

文章编号: 2095-4980(2018)01-0158-06

硅在脉冲激光作用下温度积累效应的数值模拟

孙 鹏^{1a,1b}, 李 沫^{*1a,1b}, 杨庆鑫², 汤 戈^{1a,1b}, 张 健^{1a,1b}(1.中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2.哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘 要: 采用单温模型, 利用有限元方法对硅在纳秒脉冲激光作用下的温度积累效应进行了数值模拟。给出了单脉冲、多脉冲作用下, 硅表面附近的非平衡载流子浓度、自由载流子吸收系数和晶格温度随时间的变化规律。结果表明, 自由载流子浓度的积累是温度积累的主要来源。对于多脉冲作用情况, 脉冲间隔越短, 脉宽越窄, 温度积累效应越明显, 最终形成的瞬时晶格最高温和温升值越大, 越容易对材料造成损伤。

关键词: 激光脉冲; 温度积累效应; 晶格温度; 重复频率; 损伤阈值; 脉宽

中图分类号: TN301.1; O436

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0158

Numerical simulation of the accumulative photo-thermal effect in silicon under illumination with sequential laser pulses

SUN Peng^{1a,1b}, LI Mo^{*1a,1b}, YANG Qingxin², TANG Ge^{1a,1b}, ZHANG Jian^{1a,1b}(1a. Microsystems & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;
1b. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
2. Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150000, China)

Abstract: The single-temperature model and Finite Element Method(FEM) are employed for the numerical simulation of the accumulative photo-thermal effect in silicon under illumination with sequential laser pulses. The time dependences of non-equilibrium carriers' density, free carrier absorption, and the lattice temperature under the interaction with one pulse, and multiple-pulse are studied, as well as the optical damage threshold. The results show that the accumulation of free carrier concentration is the main source of temperature accumulation. In the case of multiple-pulse, the shorter the pulse interval, and the narrower the pulse width, the more easily the material can be damaged.

Keywords: laser pulse; accumulative photo-thermal effect; lattice temperature; repetition rate; damage threshold; pulse width

在辐射效应研究领域, 激光模拟技术在半导体器件剂量率辐射效应和单粒子效应的研究和加固设计中发挥了越来越重要的作用, 得到了国内外科研界的认可和推广^[1-4]。在激光与半导体材料、器件的相互作用中, 温度效应是至关重要的物理问题之一^[5]。准确地给出脉冲激光在半导体材料和器件中的温度场随空间、时间的变化规律, 对研究激光与半导体材料相互作用过程, 阐明激光模拟硅基半导体器件辐射效应精确度和适用范围等具有重要意义^[6-7]。目前在温度效应方面, 对带边附近(比如波长为 1064 nm)的纳秒脉冲激光与硅相互作用的热致损伤机理仿真研究多集中在单脉冲或双脉冲作用情况^[8-10], 而对高重复频率的多脉冲作用情况下的温度积累效应却少有系统报道。针对在激光模拟辐射效应技术中常用的 1064 nm 的纳秒脉冲激光, 本文采用单温模型, 利用有限元方法对硅在纳秒激光单脉冲和连续多脉冲作用下, 硅表面附近的非平衡载流子浓度、自由载流子吸收系数和晶格温度随时间的变化规律进行了数值模拟, 较为系统地研究了激光模拟半导体器件辐射效应中的温度积累效应的机理。

收稿日期: 2017-05-25; 修回日期: 2017-09-14

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金资助项目(2014-1-100)

*通信作者: 李沫 email: limo@mtre.ac.cn

1 纳秒激光与硅相互作用的理论模型

温度效应主要包含 3 个物理过程：光致电离(带间线性吸收、双光子吸收)、自由载流子吸收和载流子向晶格能量弛豫。价带电子吸收一个或多个光子跃迁到导带形成自由载流子，并引起自由载流子温度的迅速增加。上述过程较快，发生的时间尺度在飞秒量级。而热载流子到晶格的能量弛豫时间相对较长，在若干皮秒量级达到平衡，使晶格温度升高并趋向稳定，载流子能量转化为晶格能量，表现为半导体材料的温度升高。当激光脉宽为飞秒或皮秒量级，高功率密度的激光会使半导体材料表面形成电子空穴等离子体，破坏材料化学键造成非热致损伤，此时应关注载流子温度，描述超短脉冲与硅材料相互作用过程中载流子与晶格热量传递的过程需采用“双温模型”^[9,11-12]；当激光脉宽为纳秒量级，激光功率密度较低，半导体材料表面不会形成热等离子体，载流子温度不会过高，光损伤以致热为主，材料损伤阈值为晶格温度达到熔点(1687 K)时相应激光能量密度，此时可采用“单温模型”^[13]。

