sh}}/\text{cm}^{-3}$	屏蔽电子密度	6×10^{20}
$n_{\text{crit}}/\text{cm}^{-3}$	阈值电子密度	1.12×10^{21}
$n_{\text{init}}/\text{cm}^{-3}$	初始电子密度	10^{16}

2.1 秒激光烧蚀 Si 材料的基本特征

在波长 800 nm、脉宽 50 fs、脉冲能量密度 $15.3 \text{ J}/\text{cm}^2$ 的飞秒激光(见图 4)作用下, Si 材料表面的电子密度瞬态演化、相关机制对其贡献如图 5~7 所示。以上的仿真结果显示,飞秒激光作用于 Si 表面的瞬间就激发了大量的自由电子,电子密度在飞秒激光脉冲宽度的时间尺度内达到了最大值,且超过了损伤阈值浓度,之后开始缓慢下降,能在较长的时间尺度内维持较高的浓度。

在飞秒激光脉冲前沿强度较低时,主要表现为单光子激发跃迁;当激光接近峰值的较大强度时,双光激发跃迁的贡献迅速占据主导;同时碰撞电离的贡献也随之增强,且随着电子密度的增大在激光脉冲结束后仍在持续增强,这主要是因为

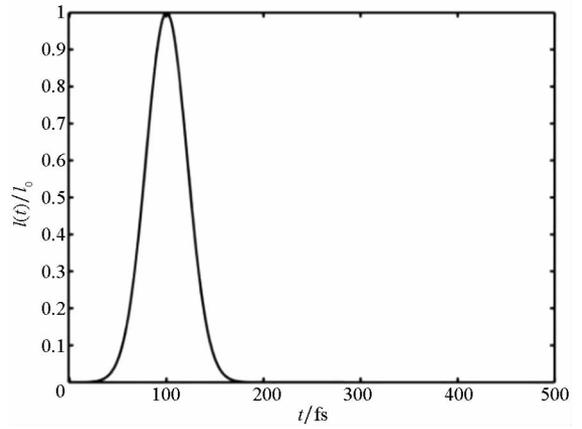


图 4 飞秒激光的时域分布

Fig. 4 Time domain distribution of femtosecond laser

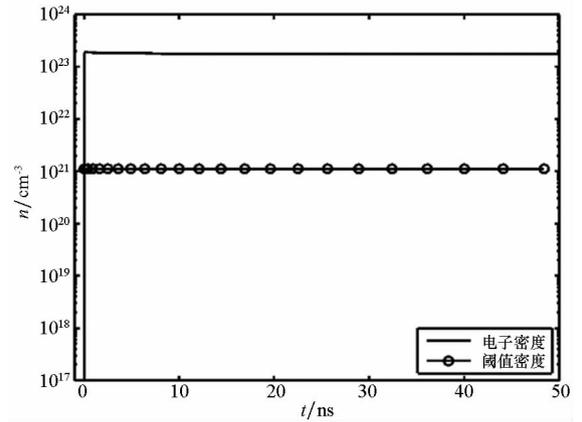


图 5 电子密度的长时演化

Fig. 5 Long time evolution of electron density

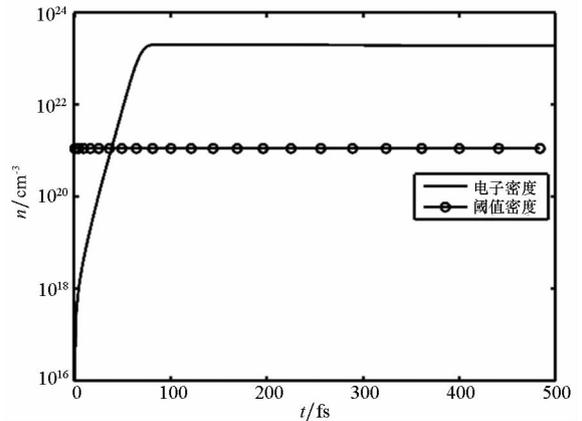


图 6 电子密度的短时演化

Fig. 6 Short time evolution of electron density

脉冲结束后双光子激发的自由电子含有较大的过剩能量,可以维持碰撞电离的持续。随着电子密度的增加,俄歇复合率也迅速增强,导致自由电子的浓度大量消耗,是自由电子形成的初期的重要因素。