在研究温度效应的过程中需要考虑多种并存的机制。硅在脉冲激光的辐照下，非平衡载流子的浓度提高，相应地增大了自由载流子吸收系数，改变了光强分布；而非平衡载流子的扩散与复合又减小了自由载流子吸收系数。吸收系数和光强的改变都会影响温度分布，也就是说，这是一个光强、温度和载流子浓度等多物理场耦合问题。在所使用的单温模型中，假定激光辐照到硅上，其纵向轴附近辐照均匀，载流子和热量无横向扩散。此时，光强 I 、载流子浓度 n 与晶格温度 T 的微分方程可分别由式(1)、式(2)和式(3)给出^[14-15]：

$$\nabla I = -(\alpha_L + \beta I + \alpha_{FCA})I, \alpha_{FCA} = 4 \times 10^{-18} \lambda^2 n \frac{T}{300} \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla(D_a \nabla n) + \frac{\alpha_L I}{hf} + \frac{\beta I^2}{2hf} - (n - n_0)\left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_0}\right), \tau_R = \frac{1}{4 \times 10^{-31} n^2} \quad (2)$$

$$\rho C_L \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_L \nabla T) + (hf - E_g) \frac{\alpha_L I}{hf} + (2hf - E_g) \frac{\beta I^2}{2hf} + E_g (n - n_0) \left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_0}\right) + \alpha_{FCA} I \quad (3)$$

式(1)描述了光强 I 随穿透深度的变化梯度与 3 类吸收机制的关系(线性吸收、双光子吸收和自由载流子吸收)，式(1)中： α_L 为线性吸收系数； β 为双光子吸收系数； α_{FCA} 为自由载流子吸收系数； λ 为波长，单位为 μm ； n 为载流子浓度， T 为晶格温度。

式(2)描述了载流子浓度随时间的变化规律，式(2)中： D_a 是扩散常数； $\frac{\alpha_L I}{hf}$ 为线性吸收引起的非平衡载流子浓度增加； $\frac{\beta I^2}{2hf}$ 为双光子吸收引起的非平衡载流子浓度增加； $-(n - n_0)\left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_0}\right)$ 则表示俄歇复合与载流子直接/间接复合引起的载流子浓度减少； τ_R 和 τ_0 分别为俄歇复合和间接复合寿命。

式(3)描述了晶格温度的变化规律，式(3)中： ρ 、 C_L 、 k_L 分别代表密度、热容和热导率； $(hf - E_g) \frac{\alpha_L I}{hf}$ 描述了线性吸收引起的能量增加，由于载流子携带能量仍然存在，这里用的是光子能量与带隙的差， $(2hf - E_g) \frac{\beta I^2}{2hf}$ 则描述了双光子吸收引起的能量增加； $E_g (n - n_0) \left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_0}\right)$ 为俄歇复合损失的能量转化为晶格热能； $\alpha_{FCA} I$ 表示自由载流子吸收引起的晶格能量增加。

2 数值计算结果及讨论

本文研究采用有限元法求解偏微分方程组。在计算中采用高斯脉冲激光，硅表面位于入射光束腰位置。不做特殊说明情况下，计算过程中使用的激光和硅材料的模型参数如表 1 所示。每个脉冲光强归一化时空分布由公式(4)给出：

$$I(t) = E \frac{4}{\pi \omega_0^2 \tau_p} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp(-2 \frac{r^2}{\omega_0^2}) \exp(-4 \ln 2 \frac{(t - 3\tau_p)^2}{\tau_p^2}) \quad (4)$$

式中： ω_0 为束腰半径； τ_p 为脉冲半高宽； E 为脉冲能量。

表 1 激光和硅材料的模型参数

parameter	value
wavelength λ	1 064 nm
pulse width τ_p	10 ns
pulse delay	30 ns
waist radius ω_0	0.5 mm
initial temperature T_0	300 K
density of silicon ρ	2.329 g·cm ⁻³
thermal capacity of silicon C_L	0.7 J·g ⁻¹ ·K ⁻¹
thermal conductivity of silicon k_L	1585/T ^{0.23} W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
diffusion constant D_a	18T ₀ /T cm ² ·s ⁻¹
linear absorption coefficient α_L	14 cm ⁻¹
nonlinear absorption coefficient β	3×10 ⁻⁸ cm·W ⁻¹

2.1 单脉冲辐照

图 1 为单脉冲辐照时表面晶格最高温度与脉冲能量关系。可以看出,在一定范围内晶格最高温度与脉冲能量呈指数关系变化,晶格温度达到硅熔点(1 687 K)所对应的单脉冲能量为 18.13 mJ,按照式(1)计算得到相应的损伤阈值为 $4.34 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。

以功率密度最大值为 $1.91 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ (单脉冲能量 8 mJ)、脉冲激光辐照厚度为 100 μm 的硅材料为例。硅表面及其内部不同穿透深度(0, 25 μm , 50 μm , 75 μm 和 100 μm)的光强随时间变化关系如图 2 所示。计算结果表明随着穿透深度的增加,光强的高斯对称性发生改变。光强较大时双光子吸收增强,使得非平衡载流子浓度增加;同时自由载流子吸收增强又造成光强减小,这种双光子吸收、自由载流子吸收与光强、载流子浓度均有相互依赖关系,造成了光强的高斯对称性发生了变化。

300 K 条件下,不同穿透深度(0, 25 μm , 50 μm , 75 μm 和 100 μm 处)的晶格温度随时间变化数值模拟结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,硅表面附近的晶格温度随光强增加而迅速升高。光脉冲过后则逐渐下降,其原因在于激光与自由电子之间的能量交换(光吸收)过程非常快,在飞秒时间尺度。热载流子到晶格的能量弛豫也在若干皮秒完成,远远小于纳秒光脉冲宽度,所以晶格升温过程即是激光脉冲作用的过程。而晶格温度的下降速度则由热传导系数决定,这一过程为毫秒时间尺度。这种快升慢降的特点使得硅材料在多脉冲作用下会产生温度积累效应。

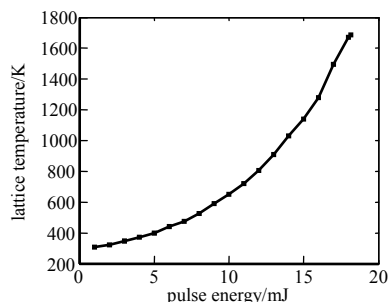


Fig.1 Relationship between surface lattice temperature and single pulse energy
图 1 表面晶格温度与单脉冲能量的关系

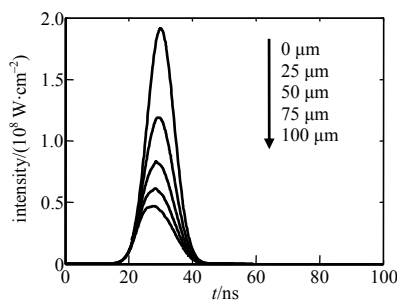


Fig.2 Variation of light intensity with time at different penetration depths
图 2 不同穿透深度光强随时间的变化关系

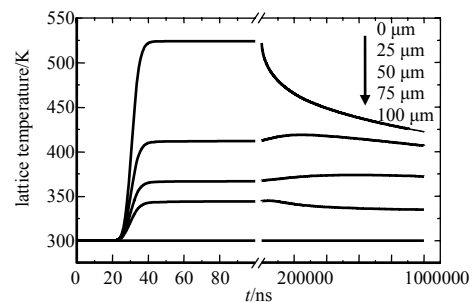


Fig.3 Variation of temperature with time at different penetration depths at 300 K
图 3 300 K 条件下不同穿透深度晶格温度随时间变化情况