飞秒激光引发电子和晶格温度的瞬态演化如图 8、图 9 所示。

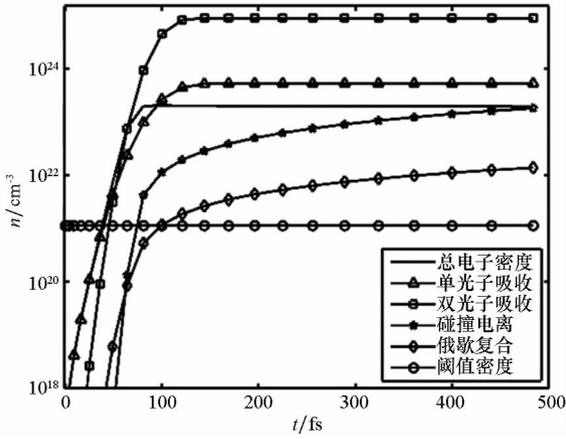


图7 相关机制对总电子密度的瞬态贡献
Fig. 7 Transient contribution of the related mechanisms to the total electron density

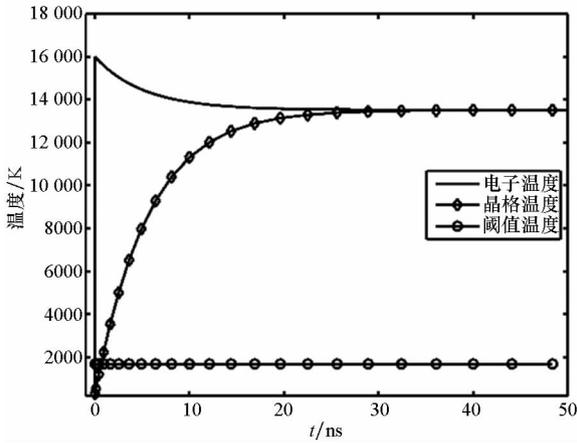


图8 电子和晶格温度的长时演化
Fig. 8 Long time evolution of electron and lattice temperature

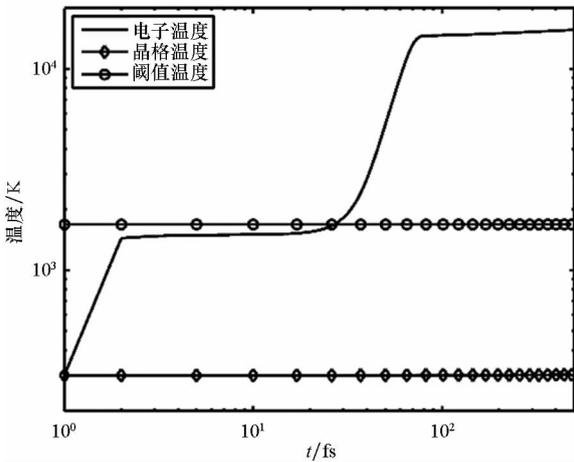


图9 电子和晶格温度的短时演化
Fig. 9 Short time evolution of electron and lattice temperature

由图8~9可见,Si材料在受到飞秒激光辐照时,自由电子的温度急剧上升,在脉冲持续时间内达到最大值,最高可达到16 000 K,而在这个时间尺度内晶格温度几乎没有变化。随着时间的推移

移,电子的温度逐渐降低,晶格的温度逐渐升高,直到30 ns左右才有可能最终达到热平衡状态。实际上随着电子系统的能量向晶格的传递,晶格在1 ns左右就达到了融化的阈值温度。

进一步分析发现电子温度存在两个急剧拉升的状态,第一个发生在脉冲前沿的10 fs时间尺度内,第二个发生在主脉冲持续阶段。第一次急剧升温主要是材料本征载流子的自由电子吸收导致的。随着电子温度的升高,其能量向晶格耦合的速率也随之增大,导致电子升温的速率降低,曲线斜率趋于平缓。随着主脉冲的到来,单光子和双光子吸收相继占据主导,电子温度又出现一次大幅拉升。

通过以上的仿真结果发现,飞秒激光激发的电子密度在50 fs以内就超过了Si材料的临界值,而此时晶格的温度几乎没有改变,直到1 ns左右晶格的温度才达到熔点。由此可以判断飞秒激光主要是以电子激发损伤Si材料,损伤时晶格仍保持在较“冷”的状态。

2.2 脉冲能量的影响

飞秒激光能量密度的变化对电子密度、温度和晶格温度的影响如图10~13所示(仿真条件:脉宽为50 fs,能量密度分别为0.02 J/cm²和0.2 J/cm²)。

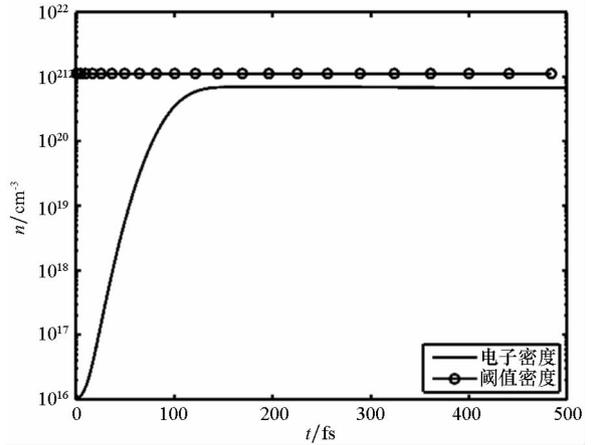


图10 电子密度的瞬态演化(0.02 J/cm²)