单脉冲激光辐照过程中会电离出大量的非平衡载流子,而脉冲过后,非平衡载流子将由于复合而逐渐消失。因复合带来的非平衡载流子的衰减过程符合如式(5)的关系^[14-15]:

$$\Delta n(t) = ce^{-t/\tau} \quad (5)$$

式中: $\Delta n(t)$ 为非平衡载流子浓度; c 为脉冲作用后的非平衡载流子最高浓度; τ 为非平衡载流子寿命。

如图 4 和图 5 所示,激光脉冲辐照后,非平衡载流子浓度和自由载流子吸收系数在百纳秒尺度内会维持在一定水平。其中,非平衡载流子浓度是由俄歇复合速率和电离产生率共同决定的,俄歇复合可抑制高载流子浓度的形成,使得纳秒尺度内载流子保持中低浓度水平。非载流子浓度的迅速增加过程是由于激光脉冲作用下,载流子产生率远大于复合率,同时带来自由载流子吸收系数显著增加,非平衡载流子浓度衰减过程是由激光能量减小和复合的共同作用下带来的,载流子浓度减小导致俄歇复合率下降,从而表现出“拖尾”过程,同样,随着非平衡载流子浓度的下降,自由载流子吸收系数缓慢衰减。仿真结果表明,线性吸收(14 cm^{-1})^[3]和双光子吸收(2 cm/GW)^[16]不是晶格温度升高的主要原因,晶格温度升高的主要原因为自由载流子吸收(230 cm^{-1} @ 30 ns)。

2.2 多脉冲辐照

当在多脉冲激光作用下,采取的计算方法如图 6 所示: 1) 模拟第 1 脉冲光作用区间升温过程,晶格温度上升并达到最高温度; 2) 将过程 1) 计算得到的末值作为温降过程的初始值,模拟第 1 脉冲光作用区间的温降过程; 3) 将过程 2)

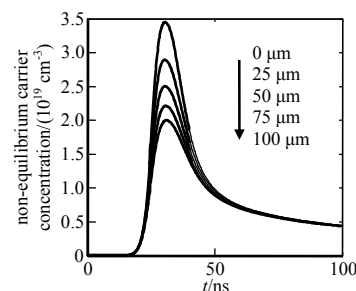


Fig.4 Non-equilibrium carrier concentration vs. time
图 4 非平衡载流子浓度随时间变化

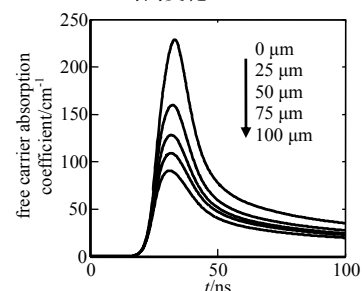


Fig.5 Free carrier absorption coefficient vs. time
图 5 自由载流子吸收系数随时间变化

计算得到的末值作为第 2 脉冲作用区间的晶格温度初值, 模拟第 2 脉冲光作用区间的温升过程。依此类推, 计算出每个光脉冲作用前后的低温值和高温值, 以及相应的温升值。

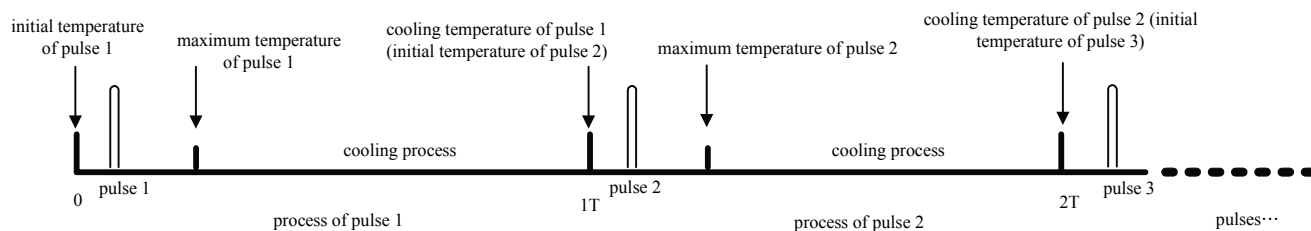


Fig.6 Schematic diagram of multi-pulse action

图 6 多脉冲作用示意图

为更加清楚地分析非平衡载流子浓度、自由载流子吸收系数和晶格温度的积累情况, 选取多脉冲作用下的前 2 个脉冲进行详细说明。脉冲间隔选取为 100 ns(重频为 10 MHz), 其余参数均与单脉冲辐照一致。硅材料不同深度情况下(0 μm , 25 μm , 50 μm , 75 μm 和 100 μm)光强变化规律如图 7 所示。第 1 个脉冲辐照后产生的非平衡自由载流子积累(约为非平衡载流子最高浓度的 1/8), 导致第 2 个光脉冲穿透硅时自由载流子吸收增加, 在相同穿透深度处的光强变小(对表面影响不大)。

不同穿透深度的晶格温度变化如图 8 所示。可看出在第 1 个脉冲过后晶格温度升高, 并且产生累积效应, 使得晶格温度在第 2 个脉冲作用下再一次升高。图 9 为不同穿透深度非平衡载流子浓度变化情况。在第 1 个脉冲作用后, 非平衡载流子在 100 ns 内并没有完全复合掉, 理想情况下第 2 个脉冲到来后产生的非平衡载流子浓度应该更高, 但是在自由载流子吸收造成的第 2 个脉冲在材料内光强减小、俄歇复合增强的共同作用下, 实际表现出来的是第 2 个脉冲作用下的非平衡载流子浓度小于第 1 个脉冲作用下的非平衡载流子浓度(表面的影响较小)。图 10 为不同穿透深度自由载流子吸收系数变化情况, 自由载流子吸收系数与波长、温度、非平衡载流子浓度有关, 其表达式为

$$\alpha_{\text{FCA}} = c\lambda^2 Tn \quad (6)$$

式中 c 为常数。结合图 9 和图 10 进行分析, 在第 2 个脉冲到来后, 载流子浓度虽然略有减小, 但是晶格温度大幅升高, 从而导致自由载流子系数显著增大。

由于温度积累效应, 脉冲频率越高, 温升效果越明显。对于脉冲间隔 100 ns 的情况, 如图 8 所示, 因脉冲间隔较短, 可忽略脉冲间隔内的温降过程, 此时主要表现为温度积累。为便于分析脉冲频率对能量积累的作用, 这里将激光能量设置为较小值 3.6 mJ。图 11(a)为重复频率 10 MHz 下, 晶格温度随时间变化关系。从第 1 个脉冲到来时刻开始计时, 从图中可以看出, 在第 11 个脉冲时, 晶格温度超过硅熔点。保持激光能量不变的情况下, 当重复频率逐渐降低时, 达到硅损伤所需的脉冲个数逐渐增多。如图 11(b), 重复频率为 1 MHz 时, 达到损伤阈值所需要的脉冲个数为 14 个。另外, 随着重复频率的减小, 脉冲间隔逐渐增大, 脉冲间隔时间内的温降作用不可忽略, 如图 11(c)所示, 其温度积累速度已经明显减小。对于图 11(d)所示情况, 在重复频率 5 kHz 的激光脉冲辐照下, 由于每个脉冲的时间间隔足够大, 在后一个脉冲到来之前, 晶格温度已恢复到前一个脉冲到来时的初始状态, 因此无温度积累效应。除重复频率外, 脉冲宽度(脉宽)对温度积累效应也有一定的影响。当激光脉冲的总能量一定时, 脉宽越窄, 表面晶格温度越高。固定激光能量, 脉冲宽度不同时, 表面处晶格温度随时间的变化关系如图 12 所示。当脉冲宽度为 5 ns 时, 其达到损伤阈值所需的脉冲个数最少, 当第 9 个脉冲过后, 材料表面晶格温度接近损伤阈值。对于脉冲宽度 20 ns 情况, 其达到损伤所需的脉冲个数为 13。