Fig. 10 Transient evolution electron density (0.02 J/cm²)

从仿真的结果可以看出,电子的浓度和温度都随着能量密度的增大而增大。

2.3 脉冲宽度的影响

飞秒激光脉宽的变化对电子密度、温度和晶格温度的影响如图14~17所示(仿真条件:能量密度为2 J/cm²,脉宽分别为100 fs和500 fs)。

从仿真结果可以看出,随着脉冲宽度的变大,电子密度的增加逐渐放缓,但最大浓度基本相同。随着脉宽变大,电子温度的增加也逐渐放缓,且电子被激发的最高温度也逐渐减小。

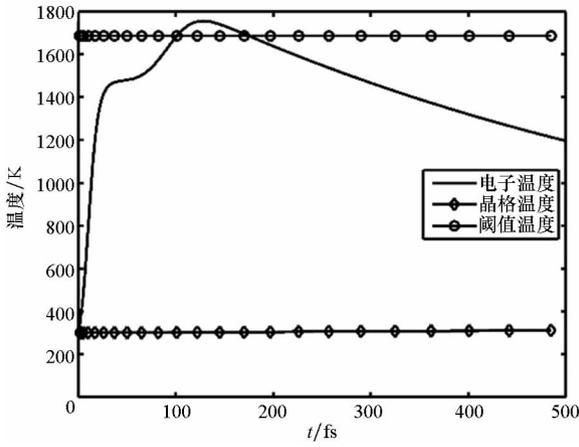


图 11 电子和晶格温度的瞬态演化(0.02 J/cm²)
 Fig. 11 Transient evolution of electron and lattice temperature (0.02 J/cm²)

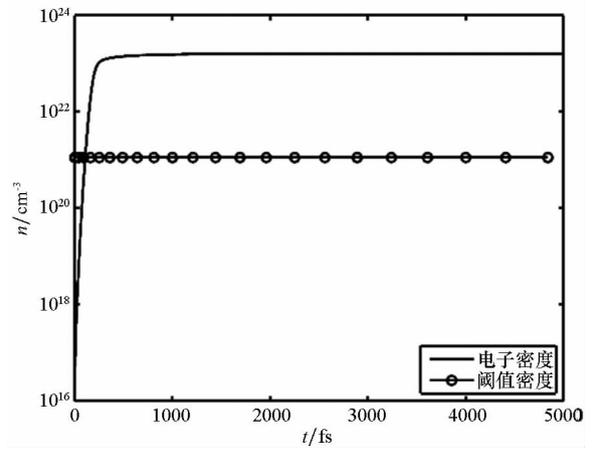


图 14 电子密度的瞬态演化(100 fs)
 Fig. 14 Transient evolution of electron density (100 fs)

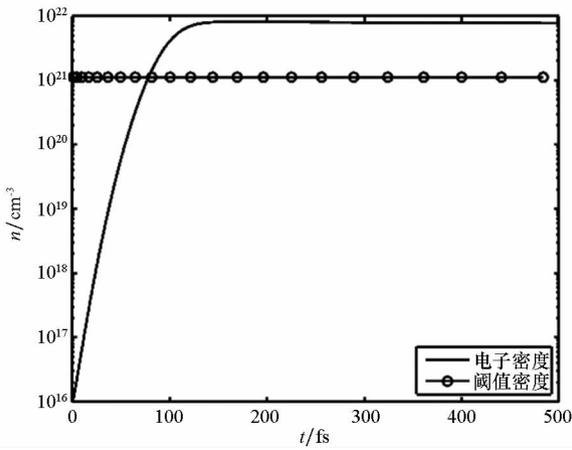


图 12 电子密度的瞬态演化(0.2 J/cm²)
 Fig. 12 Transient evolution of electron density (0.2 J/cm²)

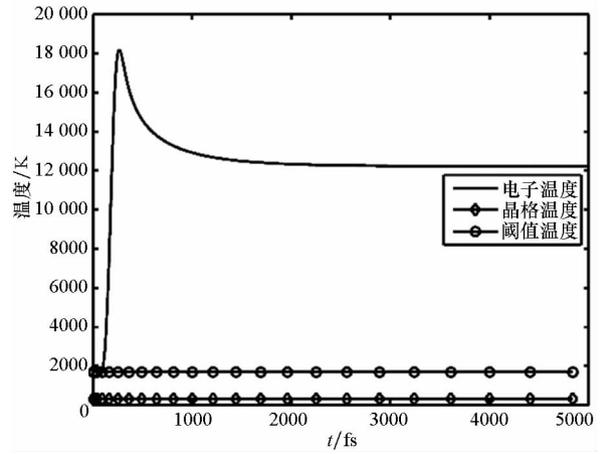


图 15 电子和晶格温度的瞬态演化(100 fs)
 Fig. 15 Transient evolution of electron and lattice temperature (100 fs)

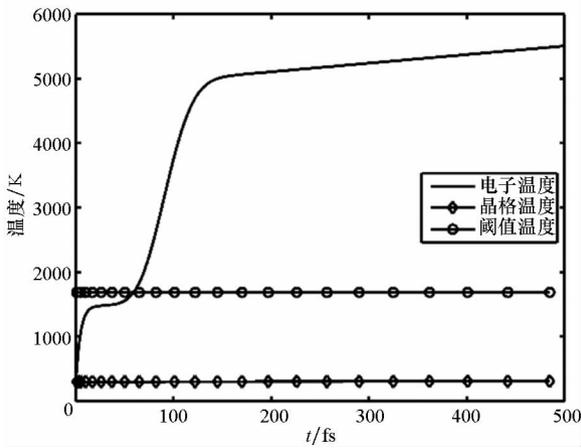


图 13 电子和晶格温度的瞬态演化(0.2 J/cm²)
 Fig. 13 Transient evolution of electron and lattice temperature (0.2 J/cm²)

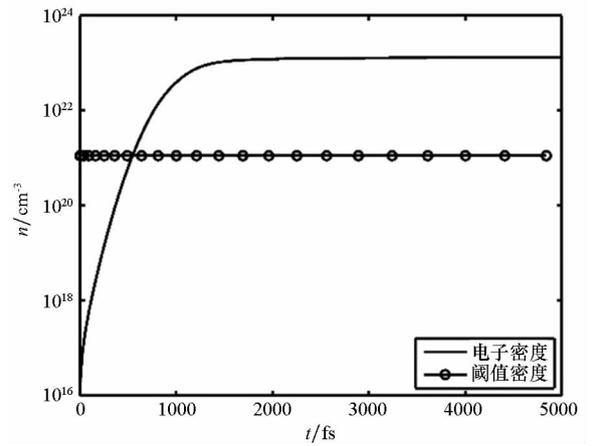


图 16 电子密度的瞬态演化(500 fs)
 Fig. 16 Transient evolution of electron density (500 fs)

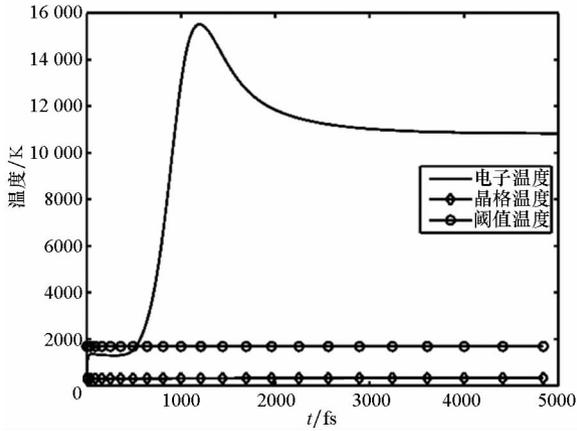


图 17 电子和晶格温度的瞬态演化(500 fs)

Fig. 17 Transient evolution of electron and lattice temperature (500 fs)

3 结论

在深入分析飞秒激光激发 Si 材料内部微观弛豫机制的基础上,建立了飞秒激光烧蚀 Si 材料理论模型,并进行了仿真研究。研究表明,飞秒激光可在脉宽时间尺度内激发出大量的自由电子,使其超过损伤阈值,而此时晶格的温度还来不及改变,仍保持在较“冷”的状态,直到 1 ns 左右才达到熔点温度。飞秒激光作用的瞬间电子的温度也会在脉宽时间尺度内急剧拉升至 10^4 K 量级,之后通过电子与声子的散射将能量缓慢地释放给晶格,直到 10 ns 量级的时间尺度才与晶格达到热平衡。飞秒激光作用的瞬间,自由电子存在两次温度急剧拉升的阶段。材料本征载流子的自由电子吸收主导了第一阶段升温,并止于电子与晶格的能量耦合,单光子和双光子吸收开启了第二阶段升温。脉冲能量越大,电子密度和温度越高;脉宽越宽,所能激发最大的电子温度越低,而电子密度几乎不变。