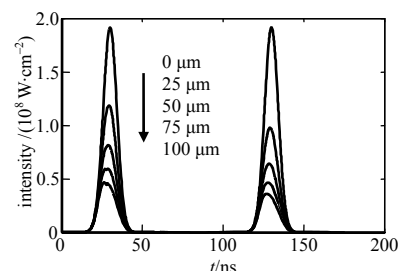


Fig.7 Variation of light intensity at different penetration depths

图 7 不同穿透深度光强变化

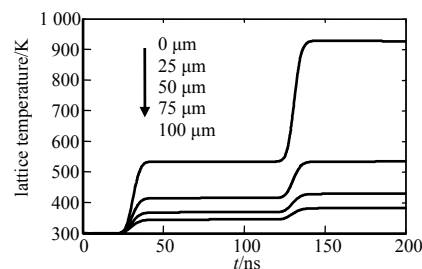


Fig.8 Variation of lattice temperature at different penetration depths

图 8 不同穿透深度晶格温度变化

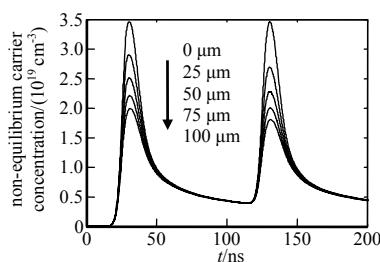


Fig.9 Variation of non-equilibrium carrier concentration at different penetration depths

图 9 不同穿透深度非平衡载流子浓度变化

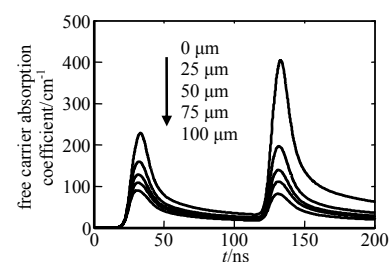


Fig.10 Variation of free carrier absorption coefficient at different penetration depths

图 10 不同穿透深度自由载流子吸收系数变化

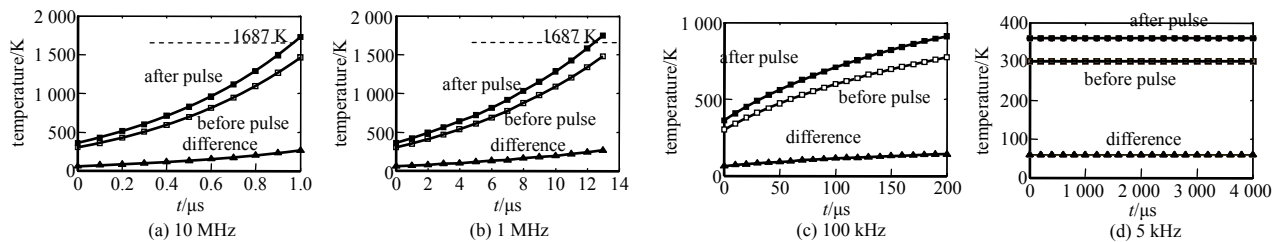


Fig.11 Temperature accumulation effect under different repetition rates: (a) 10 MHz; (b) 1 MHz; (c) 100 kHz; (d) 5 kHz

图 11 不同重复频率(脉冲间隔)下, 温度积累效应的升温过程: (a) 10 MHz; (b) 1 MHz; (c) 100 kHz; (d) 5 kHz

3 结论

本文系统地研究了激光模拟辐射电离效应中所关注的温度积累效应的机理, 给出了非平衡载流子浓度、自由载流子吸收系数和晶格温度随时间的变化规律。仿真结果表明, 在第 1 脉冲作用后, 间隔为 100 ns 脉冲能量相同的第 2 脉冲作用之前, 晶格温度基本不变, 为 100% 积累, 这充分证明晶格热能在硅材料中的积累是温度积累的主要来源, 占最高温升的 1/3。第 1 脉冲作用同时形成了载流子浓度的约为最高变化值 12% 的积累, 从而使第 2 脉冲作用由于自由载流子吸收增加而形成的温升值约为第 1 脉冲形成的 2 倍, 这也是温度积累的主要来源, 占最高温升的 2/3。对于多脉冲作用情况, 温度积累的程度取决于热导率与重复频率、脉冲宽度的竞争。热导率固定的情况下, 重复频率越高, 脉冲宽度越窄, 温度积累效应越明显, 最终形成的瞬时晶格最高温和温升值越大, 越容易对材料造成损伤。

参考文献:

- [1] KANYOGORO N, BUCHNER S, MCMORROW D, et al. A new approach for single-event effects testing with heavy ion and pulsed-laser irradiation: CMOS/SOI SRAM substrate removal[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 6(57):3414–3418.
- [2] NIKIFOROV A Y, SKOROBOGATOV P K. Physical principles of laser simulation for the transient radiation response of semiconductor structures, active circuit elements, and circuits: a linear model[J]. Russian Microelectronics, 2004, 33(2):68–79.
- [3] NIKIFOROV A Y, SKOROBOGATOV P K. Physical principles of laser simulation for the transient radiation response of semiconductor structures, active circuit elements, and circuits: a nonlinear model[J]. Russian Microelectronics, 2006, 35(3):138–149.
- [4] 李沫, 孙鹏, 宋宇, 等. 半导体器件辐射电离效应的激光模拟方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1):160–168. (LI Mo, SUN Peng, SONG Yu, et al. Basic principles and research progress of laser simulation of ionization radiation effect in semiconductor devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1):160–168.)
- [5] 沈中华, 陆建, 倪晓武. 皮秒和纳秒脉冲激光作用于半导体材料的加热机理研究[J]. 中国激光, 1999, 26(9):859–863. (SHEN Zhonghua, LU Jian, NI Xiaowu. Study of the heating mechanism of a semiconductor irradiated by picosecond and nanosecond laser pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(9):859–863.)
- [6] STUART B C, FEIT M D, HERMAN S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. Physical Review B, 1996, 53(4):1749.
- [7] COYNE E, O'CONNOR G M, GLYNN T J. Electrical analysis of femtosecond laser pulse absorption in silicon[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2006, 34(3):189–195.
- [8] 王昂, 郭锋, 朱志武, 等. 连续激光与单脉冲纳秒激光对 CMOS 的损伤效应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9):091007. (WANG Ang, GUO Feng, ZHU Zhiwu, et al. Comparative study of hard CMOS damage irradiated by CW laser and single-pulse ns laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(9):091007.)
- [9] LEE S H, LEE J S, PARK S, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristics of a silicon film irradiated by pico-to-femtosecond pulse lasers[J]. Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 2003, 44(8):833–850.
- [10] 郭锋, 朱志武, 朱荣臻, 等. 1064 nm 纳秒单脉冲激光对互补金属氧化物半导体探测器的损伤效应实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1):192–197. (GUO Feng, ZHU Zhiwu, ZHU Rongzhen, et al. Experimental study of damage effect on complementary metal oxide semiconductor detector irradiated by 1064 nm nanosecond single-pulse laser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1):192–197.)