参考文献 (References)

[1] 王丽梅. 飞秒激光烧蚀硅的分子动力学模拟[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.
WANG Limei. Molecular dynamics simulations of femtosecond laser ablation of silicon[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)

[2] Shank C V, Yen R, Hirlmann C. Time-resolved reflectivity measurements of femtosecond-optical-pulse-induced phase transitions in silicon[J]. Physical Review Letters, 1983, 50: 454 - 457.

[3] Siegal Y, Glezer E N, Mazur E. Dielectric constant of GaAs during a subpicosecond laser-induced phase transition[J]. Physical Review B (Condensed Matter), 1994, 49 (23): 16403 - 16406.

[4] Siegal Y, Glezer E N, Huang L, et al. Laser-induced phase transitions in semiconductors[J]. Annual Review of Materials

Science, 1995, 25(1): 223 - 247.

[5] Downer M C, Shank C V. Ultrafast heating of silicon on sapphire by femtosecond optical pulses[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(7): 761 - 764.

[6] Preston J S, van Driel H M, Sipe J E. Order-disorder transitions in the melt morphology of laser-irradiated silicon[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(1): 69 - 72.

[7] Saeta P N, Wang J K, Siegal Y, et al. Ultrafast electronic disordering during femtosecond laser melting of GaAs[J]. Physical Review Letters, 1991, 67: 1023 - 1026.

[8] van Vechten J A, Tsu R, Saris F W, et al. Reasons to believe pulsed laser annealing of Si does not involve simple thermal melting[J]. Physics Letters A, 1979, 74(6): 417 - 421.

[9] van Vechten J A, Tsu R, Saris F W. Nonthermal pulsed laser annealing of Si; plasma annealing[J]. Physics Letters A, 1979, 74(6): 422 - 426.

[10] Stampfli P, Bennemann K H. Theory for the laser-induced femtosecond phase transition of silicon and GaAs[J]. Applied Physics Materials Science & Processing, 1995, 60(2): 191 - 196.

[11] Silvestrelli P L, Alavi A, Parrinello M, et al. Ab initio molecular dynamics simulation of laser melting of silicon[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(15): 3149 - 3152.

[12] Graves J S, Allen R E. Response of GaAs to fast intense laser pulses[J]. Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics), 1998, 58(20): 13627 - 13633.

[13] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M, et al. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(12): 2248 - 2251.

[14] Bernath R, Brown C G, Aspiotis J, et al. Shock-wave generation in transparent media from ultra-fast lasers[J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6219: 62190A.

[15] Marquis E, Pocholle J. Novel applications of femtosecond laser in missile countermeasures[J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5989: 239 - 248.

[16] 阮吉崧, 彭滢, 朱亦鸣, 等. 飞秒激光烧蚀硅表面产生微纳结构过程中激光脉冲数目的影响[J]. 光学技术, 2011, 37(2): 245 - 248.
RUAN Zhaosong, PENG Yan, ZHU Yiming, et al. Influence of the number of femtosecond laser pulses on femtosecond laser ablation silicon surface producing micro-nano structure[J]. Optical Technique, 2011, 37(2): 245 - 248. (in Chinese)

[17] 任欢, 王俊波, 邱荣, 等. 飞秒脉冲烧蚀单晶硅的超快动力学[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2787 - 2790.
REN Huan, WANG Junbo, QIU Rong, et al. Ultrafast dynamics of intense femtosecond laser ablation of silicon[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24 (12): 2787 - 2790. (in Chinese)

[18] 林晓辉, 陈海全, 蒋书运, 等. 飞秒激光辐射材料的Coulomb爆炸烧蚀理论模型研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(3): 288 - 295.
LIN Xiaohui, CHEN Haiquan, JIANG Shuyun, et al. A Coulomb explosion theoretical model of femtosecond laser ablation materials[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2012, 42(3): 288 - 295. (in Chinese)

[19] 房然然. 高能激光烧蚀靶材动力学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
FANG Ranran. Dynamic research of high-energy laser ablation of target [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)

[20] Zeng X, Mao X L, Greif R, et al. Experimental investigation of ablation efficiency and plasma expansion during femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon[J]. Applied Physics A, 2005, 80(2): 237 - 241.

[21] Thorstensen J, Erik Foss S. Temperature dependent ablation threshold in silicon using ultrashort laser pulses[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(10): 103514.