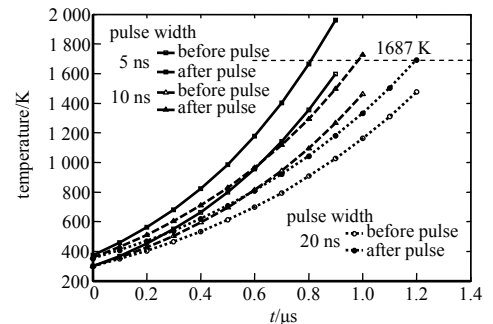


Fig.12 Temperature accumulation effect under different pulse widths

图 12 不同脉冲宽度温度积累效应的升温过程

- [11] 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. (SHAO Junfeng, GUO Jin, WANG Tingfeng. Theoretical research on dynamics of femto-second laser ablation crystal silicon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014,43(8):2419-2424.)
- [12] FEDOSEJEVS R, KIRKWOOD S E, HOLENSTEIN R, et al. Femtosecond interaction processes near threshold: damage and ablation[J]. Proceedings of SPIE, 2006,6403(1):640302.
- [13] 罗晋,刘志超,陈松林,等. 多脉冲激光辐照下介质损伤理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(12):3301-3306. (LUO Jin, LIU Zhichao, CHEN Songlin, et al. Theoretical research of multi-pulses laser induced damage in dielectrics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(12):3301-3306.)
- [14] KORFIATIS D P, THOMA K A T, VARDAXOGLU J C. Conditions for femtosecond laser melting of silicon[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007,40(21):6803.
- [15] BOURANTAS G C, KORFIATIS D P, LOUKOPOULOS V C, et al. Numerical simulation of the unsteady non-linear heat transfer problems. Application on nanosecond laser annealing of Si[J]. Applied Surface Science, 2012,258(19):7266-7273.
- [16] CHEN J K, TZOU D Y, BERAUN J E. Numerical investigation of ultrashort laser damage in semiconductors[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005,48(3):501-509.

作者简介:



孙 鹏(1988-), 男, 山东省高密市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为集成微系统技术等. email:sunpeng@mtrc.ac.cn.

李 沫(1982-), 女, 哈尔滨市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为量子与光电技术和集成微系统技术等.

杨庆鑫(1973-), 男, 哈尔滨市人, 博士, 副教授, 博导, 主要研究方向为有机半导体、半导体量子点的超快激子动力学.

汤 戈(1992-), 男, 湖北省潜江市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为集成微系统技术等.

张 健(1968-), 男, 四川省大竹县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微系统技术、太赫兹技术、无线电物理等.



2018 全球智能工业创新大会(GIIC)暨全球创新技术成果转移大会

2018 年 5 月 21~22 日 中国 北京会议中心

<http://www.globaliic.com/>

主办单位: 中国工程院、中国科学院

承办单位: 中国工程院信息与电子工程学部、中国光学工程学会

会议征文: 大会正火热征文中, 截稿时间: 2 月 28 日, 诚挚欢迎相关领域科研院所的科研人员以及大专院校的师生、研究生等踊跃投稿, 并欢迎应用领域文章。会议邀请作者将原创的论文投往本会议, 请作者登陆投稿系统提交文章。

- 中英文兼收, 论文经组委会初审后, 择优推荐到合作期刊(SCI, EI, 中文核心, 科技核心等收录)。论文格式无严格要求, 收到组委会发的录用通知后, 请按推荐期刊格式要求修改论文并将论文全文提交至推荐期刊网站, 由期刊编辑部审核录用后正式发表。
- 若文章希望发表在 SPIE 文集(EI 全文收录), 截止日期前提交英文摘要即可。会后提交英文全文至 spie 官网, 会后半年左右全文可在 EI 数据库检索到。
- 若不发表文章, 只希望做粘贴/口头交流, 可在投稿系统上传报告摘要, 题目后注明交流类型(粘贴/口头交流)

联合征稿期刊: Journal of Electronic Imaging(SCI); Journal of Applied Remote Sensing(SCI); Optical Engineering(SCI); Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS(SCI); 红外与激光工程(EI); 光学精密工程(EI); 信息与控制(中文核心); 飞航导弹(中文核心); 现代防御技术(中文核心); 电光与控制(中文核心); 战术导弹技术(中文核心); 太赫兹科学与电子信息学报(科技核心)

征文方向 (稿件提交链接): 人工智能技术专题研讨会 <http://events.kjtxw.com/tougao/AI2018.html>; 智能制造高峰论坛之智能检测装备 <http://events.kjtxw.com/tougao/IM2018.html>; 工业机器人智能控制 <http://events.kjtxw.com/tougao/IRIC2018.html>; 智能无人系统大会 <http://events.kjtxw.com/tougao/US2018.html>; 新能源汽车与电磁兼容研讨会 <http://events.kjtxw.com/tougao/EMC2018.html>; 识别技术与智慧城市创新发展论坛 <http://events.kjtxw.com/tougao/SM2018.html>; 工业控制系统产业峰会 <http://events.kjtxw.com/tougao/ICS2018.html>

组委会联系人: 中国光学工程学会, 蔡方方, 022-58168541, 58168520, cai_ff@csoc.org.cn